



نشریه علوم و مهندسی سطح

بررسی تأثیر عملیات مکانیکی سطحی بر ریزساختار و ریزسختی میلگرد فولاد کم کربن

محمد جواد آزادی^{۱*}، رضوان اسدی نژاد^۲

۱. دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده

واژگان کلیدی:

تغییر شکل مومسان شدید سطحی به کمک عملیات مکانیکی سطحی، منجر به بهبود خواص مکانیکی سطح مواد از طریق ایجاد نانو ساختار در نواحی سطحی و زیرسطحی فلزات می شود. هدف از این پژوهش، انجام فرایند مکانیکی سطح روی قطعات استوانه‌ای به منظور کاهش اندازه دانه و بهبود خواص مکانیکی در سطح است. به همین دلیل، فرایند تغییر شکل مکانیکی سطحی روی میلگردی از جنس فولاد ساده کربنی به قطر ۱۲ میلی‌متر به مدت ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه با دو شدت متوسط و زیاد با دو ضربه‌زن فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ و پیچ ۱۲،۹ با سختی متفاوت، انجام شد. مطالعات ریزساختاری نشان می‌دهد که پس از عملیات مکانیکی، در سطح و نواحی زیرسطحی تغییر شکل مومسان شدیدی رخ داده است. عمق اثر با تغییر متغیرهای مختلف، به ۴۰ میکرومتر می‌رسد. انجام عملیات مکانیکی سطحی با شدت زیاد منجر به کاهش عمق اثر در مقایسه با شدت متوسط می‌شود. همچنین مشاهده شد که با افزایش سختی ضربه‌زن، عمق اثر افزایش می‌یابد. نتایج سختی‌سنجی مشخص کردند که پس از عملیات مکانیکی سطح، بیشینه سختی در نمونه‌ها از ۲۸۰ ویکرز، به ۳۵۰ ویکرز می‌رسد.

عملیات مکانیکی سطح
تغییر شکل مومسان شدید
سطحی
میلگرد فولاد ساده کربنی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۱۲

DOI: 10.22034/ISSST.2025.2052224.1639

Investigation of the effect of surface mechanical treatment on the microstructure and microhardness of low-carbon steel rebar

Abstract

Severe surface plastic deformation through mechanical surface treatment leads to the enhancement of mechanical properties by forming nanostructures in the surface and subsurface areas of metals. This research is designed to perform the mechanical surface process on cylindrical specimens for reduction of grain size to improve the surface mechanical properties. In this respect, a 12-mm-diameter steel rebar was mechanically surface deformed for 15, 30, and 60 minutes under two medium and high intensity levels. With two impact pistons of different hardness, one crafted from stainless steel grade 304 and the other as bolt 12.9. The microstructural studies show that after the mechanical treatment, severe plastic deformation occurred in the surface and subsurface areas. The depth of effect, which varies for different parameters, reaches up to 40 micrometers. With the increase in the intensity of mechanical surface treatment the depth of the effect decreases. It was also observed that an increase in the hardness of the impact piston leads to a greater depth of effect. The hardness measurements on the samples after mechanical surface treatment showed an increase in maximum hardness from 280 to 350 Vickers.

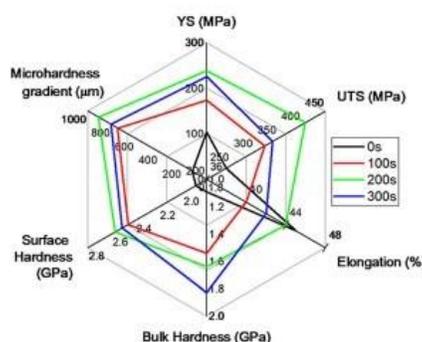
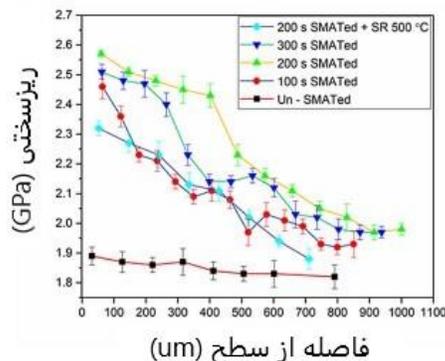
Keywords: Surface mechanical treatment, Severe surface plastic deformation, Low-carbon steel rebar.

