



## بررسی اثر سختکاری استحاله‌ای سطحی توسط لیزر دیودی توان بالا بر ریزساختار، سختی و رفتار سایشی فولاد ابزار سرد کار AISI O1

امیر سالار دهقانی<sup>1</sup>، امیررضا فرنیا<sup>2\*</sup>، محمدجواد ترکمنی<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

2- استادیار، مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

3- استادیار، مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران، ایران

\* تهران، صندوق پستی 775-14515، a.farnia@sbiau.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در این تحقیق سختکاری استحاله‌ای سطحی فولاد ابزار سرد کار AISI O1 توسط لیزر دیودی توان بالا با بیشینه توان 1600 وات با پارامترهای توان و سرعت اسکن متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و مشخصه یابی ریزساختاری، فازی، ریز سختی سنجی و سایش برای بررسی اثر سختکاری توسط لیزر، انجام گردید. فرایند سختکاری منجر به ایجاد منطقه‌ی سختکاری شده با عمق حدود 2 میلی‌متر و عرض بالای 10 میلی‌متر شد. ریزساختار ناحیه‌ی سختکاری شده شامل فازهای مارتنزیت و آستنیت باقی‌مانده بود و سختی برای پارامترهای مختلف در محدوده‌ی 760 تا 650 ویکرز حاصل شد. افزایش گرمای ورودی باعث افزایش درصد آستنیت باقی‌مانده شد و منجر به ایجاد ساختار درشت مارتنزیت گردید و سختی برای نمونه با بالاترین گرمای ورودی دارای کمترین مقدار بود. مقایسه‌ی خواص سایشی نمونه‌های سختکاری شده با نمونه‌ی سخت شده در روغن و بازپخت و همچنین نمونه‌ی آنیل شده، مشخص کرد که فرایند سختکاری منجر به بهبود خواص سایشی نمونه‌های سختکاری شده گردیده است و مقاومت به سایش نمونه‌ی سختکاری شده توسط لیزر در حدود 10 برابر نمونه‌ی آنیل شده بود.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 28 مهر 1399  
داوری اولیه: 14 آبان 1399  
پذیرش: 10 آذر 1399

### کلیدواژگان:

سختکاری استحاله‌ای سطحی  
فولاد ابزار سرد کار AISI O1  
لیزر دیودی توان بالا  
سختی  
مقاومت به سایش

## Investigation of the effect of surface transformation hardening by high power diode laser on the microstructure, hardness and wear behavior of AISI O1 cold work tool steel

Amirsalar Dehghani<sup>1</sup>, Amirreza Farnia<sup>1\*</sup>, Mohammad Javad Torkamany<sup>2</sup>

1- Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Iranian National Center for Laser Science and Technology, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 14515-755 Tehran, Iran, a.farnia@sbiau.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 20 October 2020  
First Decision: 5 November 2020  
Accepted: 1 December 2020

### Keywords:

Surface Transformation Hardening  
AISI O1 Cold work Tool Steel  
High Power Diode Laser  
Hardness  
Wear Resistance

### Abstract

In this study, surface transformation hardening of AISI O1 cold work tool steel was investigated by use of a high power (1600 W) diode laser apparatus. In order to evaluate the effect of laser hardening, different output powers and scanning rates were applied and microstructures and phases were characterized, as well as micro-hardness and wear resistance were measured. The hardening treatment resulted in formation of a hardened zone of about 2 mm depth and up to 10 mm width at the surface of sample. The microstructure of this hardened zone was comprised of martensite and residual austenite; average surface hardness of the samples treated under various set of variable parameters was 650 to 760 Vickers. Increase of heat input caused increase of residual austenite content and formation of coarse martensite structure so that the least hardness was obtained for the sample processed by the highest heat input. Comparing wear resistance of laser hardened samples with traditionally quench-temper hardened and annealed specimens, it was revealed that the laser hardening process improves wear resistance of hardened samples so that wear resistance of the samples hardened via laser was about 10 times of the annealed ones.

### 1- مقدمه

برخوردار است [1]. یکی از مشکلات اساسی در روش‌های القایی و شعله‌ای، میزان گرمای ورودی بالا در این روش‌ها است که منجر به گرم شدن حجم بالایی از نمونه می‌شود که گرمایش کل نمونه، باعث ایجاد مشکلاتی در طول فرایند سختکاری

سختکاری استحاله‌ای سطح توسط لیزر با توجه به ماهیت پرتوی لیزر در مقایسه با فرایندهای سنتی سختکاری سطحی نظیر سختکاری القایی، شعله‌ای و روش‌های شیمیایی از مزایای زیادی

### Please cite this article using:

A. Dehghani, A. Farnia, M. Javad Torkamany, Investigation of the effect of surface transformation hardening by high power diode laser on the microstructure, hardness and wear behavior of AISI O1 cold work tool steel, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 14- 22, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

اکثر فولادهای ابزار برای برنامه‌های کاربردی مشخصی تولید می‌شوند به طوری که انتخاب نهایی بر اساس عمر قطعه و هزینه‌ی مواد مورد استفاده انجام می‌گیرد. منطقی است که تأثیرگذارترین عامل روی عمر قطعات، خواص تریبولوژیکی است [9]. به طور کلی افزایش سختی، خواص تریبولوژیکی مواد را بهبود می‌دهد از این رو برای افزایش مقاومت به سایش قطعات صنعتی از سخت کاری سطحی استفاده می‌شود و مشخص شده است که لیزر دارای مزایای زیادی برای فرایند سختکاری سطحی است [10].

تحقیقات زیادی بر روی سختکاری سطحی فولادهای ابزار گرم کار با لیزر انجام شده است [11-17]. تلسانگ و همکاران [14] سختکاری سطحی فولاد ابزار H13 را توسط لیزر دیودی توان بالا مورد بررسی قرار دادند. با افزایش چگالی انرژی لیزر، عمق منطقه‌ی سختکاری شده افزایش یافت. در مقادیر بالای چگالی انرژی لیزر ( $75 > \text{ژول/میلی متر مربع}$ ) ذوب سطحی اتفاق افتاد و در مقادیر پایین چگالی انرژی لیزر ( $50 < \text{ژول/میلی متر مربع}$ ) فرایند سخت کاری انجام نگرفته و صرفاً فازهای کاربیدی درشت شدند. بر اساس مقادیر چگالی انرژی در محدوده‌ی 50 تا 75 ژول/میلی متر مربع، فازهای مارتنزیت، آستنیت و کاربید در مقادیر حجمی مختلف تشکیل گردید [14].