* Corresponding author E-mail: mohamadjavadaadirenani@gmail.com

۱- مقدمه

که به نظر می‌رسد تشکیل نوارهای (باند) لغزشی را نشان می‌دهد که احتمالاً توسط تغییر شکل مومسان شدید ناشی از برخوردها ایجاد شده است [۲۴]. همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش فاصله از سطح، چگالی دوقلوبی‌ها و چگالی نابجایی کل کاهش می‌یابد (شکل ۳) [۲۹]. همچنین، با توجه به افزایش فاصله از سطح و افزایش اندازه دانه‌ها و کاهش نواقص بلوری، سختی نیز کاهش می‌یابد [۲۰، ۲] (شکل ۱).

یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود خواص سطحی، نانوبلورینه‌نمودن سطحی (SNC^۱) است. در روش‌های مختلف نانوبلورینه‌نمودن سطحی، یک لایه جدید در مقیاس نانو روی سطح ماده تشکیل می‌شود که این لایه از سطح مواد محافظت می‌نماید و به‌طور قابل توجهی سختی، مقاومت به سایش و خستگی را بهبود می‌بخشد [۱، ۲].



عملیات مکانیکی سطحی (SMAT^۲), یکی از روش‌های تغییر شکل مومسان شدید موضعی است که منجر به اصلاح دانه‌ها در مقیاس نانومتری بدون تغییر در ترکیب شیمیایی می‌شود [۳، ۴]. با توجه به پژوهش‌هایی که محققان روی فلزات خالص و آلیاژهای مختلفی از جمله، انواع فولادها [۵]، آلومینیوم [۶، ۷]، مس [۷، ۸]، تیتانیم [۹-۱۱]، منیزیم [۳، ۱۲]، [۱۳] انجام داده‌اند، مشخص شده‌است که عملیات سایش مکانیکی سطح به دلیل ایجاد یک لایه نانوساختار، انباشت نواقص بلوری مثل نابجایی و دوقلوبی و ایجاد استحاله فازی تبدیل آستنیت به مارتنزیت در سطح مواد، منجر به بهبود خواص مکانیکی سطح از جمله، افزایش استحکام تسلیم [۱۴]، استحکام کششی [۱۵] (شکل ۱)، افزایش سختی [۱۶-۲۰] (شکل ۱)، افزایش مقاومت به سایش [۲۱، ۲۲]، افزایش مقاومت به خوردگی [۲۳] و اکسیداسیون [۲۴] افزایش استحکام خستگی [۲۵-۲۷]، آلیاژ و افزایش ترشوندگی [۲۸] سطح فلز می‌شود.

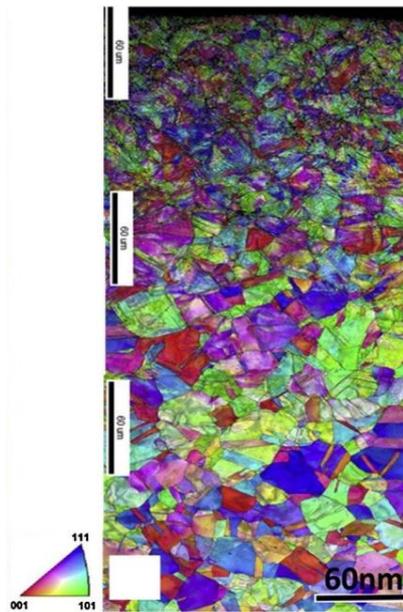
شکل ۱. شکل بالایی: نمودار ریزسختی فولاد IF^۳ (بینایی) برحسب فاصله از سطح پس از زمان‌های مختلف عملیات سایش مکانیکی سطح. شکل پایینی: نمودار خواص مکانیکی مختلف فولاد IF پس از زمان‌های مختلف عملیات سایش مکانیکی سطح [۲۰]

پس از عملیات مکانیکی سطح یک ریزساختار شیب‌دار در نمونه ایجاد می‌شود. با فاصله گرفتن از سطح، از شدت تغییر شکل مومسان کاسته می‌شود که مطابق با شکل ۱ منجر به افزایش اندازه دانه از سطح به مرکز نمونه می‌شود. علاوه بر این، خطوط تیره‌ای در داخل برخی دانه‌ها ظاهر می‌شوند

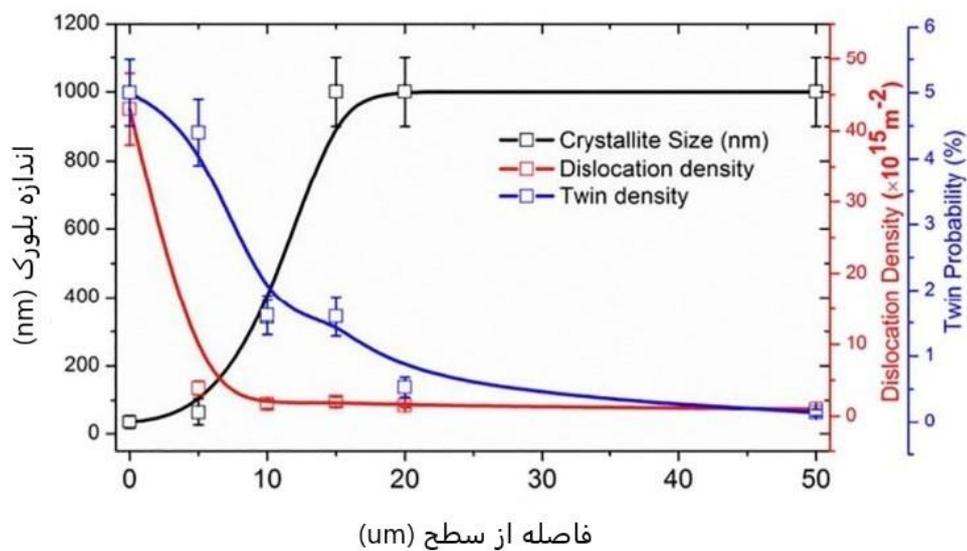
^۳ Interstitial-Free Steel

^۱ Surface Nano Crystallization

^۲ Surface Mechanical Attrition Treatment



شکل ۱. ریزساختار پراش الکترون‌های بازگشتی از سطح مقطع فولاد زنگ‌نزن *AISI316* پس از عملیات سایش مکانیکی سطح [۲۴].



شکل ۲. اندازه بلورک، چگالی نابجایی‌ها و چگالی دوقلوبی‌ها برحسب فاصله از سطح در فولاد $TWIP^1$ (فولاد با شکل‌پذیری ناشی از دوقلوبی) پس از عملیات سایش مکانیکی سطح [۲۹].

¹ Twinning-Induced Plasticity Steel

سطحی آن‌ها بسیار کارآمد و مؤثر باشد در این پژوهش از دستگاهی که در بخش ۲-۲ (شکل ۵) معرفی می‌شود برای انجام عملیات مکانیکی سطحی بر روی میلگردها استفاده شده است. با توجه به مزایای قابل توجه میلگردهای ساده کربنی، که شامل استحکام کششی و انعطاف‌پذیری مناسب، جوش‌پذیری بالا و هزینه‌ی مقرون‌به‌صرفه می‌شود، این مواد به طور گسترده در صناعی همچون ساختمان‌سازی، پل‌سازی، خودروسازی، تولید ابزارآلات، انواع سیم و ماشین‌آلات صنعتی کاربرد دارند. این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر عملیات مکانیکی سطحی بر ریزساختار و ریزسختی میلگردهای فولادی ساده کربنی صورت گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