ژانگ و همکاران [17]، تأثیر اعمال لیزر حالت جامد Nd-YAG را روی فولاد قالب گرم کار H21 مورد مطالعه قرار دادند. اعمال لیزر روی سطح منجر به ایجاد رسوبات کاربیدی با ساز نانومتر شده و سختی 780 ویکرز حاصل گردید. نتایج آزمون خستگی حرارتی<sup>1</sup> نشان داد که اعمال لیزر روی سطح در مقایسه با حالت اولیه بوده است. در تحقیقی که توسط باند و همکاران [18]، روی سختکاری سطحی فولاد ابزار سرد کار AISI O1 توسط لیزر CO<sub>2</sub> با توان 500 وات و سرعت روبش 2 میلی متر بر ثانیه انجام شده است، منجر به ایجاد منطقه‌ی سختکاری شده با عمق 0/6 میلی متر گردید و در منطقه‌ی سختکاری شده، فازهای کاربیدی انحلال نیافته و فاز آستنیت شناسایی گردید. باین حال تحقیقات خیلی محدودی بر روی سخت کاری لیزری فولادهای سرد کار انجام گرفته است [19].

مطالعات انجام شده مشخص کرد که فرایند سختکاری سطحی فولاد AISI O1 توسط لیزر دیودی توان بالا تا به حال مورد بررسی قرار نگرفته و با توجه به قابلیت‌های بالای لیزر دیودی توان بالا [20] و کاربردهای گسترده‌ی فولاد AISI O1،

می‌گردد که از این مشکلات می‌توان به ایجاد شوک‌های حرارتی و کاهش سختی فاز مارتنزیت به علت کاهش شیب حرارتی اشاره کرد. عموماً برای روش‌های سنتی سختکاری سطحی، به عامل سرمایش خارجی نظیر هوا، روغن و بعضاً جریان آب برای ایجاد ساختار مارتنزیتی نیاز است که کنترل این فرایند دشوار بوده و بعضاً منجر به آلودگی سطح نمونه و مشکلات زیست محیطی می‌گردد [2]. پرتوی متمرکز لیزر و میزان پایین گرمای ورودی در سختکاری توسط لیزر در مقایسه با روش‌های سنتی این امکان را ایجاد کرده است که فرایند سختکاری سطحی توسط لیزر بدون عامل سرمایش خارجی انجام گردد و با سرمایش خود به خودی، ساختار مارتنزیت در منطقه‌ی سختکاری شده ایجاد شود [3].

با توسعه‌ی لیزرها، فرایند سختکاری سطحی توسط لیزر نیز به همراه کاربردهای دیگر فناوری لیزر پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته است [4]. بعد از لیزرهای CO<sub>2</sub> و لیزر حالت جامد Nd:YAG، لیزرهای دیودی پرتوان با توجه به بازدهی بالا، توزیع توان یکنواخت و اثر مستطیلی و عریض، قابلیت‌های رقابتی بسیار خوبی از خود نشان داده‌اند [5].

فولادهای ابزار گروهی از مواد مهندسی هستند و در بین گروه فولادهای ابزار، فولادهای سرد کار از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند [6]. این فولادها اکثراً به عنوان قالب در صنعت خودرو و ابزارهای برش در دمای پایین مورد استفاده قرار می‌گیرند. فولادهای ابزار سرد کار سخت شونده در روغن در سیستم نام گذاری AISI به عنوان گروه O تعریف شده‌اند. سختی بالا و مقاومت سایشی این آلیاژها ناشی از مقدار بالای کربن و مقادیر کم عناصر آلیاژی کاربید زا می‌باشد. محتوای کربن بالا باعث تشکیل مارتنزیت با مقدار سختی زیاد می‌شود و عناصر آلیاژی نیز این امکان را به آلیاژ می‌دهند که سخت کاری برای اندازه‌های مناسب در روغن انجام گیرد. مقادیر بالای عناصر آلیاژ که منجر به ایجاد کاربید در فولادهای ابزار می‌شود برای کاربردهای دمابالا و برش‌های سرعت بالا ضروری است. فولادهای ابزار گروه O به دلیل کم بودن عناصر آلیاژی محدود به کاربردهای کار سرد شده‌اند. فولاد O1 تا حدی زیادی معروف‌ترین و محبوب‌ترین فولاد ابزار سرد کار گروه O است [7]. فولاد AISI O1 می‌تواند از دمای آستنیت‌ی پایین تری به نسبت دیگر فولادهای ابزار سری O سخت کاری شود. این فولاد دارای سختی پذیری بالا، عدم حساسیت به رشد دانه در دمای های بالای آستنیت‌ی کردن، دارای تنگستن بالاتر نسبت به بقیه‌ی آلیاژهای گروه O و دارای قیمت مناسب است [8].

<sup>1</sup> Thermal fatigue

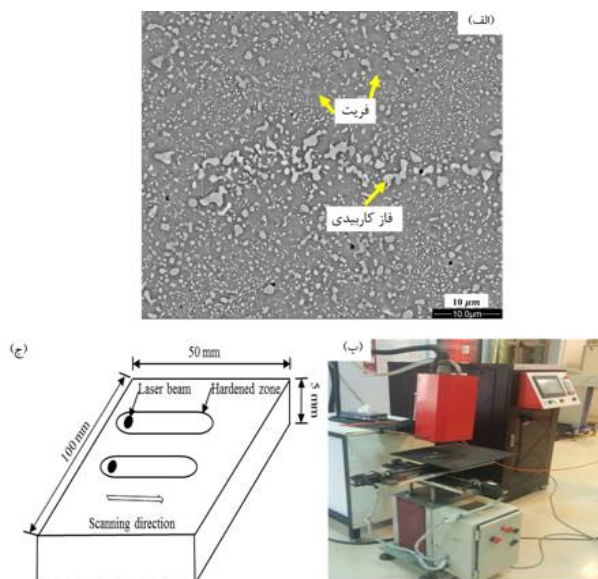


Fig. 1 a) High power diode laser image used in the present study and b) Scheme of laser surface hardening process

شکل 1 الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فلز پایه ب) تصویر لیزر دیودی توان بالای مورد استفاده در تحقیق حاضر و ج) طرح‌واره‌ی فرایند سختکاری سطحی توسط لیزر

جدول 2 مشخصات لیزر دیودی توان بالای مورد استفاده در تحقیق حاضر

Table 2 Specifications of high power diode laser used in the present study

مشخصات	معیار
نیمه‌هادی توان بالا	نوع لیزر
808 نانومتر	طول موج
1600W	توان
پیوسته (CW)	حالت کاری
40 میلی‌متر	فاصله‌ی کانونی
11/88 در 3/8 میلی‌متر	ابعاد پرتو در فاصله‌ی کاری
70 میلی‌متر	فاصله‌ی کاری

میزان چگالی توان لیزر و گرمای ورودی در طول فرایند توسط روابط (1) و (2) محاسبه شده است.

$$(1) \quad \text{چگالی توان لیزر} \left( \frac{W}{mm^2} \right) = \frac{\text{توان اعمالی (وات)}}{\text{اندازه اثر لیزر (میلی متر مربع)}}$$

$$(2) \quad \text{گرمای ورودی} \left( \frac{J}{mm} \right) = \frac{\text{توان اعمالی (وات)}}{\text{سرعت روبش سطح (میلی متر بر ثانیه)}}$$

بعد از فرایند سختکاری با رعایت فاصله‌ی 15 میلی‌متر از لبه‌های قطعه برای فراهم شدن شرایط پایدار حرارتی [22]، منطقه‌ی سختکاری شده توسط برش باسیم جدا شد. برای بررسی‌های فازی، ریزساختار و ریز سختی سنجی، سطوح نمونه‌ها توسط روش‌های استاندارد متالوگرافی، یکسان‌سازی سطحی شد. برای بررسی‌های ریزساختاری بعد از صیقل‌کاری سطحی توسط سوسپانسیون حاوی ذرات آلومینا، نمونه‌ها توسط

در تحقیق حاضر سختکاری سطحی فولاد ابزار سرد کار AISI O1 توسط لیزر دیودی توان بالا مورد بررسی قرار گرفته است. اثر پارامترهای توان و سرعت اسکن روی ریزساختار، تحولات فازی، ریز سختی و خواص سایشی مورد بررسی قرار گرفت. مشخصه یابی ریزساختاری، سختی و خواص سایشی به ترتیب توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی، ریز سختی سنجی به روش ویکرز و آزمون سایش پین روی دیسک انجام گردید [21].