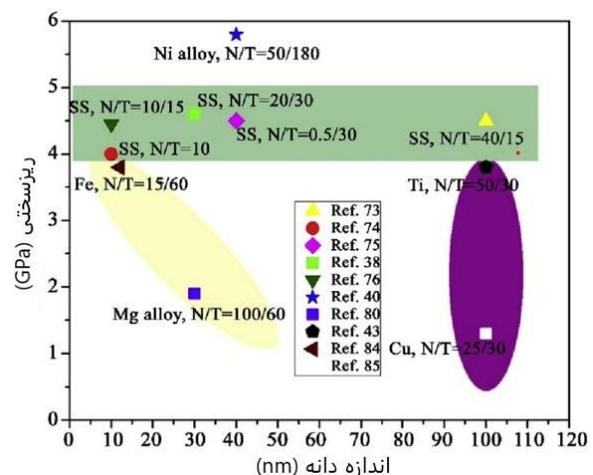
۲-۱ مواد اولیه

در کار حاضر یک میلگرد فولاد ساده کربنی با حدود ۰,۳۶۵ درصد وزنی کربن به قطر ۱۲ میلی‌متر آزمایش شد. ترکیب شیمیایی میلگرد به روش کوانتومتری تعیین شد که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. به منظور بررسی تأثیر جنس ضربه‌زن بر ریزساختار و ریزسختی پس از عملیات مکانیکی سطح، از دو ضربه‌زن به جنس‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ و پیچ ۱۲,۹ استفاده شد. ابزارهای استفاده شده برای اعمال ضربه در این فرایند، به صورت میله با سطح تخت و قطر ۵ میلی‌متر و طول ۵۵ میلی‌متر بود و پس از انجام آزمون ریزسختی مشخص شد که ریزسختی آن‌ها به ترتیب ۱۳۰ و ۴۵۰ ویکرز است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی میلگرد استفاده‌شده در این پژوهش

عنصر	Cr	V	N	P	S	Cu	Si	C	Mn	Fe
درصد	۰/۰۲۰	۰/۰۲۱	۰/۰۳۴	۰/۰۳۴	۰/۰۴۶	۰/۰۶۹	۰/۱۹۰	۰/۳۶۵	۰/۵۱۵	۹۸/۷۱۱
وزنی										

پس از عملیات سایش مکانیکی سطح، میزان تغییرشکل مومسان و تغییرات ریزساختاری و ریزسختی در مواد مختلف، متفاوت است. در شکل ۴ اندازه دانه و ریزسختی سطح فلزات و آلیاژهای مختلف پس از عملیات سایش مکانیکی سطح، آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود اندازه دانه و ریزسختی آهن خالص پس از عملیات سایش مکانیکی سطح به ترتیب، تقریباً ۱۰ نانومتر و ۴ گیگا پاسکال گزارش شده است. همچنین در پژوهش‌های مختلف انجام شده بر روی فولادهای زنگ‌نزن، سختی ۴ الی ۵ گیگاپاسکال و اندازه دانه ۱۰ الی ۱۰۰ نانومتر به دست آمده است.



شکل ۳. خلاصه‌ای از ریزسختی و اندازه دانه‌های به دست آمده در مواد مختلف پس از عملیات سایش مکانیکی سطح، N/T نشان‌دهنده ضخامت لایه نانو ساختار (میکرومتر) بر مدت زمان عملیات (دقیقه) [۱].

یکی از محدودیت‌های بزرگ عملیات سایش مکانیکی سطح این است که از این روش فقط برای مقاطع تخت استفاده می‌شود و با توجه به کاربردهای فراوان میلگردها در صنایع مختلف، انجام عملیات مکانیکی سطحی بر روی آن‌ها می‌تواند در بهبود خواص