## 2- مواد و روش تحقیق

در تحقیق حاضر از فولاد ابزار سرد کار AISI O1 در حالت آنیل استفاده شده است. شرایط اولیه‌ی فولاد، حالت اسفروآیز<sup>1</sup> (کاربیدهای کرومی شده) بوده و دارای سختی 210 ویکرز می‌باشد که ترکیب آلیاژ در جدول 1 گزارش شده و تصویر ریزساختار نمونه‌ی فلز پایه در شکل 1- الف نشان داده شده است. قطعاتی که تحت سختکاری قرار گرفتند دارای ابعاد 100×50×5 میلی‌متر مکعب بودند که از ورق تهیه شده بریده شده است. سطح همه‌ی نمونه‌ها برای یکسان‌سازی سطحی، سنگ‌زنی شده و برای حذف احتمالی آلودگی و چربی توسط محلول الکل و استون، تحت امواج فراصوت قرار گرفتند.

برای پژوهش حاضر از لیزر توان بالای دیودی با بیشینه توان 1600 وات استفاده شده است. فرایند با تزریق گاز محافظ آرگون با دبی 20 لیتر بر دقیقه و زاویه 50 درجه نسبت به محور قائمه انجام گردید. نمایی از دستگاه لیزر نیمه‌هادی مورد استفاده و طرح‌واره‌ی فرایند سختکاری سطحی در شکل 1 و همچنین مشخصات لیزر در جدول 2 گزارش شده است.

در تحقیق حاضر، توان‌های 1200 و 1450 وات و سرعت‌های روبش 1/6 و 2 میلی‌متر بر ثانیه به‌عنوان پارامترهای فرایند انتخاب شده‌اند. برای همه‌ی نمونه‌های سختکاری شده، فاصله‌ی کاری یکسان بوده و برابر 70 میلی‌متر انتخاب شده است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد AISI O1 مورد استفاده در تحقیق حاضر  
Table 1 Chemical composition of AISI O1 steel used in this investigation

عنصر	کربن	سیلیسیم	منگنز	کروم
درصد وزنی	1/02	0/21	1/07	0/67
عنصر	مولیبدن	تنگستن	نیکل	آهن
درصد وزنی	0/14	0/65	0/17	Bal.

<sup>1</sup> Spheroidize

گردید. سرعت گرمایش هر دو سیکل عملیات حرارتی 10 درجه‌ی سانتی‌گراد بر دقیقه بود و از کوره‌ی مقاومتی برای انجام عملیات حرارتی استفاده شد.

### 3- نتایج و بحث

در این تحقیق، سه نمونه تحت سختکاری سطحی قرار گرفتند که جدول 3 پارامترهای فرایند لیزر، عمق و عرض ناحیه‌ی سخت شده، چگالی توان لیزر (طبق معادله‌ی (1)) و میزان گرمای ورودی (طبق معادله‌ی (2)) را برای هر سه نمونه‌ی سختکاری شده نشان می‌دهد. تصاویر درشت ساختاری مناطق سختکاری شده در شکل 2 نشان داده شده است.

جدول 3 پارامترهای فرایند سختکاری و مقادیر عرض و عمق سختکاری شده، چگالی توان لیزر و گرمای ورودی برای نمونه‌های سخت‌کاری شده

Table 3 Parameters of hardening process and values of hardened width and depth, laser power density and heat input for hardened samples			
شماره‌ی نمونه	1	2	3
توان اعمالی (وات)	1450	1200	1450
سرعت اسکن سطح (mm/s)	2	1/6	1/6
فاصله‌ی لیزر از سطح نمونه (mm)	70	70	70
عمق سختکاری شده (mm)	2/17	2/20	2/25
عرض سختکاری شده (mm)	10/40	10/50	11/42
چگالی توان لیزر (W/mm <sup>2</sup> )	32	26/5	32
گرمای ورودی (J/mm)	725	750	906

محلول نایتال 3 درصد حکاکی شدند. بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری OLYMPIUS و میکروسکوپ الکترونی روبشی Quanta مدل FEI مشخصه‌یابی گردید. برای تعیین درصد فاز (درصد سطحی) رسوبات و مارتنزیت و همچنین فاز آستنیت باقی‌مانده از نرم‌افزار آنالیز تصاویر MIP استفاده شد. برای بررسی سختی سنجی نمونه‌ها از روش ریز سختی<sup>1</sup> سنجی به روش ویکرز<sup>2</sup> از دستگاه INNOVA TEST استفاده شده است. سختی سنجی در راستای عمق با رعایت فاصله‌ی 200 میکرومتر بین اثر فرورونده‌ها با بار اعمالی 100 گرم انجام گردید.

آزمون سایش پین روی دیسک بر اساس استاندارد ASTM G99-05 انجام شد [21]. از گلوله‌ی سرامیکی Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> با سختی 1072 ویکرز به‌عنوان پین ساینده استفاده گردید. قطر پین ساینده 1/5 میلی‌متر و اندازه‌ی نمونه‌ها بر اساس عرض منطقه‌ی سخت شده آماده شد. برای همه‌ی نمونه‌ها قطر منطقه‌ی سایش 0/8 میلی‌متر انتخاب شد. قبل از هر آزمون سایش پین و صفحه مورد سایش در محلول الکل و استون به‌وسیله‌ی امواج فراصوت شسته شدند. جرم صفحه قبل و بعد از آزمون سایش توسط ترازوی A&D مدل N92 با دقت 0/1 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. آزمون سایش با نیروی 10N سرعت زاویه‌ای 700rpm معادل سرعت خطی 0/3 متر بر ثانیه انجام پذیرفت و 1000 متر در مدت 66 دقیقه طی شد. نیروی اصطکاک در طی مسیر به کمک نیروسنج الکترونیکی اندازه‌گیری و به ازای هر 0/77 ثانیه یک داده توسط رایانه ثبت گردید.

بعد از هر آزمون سایش، صفحه‌ها در محلول الکل و استون به‌وسیله‌ی آلتراسونیک شسته شدند و کاهش جرم آن‌ها اندازه‌گیری شد. میزان سایش نیز بر اساس رابطه (3) محاسبه شد.

$$Volume\ loss, mm^3 = \frac{mass\ loss(g)}{density(\frac{g}{cm^3})} \times 1000. \quad (3)$$

برای مشخص شدن میزان بهبود خواص سایشی نمونه‌های سختکاری شده توسط لیزر، نمونه‌های آنیل شده و سختکاری در روغن و بازپخت نیز مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه‌ی آنیل از فولاد پایه تهیه شد و نمونه‌ی سختکاری در روغن به این صورت آماده شد که ابتدا سیکل عملیات حرارتی آستنیت‌ه کردن در دمای 810 درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت 30 دقیقه انجام گرفت و سپس در روغن 60 درجه‌ی سانتی‌گراد سختکاری شد و در دمای 450 درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت 1/5 ساعت بازپخت

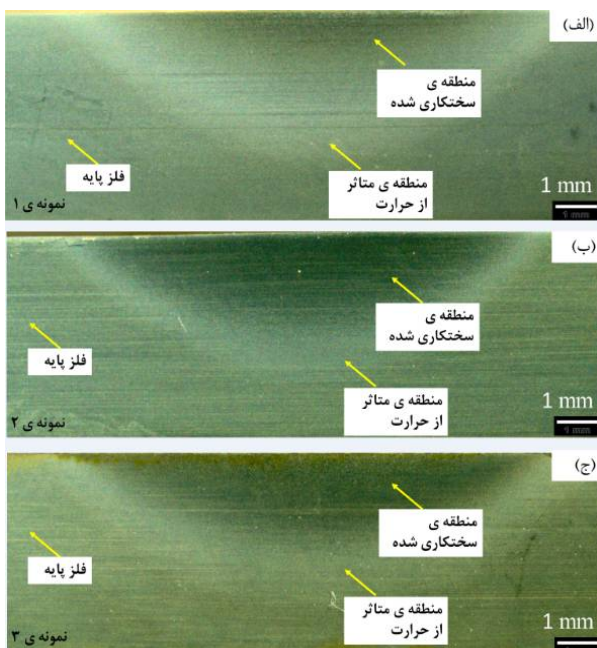


Fig. 2 Hardened area geometry for all three samples 1, 2 and 3

شکل 2 هندسه‌ی منطقه‌ی سختکاری شده برای هر سه نمونه‌ی 1، 2 و 3

<sup>1</sup> Microhardness  
<sup>2</sup> Vickers



سختکاری سطحی فولاد ICD-5 توسط لیزر فیبری [23] و سختکاری سطحی فولاد ابزار AISI H13 توسط لیزر دیودی توان بالا [24] گزارش شده است.

برای بررسی‌های ریزساختاری فرایند سختکاری، ریزساختار ناحیه‌ی سختکاری شده توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مطالعه شد که شکل 4 ریزساختار هر سه نمونه را بعد از فرایند سختکاری نشان می‌دهد. از تصاویر میکروسکوپ نوری (شکل‌های 4- الف، 4- ج و 4- ه) ساختار دوفازی مارتنزیت (مناطق تیره) و آستنیت باقی‌مانده (فاز روشن) قابل تشخیص است. بررسی‌های دقیق‌تر توسط میکروسکوپ الکترونی، جزئیات بیشتری از ساختار را نشان داد. برای نمونه‌های 1 و 2 ساختار ایجاد شده دارای اندازه‌های توده‌های فاز آستنیت کوچک‌تر است و رسوبات کاربیدی نیز در ساختار این دو نمونه مشاهده می‌شود که در شکل‌های 4- ب و 4- ج با فلش‌های زرد رنگ نشان داده شده‌اند. با مقایسه‌ی شکل‌های 4- ه و 4- و که مربوط به ریزساختار نمونه‌ی 3 می‌باشد با شکل‌های 4- ب و 4- ج، درصد فازهای روشن که مشخص‌کننده‌ی فاز آستنیت است، بیشتر می‌باشد و با توجه به شکل 4- و برای نمونه‌ی 3 فاز کاربیدی مشاهده نمی‌شود. بر اساس محاسبات درصد فازی از آنالیز تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی، درصد فاز آستنیت برای نمونه‌های 1، 2 و 3 به ترتیب 32، 29 و 37 درصد محاسبه گردید.

فولاد AISI O1 فولاد ابزار کار سرد با 1 درصد کربن است و در حالت آنیل شده، دارای ریزساختار زمینه‌ی فریت و رسوبات کاربیدی است [6]. فازهای کاربیدی به‌عنوان منبع اصلی ذخیره‌ی عنصر کربن هستند و می‌توانند روی خواص نهایی آلیاژ اثرگذار باشند. در فرایند آستنیت‌کردن و سرمایش در روغن، دما و زمان آستنیت‌کردن به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که فازهای کاربیدی در زمینه انحلال یابند و ساختار همگن فاز آستنیت در دمای بالا ایجاد شود [2] ولی با توجه به گرمایش سریع در فرایند سختکاری سطحی توسط لیزر، امکان همگن بودن ساختار فاز آستنیت وجود ندارد و برای انحلال کامل فازهای رسوبی، نیاز است تا توان‌های بالای لیزر مورد استفاده قرار گیرد یا زمان رویش سطح کاهش یابد [25] که هر دو عامل منجر به افزایش گرمای ورودی می‌شوند. همان‌طور که از شکل 4 مشخص شد، برای هر دو نمونه‌ی 1 و 2 در ساختار منطقه‌ی سختکاری شده، رسوبات کاربیدی مشاهده می‌شود ولی برای نمونه‌ی 3، فاز کاربیدی قابل مشاهده نبود. بر اساس محاسبات گرمای ورودی (جدول 3) می‌توان متوجه شد که برای مقادیر پایین گرمای

از مقاطع نمونه‌های سختکاری شده مشخص گردید که فرایند سختکاری بدون ایجاد منطقه‌ی ذوبی انجام گردیده است. ایجاد ناحیه‌ی ذوبی در منطقه‌ی سختکاری شده در بعضی موارد که کیفیت سطحی حائز اهمیت می‌باشد و نمونه‌ی سختکاری دارای کاربردهای نظیر ابزار برش می‌باشد از اهمیت زیادی برخوردار است چون برای ابزار برش وجود لبه‌های تیز با سختی بالا مهم‌ترین معیار می‌باشد و ایجاد منطقه‌ی ذوب شده می‌تواند تیزی لبه‌ی برش را از بین برده و کارکرد نمونه را با مشکل مواجه کند. در این تحقیق در هر سه پارامتر انتخابی، فرایند بدون ایجاد ذوب سطحی بوده و با توجه به کاربردهای فولاد AISI O1 که به‌عنوان فولاد ابزار مورد استفاده قرار می‌گیرد [6]، حالت مطلوب سختکاری سطحی در پارامترهای انتخابی ایجاد شده است.

در این تحقیق پارامتر فاصله‌ی لیزر از سطح نمونه به‌عنوان پارامتر ثابت و پارامترهای سرعت رویش سطح و توان اعمالی نیز به‌عنوان متغیرهای آزمون در نظر گرفته شد، از این‌رو انتخاب معیار گرمای ورودی که مستقل از فاصله‌ی لیزر از سطح نمونه است و اثر هر دو پارامتر توان و سرعت رویش رو مشخص می‌کند برای بررسی اثر پارامترها، مورد بررسی قرار گرفت. شکل 3 تأثیر گرمای ورودی روی عمق و عرض منطقه‌ی سختکاری شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل 3 مشاهده می‌شود، با افزایش میزان گرمای ورودی، مقادیر عرض و عمق سختکاری شده به علت افزایش نفوذ حرارتی به نمونه و به تبع آن ایجاد فاز آستنیت در منطقه‌ی وسیع‌تر، افزایش یافته است.

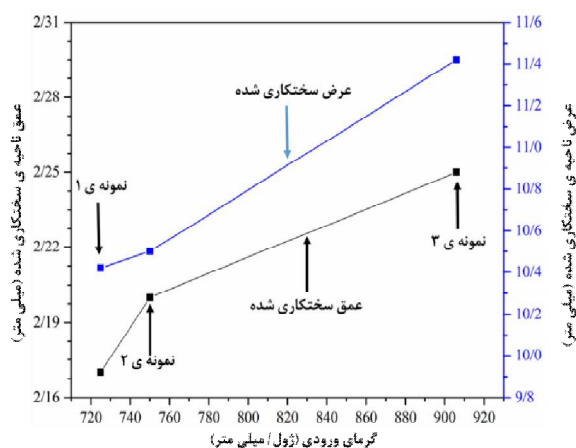


Fig. 3 Hardened area geometry for all three samples 1, 2 and 3

شکل 3 هندسه‌ی منطقه‌ی سختکاری شده برای هر سه نمونه‌ی 1، 2 و 3

در بیشتر تحقیقات روند مشابهی در رابطه با افزایش گرمای ورودی و افزایش عمق و عرض منطقه‌ی سختکاری شده در

که گرمایش نیافته است به‌عنوان عامل سردکننده منطقه‌ی آستنیت‌ده شده عمل می‌کند و برای نمونه‌ی 3 چون گرمای ورودی بیشتر بوده است، مقدار ماده‌ی موجود برای ایجاد سردکنندگی کمتر از نمونه‌های 1 و 2 بوده و همین امر باعث کاهش شیب حرارتی می‌شود و سرعت گرمایش کم می‌شود که منجر به ایجاد ساختار درشت‌تری برای نمونه‌ی 3 گردیده است.

شکل 5 نتایج آزمون ریز سختی سنجی نمونه‌های سختکاری شده را نشان می‌دهد. مقادیر سختی دارای سه ناحیه متمایز می‌باشد. تا فاصله‌ی 2000 میکرومتر (2 میلی‌متر) سختی در مقادیر بالای 500 ویکرز می‌باشد ولی بعد از این فاصله مقادیر سختی به‌شدت کاهش پیدا می‌کند و در قسمت آخر نیز سختی همه‌ی نمونه‌ها به یک مقدار ثابت می‌رسد. می‌توان گفت که تا فاصله‌ی 2 میلی‌متر، منطقه مربوط به ناحیه‌ی سختکاری شده است و بعد از فاصله‌ی 2 میلی‌متر به‌طور کلی ناحیه‌ی متأثر از حرارت ایجاد می‌شود و مقادیر سختی کاهش می‌یابد و قسمت آخر که سختی همه‌ی نمونه‌ها یکسان است، مربوط به ناحیه‌ی فلز پایه است. از شکل می‌توان متوجه شد که نمونه‌ی 3 (خط مشکی با الگوی مربع) در مقایسه با نمونه‌ی 1 و 2 (خطوط قرمز و آبی) دارای مقادیر سختی پایینی است ولی روند سختی نمونه‌ی 3 در منطقه‌ی متأثر از حرارت تغییر می‌کند و مقادیر سختی نمونه‌ی 3 در ناحیه‌ی متأثر از حرارت بیشتر از نمونه‌های 1 و 2 می‌باشد.

برای مقایسه‌ی بهتر، مقادیر متوسط سختی در نواحی سختکاری شده و متأثر از حرارت در شکل 6، برای هر سه نمونه خلاصه‌شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، بیشترین سختی منطقه‌ی سختکاری شده برای نمونه‌ی 1 (762 ویکرز) و کمترین سختی نیز مربوط به نمونه‌ی 3 (654 ویکرز) می‌باشد.

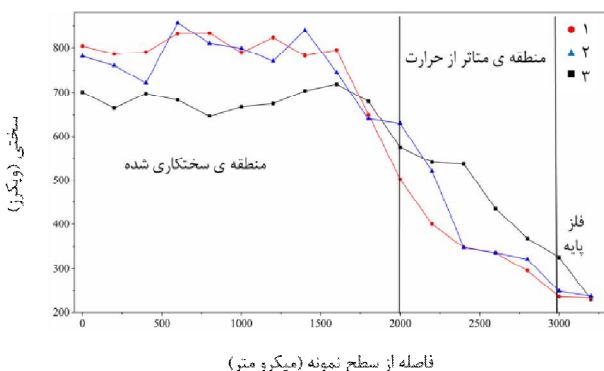


Fig. 5 Microhardness profile of hardened samples in the direction of the depth of the samples in terms of distance from the hardened surface

شکل 5 پروفیل ریز سختی سنجی نمونه‌های سختکاری شده در راستای عمق نمونه‌ها برحسب فاصله از سطح سختکاری شده

ورودی که مربوط به نمونه‌های 1 و 2 می‌باشد (به ترتیب 725 و 750 ژول بر میلی‌متر)، رسوبات کاربیدی به‌طور کامل انحلال نیافته‌اند (شکل 4-ب و 4-د) ولی برای نمونه‌ی 3 که دارای بالاترین گرمای ورودی بوده (906 ژول بر میلی‌متر) کل رسوبات در ساختار حل شده است. می‌توان ادعا کرد که بین درصد فاز آستنیت باقی‌مانده، گرمای ورودی و انحلال رسوبات کاربید رابطه وجود دارد به‌گونه‌ای که مقادیر بالای گرمای ورودی، باعث انحلال رسوبات می‌شود و چون رسوبات منبع غنی از عنصر کربن هستند و عنصر کربن عنصر پایدارکننده‌ی فاز آستنیت است، باعث افزایش درصد آستنیت باقی‌مانده شده است. در رابطه با اثر گرمای ورودی و اندازه‌ی توده‌های فاز آستنیت و تیغه‌های (لایه‌ها) فاز مارتنزیت نیز می‌توان گفت که گرمای ورودی بالا باعث رشد توده‌های آستنیت و تیغه‌ها (لایه‌ها) فاز مارتنزیت می‌شود که علت آن می‌تواند در سرعت گرمایش نمونه باشد.

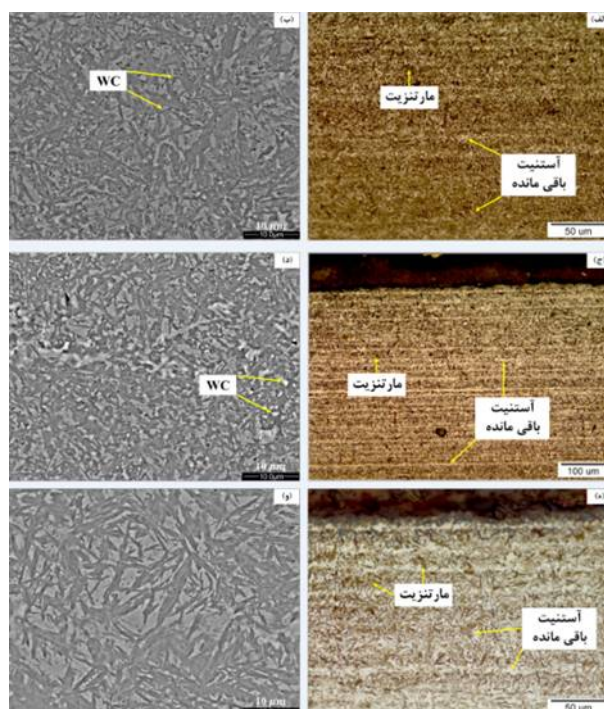
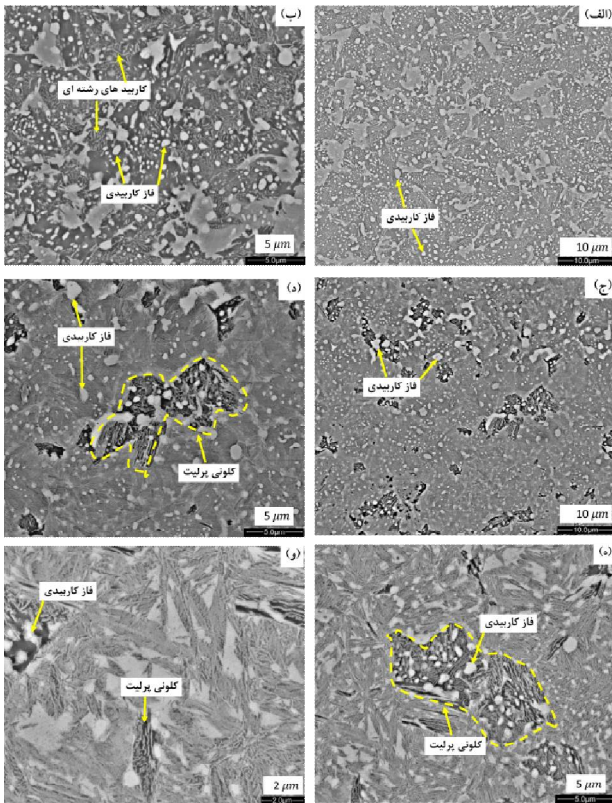


Fig. 4 Microstructure of the hardened area for all three samples. Images a, c, e are related to optical mineralogy and b, d and are related to electron microscopy. a) and b) sample 1, c) and d) sample 2 and e) and f) sample 3

شکل 4 ریزساختار ناحیه‌ی سختکاری شده برای هر سه نمونه. تصاویر (الف)، (ج)، (ه) مربوط به میکروسکوپ نوری و (ب)، (د)، (و) نیز مربوط به میکروسکوپ الکترونی. (الف) و (ب) نمونه‌ی 1، (ج) و (د) نمونه‌ی 2 و (و) نمونه‌ی 3

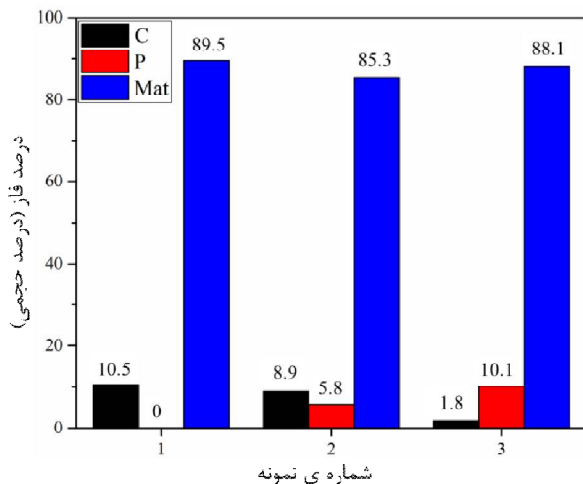
با افزایش گرمای ورودی، حجم بالایی از ماده گرم می‌شود و چون عامل سردکننده‌ی خارجی وجود ندارد، بقیه‌ی حجم ماده

منطقه‌ی سختکاری شده باشد.



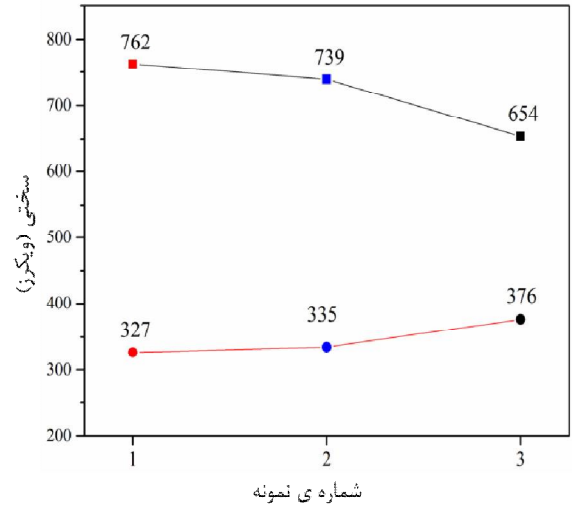
**Fig. 7** Microstructure of the heat affected area for hardened samples. a) and b) sample number 1, c) and d) sample number 2, e) and f) sample number 3. The areas marked with the box are most likely perlite colonies.

شکل 7 ریزساختار ناحیه‌ی متأثر از حرارت برای نمونه‌های سختکاری شده. (الف) و (ب) نمونه‌ی شماره 1، (ج) و (د) نمونه‌ی شماره 2، (ه) و (و) نمونه‌ی شماره 3. مناطق مشخص شده با کادر به احتمال قوی کلونی‌های پرلیت هستند.



**Fig. 8** Phase percentage of heat affected area for hardened specimens. The expressions C, P and Mat denote the carbides, perlite and matrix phase, respectively.

شکل 8 درصد فازی ناحیه‌ی متأثر از حرارت برای نمونه‌های سختکاری شده. عبارات C, P و Mat به ترتیب مشخص کننده‌ی فازهای کاربید، پرلیت و فاز زمینه هستند



**Fig. 6** Average values of hardness of hardened and heat affected areas for hardened specimens

شکل 6 میانگین مقادیر سختی مناطق سختکاری شده و متأثر از حرارت برای نمونه‌های سختکاری شده

برای منطقه‌ی متأثر از حرارت مقادیر سختی روند متفاوتی دارند و نمونه‌ی 3 دارای بالاترین سختی (376 ویکرز) می‌باشد. برای سختی منطقه‌ی سختکاری شده، تفاوت در مقادیر سختی را می‌توان به ریزساختار این ناحیه مرتبط کرد به گونه‌ای که برای نمونه‌ای که دارای بالاترین گرمای ورودی بوده (نمونه‌ی 3) بیشترین درصد آستنیت باقی‌مانده ایجاد شده و به علت شیب حرارتی کمتر، ساختار درشت‌تر مارتنزیت ایجاد شده است و منجر شده تا نمونه‌ی 3 دارای کمترین مقدار سختی باشد [24]. ولی برای نمونه‌های 1 و 2 که دارای مقادیر گرمای ورودی کمتر بودند، مقادیر سختی ناحیه‌ی سختکاری شده در مقایسه با نمونه‌ی 3 بالا است و علت آن درصد کمتر فاز آستنیت باقی‌مانده برای نمونه‌های 1 و 2 و مهتر از آن ایجاد ساختار مارتنزیتی ریز تر در مقایسه با نمونه‌ی 3 است که علت آن بالا بودن شیب حرارتی و سرعت سرمایش بیشتر در نمونه‌های 1 و 2 بوده است که باعث ایجاد ساختار ریز مارتنزیت در مقایسه با نمونه‌ی 3 شده که همین امر باعث افزایش سختی نمونه‌های 1 و 2 در مقایسه با نمونه‌ی 3 گردیده است.

برای بررسی‌های بیشتر ناحیه‌ی متأثر از حرارت، ریزساختار این منطقه برای هر سه نمونه مورد بررسی قرار گرفت. شکل 7 ریزساختار ناحیه‌ی متأثر از حرارت نمونه‌های سختکاری شده را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه فاصله‌ی ناحیه‌ی متأثر از حرارت از سطح گرمایش یافته زیادتر از منطقه‌ی سختکاری است، نفوذ حرارت به این منطقه نیز کمتر خواهد بود و همین دلیلی شده تا در ساختار ناحیه‌ی متأثر از حرارت، درصد فازهای کاربیدی که در شکل 8 برای هر سه نمونه محاسبه شده است، زیادتر از



میلی‌متر مکعب بوده است ولی برای نمونه‌های 1، 2 و 3 به ترتیب برابر 0/076، 0/038 و 0/050 بود. فرایند سختکاری منجر به بهبود مقاومت به سایش آلیاژ AISI O1 شده است و این افزایش مقاومت برای نمونه‌ی شماره‌ی 2، 10 برابر بیشتر از نمونه‌ی آنیل شده بود.

برای نمونه‌ی 2، کمترین میزان کاهش حجم طی آزمون سایش اتفاق افتاده است و کمترین مقاومت به سایش را در بین نمونه‌های سختکاری شده، نمونه‌ی 1 دارد. نمونه‌ی 3 نیز مقاومت به سایش کمتری از نمونه‌ی 2 دارد. بر اساس کار پلیزاری و د فلورا [26] فرایند سایش منجر به تغییر فاز آستنیت به مارتنزیت می‌شود که نیروی محرکه این تغییر فاز، ناشی از کرنش است که با عنوان فرایند استحاله‌ی ناشی از پلاستیسیته<sup>1</sup> شناخته می‌شود. برای نمونه‌های سختکاری شده، فاز آستنیت در ساختار منطقه‌ی سختکاری شده وجود داشت و ممکن است فاز آستنیت حین آزمون سایش به فاز مارتنزیت استحاله کند و همین عامل باعث بهبود خواص سایشی نمونه‌های سختکاری شده در مقایسه با نمونه‌ی بازپختی گردد. ولی برای نمونه‌های سختکاری شده، نمونه‌ی 2 با توجه به ساختار متفاوتی که در منطقه‌ی سختکاری شده داشت که ترکیبی از فازهای مارتنزیت، آستنیت و کاربید بود، این ساختار داری پتانسیل بالایی برای افزایش مقاومت به سایش بوده است چون ترکیب فازهای نرم (آستنیت) و فاز سخت (مارتنزیت و کاربید) دارای پتانسیل بالایی در مقابل عامل سایشی است [27] که به احتمال قوی همین عامل اصلی بالا بودن مقاومت به سایش نمونه‌ی 2 بوده است ولی برای مشخص شدن مکانیسم اصلی مقاومت به سایش به مطالعات فازی و ریزساختاری بیشتر و دقیق‌تری نیاز است تا دلیل اصلی بالا بودن مقاومت به سایش نمونه‌ی 2 در مقایسه با نمونه‌های 1 و 3 مشخص شود.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این مقاله سختکاری سطحی فولاد ابزار AISI O1 توسط لیزر دیودی توان بالا مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید.

- فرایند سختکاری سطحی توسط لیزر دیودی بدون ایجاد ذوب سطحی منجر به ایجاد عمق سخت کاری شده و عرض سخت کاری شده در حدود 2 و 10 میلی‌متر گردید.
- ساختار منطقه‌ی سختکاری شده دارای فازهای مارتنزیت،

می‌توان درصد فازهای کاربیدی و مساحت کلونی‌های پرلیت که در شکل 7 مشخص شده است را به‌عنوان معیاری برای میزان آستنیت ایجاد شده در فرایند گرمایش در نظر گرفت. برای نمونه‌ای که کمترین درصد فاز کاربیدی را در ناحیه‌ی متأثر از حرارت دارد، به علت افزایش دما و انحلال رسوبات، درصد فاز با سختی بالا (پرلیت و احتمالاً مارتنزیت)، بالا خواهد بود و برای نمونه‌ای که دارای درصد بالای فاز کاربیدی در ناحیه‌ی سختکاری شده است، میزان آستنیت ایجاد شده در حین گرمایش کمتر بوده و درصد فاز با سختی بالا نیز کمتر است.

مقایسه‌ی خواص سایشی نمونه‌های سختکاری شده برای مقایسه‌ی فرایند سختکاری شده توسط لیزر با فرایند معمول سختکاری فولاد ابزار کار سرد AISI O1 انجام گردید. مقدار سختی نمونه‌ی بازپخت شده برابر 650 ویکرز بود که در محدوده‌ی سختی نمونه‌های سختکاری شده است. شکل 9 مقادیر کاهش حجم نمونه‌های سختکاری سطحی شده، نمونه‌ی آنیل شده و نمونه‌ی بازپخت شده را نشان می‌دهد. کمترین میزان مقاومت به سایش برای نمونه‌ی آنیل شده است که میزان کاهش حجم برای این نمونه برابر 0/38 میلی‌متر مکعب بوده است.

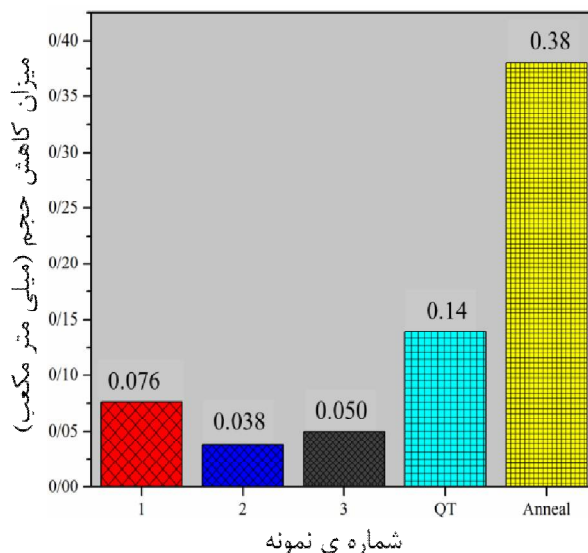


Fig. 9 a) Volume loss amount of samples during wear test and b) Coefficient of friction values of samples

شکل 9 الف) کاهش حجم نمونه‌ها بعد از فرایند سایش و ب) مقادیر ضریب اصطکاک نمونه‌ها

هر سه نمونه‌ی سختکاری سطحی شده از نمونه‌های آنیل و بازپخت شده، مقاومت به سایش بالاتری داشته‌اند به‌گونه‌ای که مقادیر کاهش حجم برای نمونه‌ی بازپخت شده برابر 0/14

<sup>1</sup> Transformation-Induced Plasticity (TRIP)



- [15] M. Šebek, L. Falat, F. Kováč, I. Petryshynets, P. Horňák, V. Girman, The Effects of Laser Surface Hardening on Microstructural Characteristics and Wear Resistance of AISI H11 Hot Work Tool Steel, *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 62, 2017.
- [16] B. S. Yilbas, I.-H. Toor, J. Malik, F. Patel, Laser gas assisted treatment of AISI H12 tool steel and corrosion properties, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 54, pp. 8–13, 2014.
- [17] Z. Zhang, P. Lin, H. Zhou, L. Ren, Microstructure, hardness, and thermal fatigue behavior of H21 steel processed by laser surface remelting, *Applied Surface Science*, Vol. 276, pp. 62–67, 2013.
- [18] H. Bande, G. L'Espérance, M. U. Islam, A. K. Koul, Laser surface hardening of AISI O1 tool steel and its microstructure, *Materials Science and Technology*, Vol. 7, pp. 452–457, 1991.
- [19] M. Hua, T. Shao, Y. Tam Hong, E. Cheung Hon Man, Influence of pulse duration on the surface morphology of ASSAB DF-2 (AISI-01) cold work steel treated by YAG laser, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 185, pp. 127–136, 2004.
- [20] E. Kennedy, G. Byrne, D. N. N. Collins, A review of the use of high power diode lasers in surface hardening, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 155–156, pp. 1855–1860, 2004.
- [21] ASTM Standard G99-05, *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.
- [22] T. Mioković, V. Schulze, O. Vöhringer, D. Löhe, Prediction of phase transformations during laser surface hardening of AISI 4140 including the effects of inhomogeneous austenite formation, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 435, pp. 547–555, 2006.
- [23] M. H. Ameri, F. M. Ghaini, M. J. Torkamany, Investigation into the efficiency of a fiber laser in surface hardening of ICD-5 tool steel, *Optics & Laser Technology*, Vol. 107, pp. 150–157, 2018.
- [24] G. Telasang, J. D. Majumdar, G. Padmanabham, I. Manna, Structure-property correlation in laser surface treated AISI H13 tool steel for improved mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 599, pp. 255–267, 2014.
- [25] L. Orazi, A. Fortunato, G. Cuccolini, G. Tani, An efficient model for laser surface hardening of hypoeutectoid steels, *Applied Surface Science*, Vol. 256, pp. 1913–1919, 2010.
- [26] M. Pellizzari, M. G. De Flora, Influence of laser hardening on the tribological properties of forged steel for hot rolls, *Wear*, Vol. 271, pp. 2402–2411, 2011.
- [27] R. Mariappan, P. K. Kumar, S. Jayavelu, G. Dharmalingam, M. A. Prasad, A. Stalin, Wear properties of P/M duplex stainless steels developed from 316L and 430L powders, *International Journal of ChemTech Research*, Vol. 8, pp. 109–115, 2015.
- آستنیست و کاربید بود و با افزایش گرمای ورودی، عمق و عرض منطقه‌ی سختکاری شده و همچنین درصد فاز آستنیست منطقه‌ی سخت کاری شده افزایش یافت.
- برای پارامترهای مختلف سخت کاری، برای منطقه‌ی سخت شده سختی در محدوده‌ی 762 تا 654 ویکرز و برای منطقه‌ی متأثر از حرارت در محدوده‌ی 327 تا 376 حاصل شد.
- انجام فرایند سختکاری سطحی توسط لیزر دیودی منجر به بهبود خواص سایشی فولاد AISI O1 در مقایسه با نمونه‌ی آنیل شده و نمونه‌ی سرمایش سریع و بازپخت شد.

## 5- مراجع

- [1] J. C. Ion, Laser transformation hardening, *Surface Engineering*, Vol. 18, pp. 14–31, 2002.
- [2] G. Krauss, *Steels: heat treatment and processing principles*. pp. 427–467 ASM international Materials Park, OH, 1989.
- [3] A. Nath and S. Sarkar, Laser Transformation Hardening of Steel, in *Advances in Laser Materials Processing (Second Edition)*, pp. 257–298, 2018.
- [4] W. M. Steen, J. Mazumder, Laser material processing. springer science & business media, 2010.
- [5] L. Li, The advances, characteristics of high-power diode laser materials processing, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 34, pp. 231–253, 2000.
- [6] R. A. Mesquita, *Tool Steels: Properties and Performance*. CRC Press, 2016.
- [7] W. F. Smith, *Structure and properties of engineering alloys*. McGraw-Hill, 1993.
- [8] G. A. Roberts, G. Krauss, R. Kennedy, G. Krauss, *Tool steels*. ASM international, 1998.
- [9] L. Bourithis, G. D. Papadimitriou, J. Sideris, Comparison of wear properties of tool steels AISI D2 and O1 with the same hardness, *Tribology International*, Vol. 39, pp. 479–489, 2006.
- [10] A. K. Nath and S. Sarkar, *Chapter 11 – Laser Transformation Hardening of Steel*, Second Edi. Elsevier Ltd., 2018.
- [11] J.-H. Lee, J.-H. Jang, B.-D. Joo, Y.-M. Son, Y.-H. Moon, Laser surface hardening of AISI H13 tool steel, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 19, pp. 917–920, 2009.
- [12] Z. Zhang, P. Lin, H. Zhou, L. Ren, Microstructure, hardness, and thermal fatigue behavior of H21 steel processed by laser surface remelting, *Applied Surface Science*, Vol. 276, pp. 62–67, 2013.
- [13] B. S. S. Yilbas, I.-H. Toor, J. Malik, F. Patel, Laser gas assisted treatment of AISI H12 tool steel and corrosion properties, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 54, pp. 8–13, 2014.
- [14] G. Telasang, J. Dutta Majumdar, G. Padmanabham, I. Manna, Structure–property correlation in laser surface treated AISI H13 tool steel for improved mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 599, pp. 255–267, 2014.