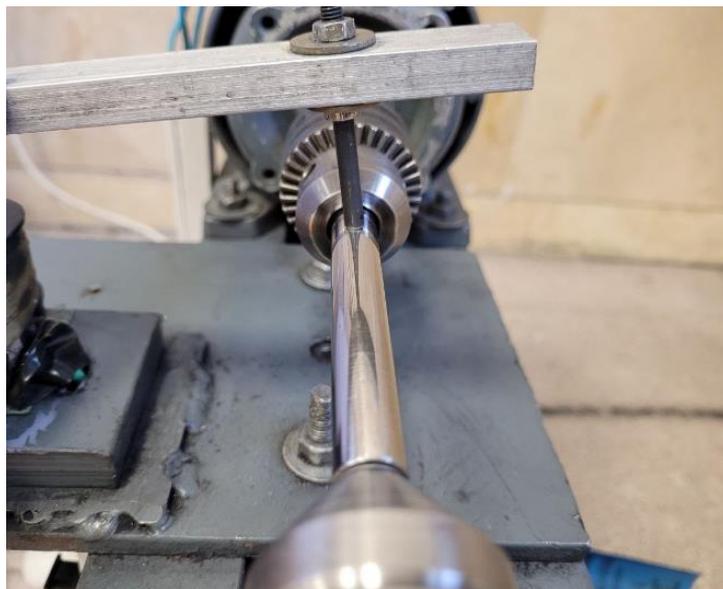
۲-۲ دستگاه عملیات مکانیکی سطح

در این پژوهش از دستگاه ساخته شده در آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه اراک به منظور بررسی تأثیر عملیات مکانیکی سطح بر میلگرد استفاده شد. این دستگاه شامل قسمت‌های مختلفی از جمله تنظیم کننده دور موتور، تنظیم کننده شدت و فرکانس ضربات وارده، مرغک، سه نظام و ضربه زن است که انجام عملیات مکانیکی سطحی برای قطعات استوانه‌ای را امکان پذیر می کند.

متغیرهای مورد مطالعه در دستگاه عبارت‌اند از زمان، سرعت چرخش و شدت ضربه؛ این عوامل بر ریزساختار و خواص مکانیکی سطحی مؤثر هستند. شدت ضربه به وسیله فاصله ضربه زن تا میلگرد کنترل می شود. برای شدت متوسط، فاصله ضربه زن تا میلگرد ۲۰ میلی متر و برای شدت زیاد، این فاصله ۳۰ میلی متر طراحی شده است.

۲-۳ نحوه انجام عملیات مکانیکی سطح روی میلگرد

ابتدا یک سمت میلگرد، مته مرغک زده شد، طوری که در هنگام قراردادن میلگرد در دستگاه، این سمت در مرغک قرارگرفت و سمت دیگر در سه نظام بسته شد. پس از تنظیم فرکانس، زمان و شدت، عملیات مکانیکی سطح شروع شد. سپس به وسیله ضربه زن مطابق شکل ۴ به میلگرد در حال چرخش ضرباتی اعمال شد که منجر به تغییر شکل مومسان شدید در سطح میلگرد شد. میزان تغییر شکل در سطح نمونه به متغیرهای زمان، شدت ضربه، جنس ضربه زن، هندسه ضربه زن و تعداد دور دستگاه وابسته است و با تغییر این متغیرها، میزان تغییر شکل در سطح نیز تغییر می کند. در این فرایند کاهش قطر و وزن نمونه اتفاق نمی افتد.



شکل ۴. دستگاه عملیات مکانیکی سطح برای قطعات مدور.

۲-۴ بررسی های ریزساختاری و ریزسختی

پس از انجام عملیات مکانیکی سطح، میلگرد به کمک تیغ اره در راستای محور میلگرد بریده شد. سپس میلگرد در گیره جابجا شد

تا دو سمت ناحیه‌ی تحت عملیات مکانیکی سطح، در جهت عمود بر محور میلگرد بریده و برای متالوگرافی آماده شود. از آنجا که بررسی ریزساختار در لبه‌ی نمونه انجام می شود، نمونه‌ها مانع سرد شدند. عملیات آماده سازی ابتدا با سنباده‌های ۶۰ تا

برای نام‌گذاری و مشخص کردن نمونه‌ها در نمودارها و جدول‌ها، از علائم اختصاری استفاده شد. در جدول ۲ معادل فارسی کدها و در جدول ۳ شرح مختصری از نمونه‌ها آورده شده است.

جدول ۲. معادل فارسی کدهای استفاده برای نام‌گذاری نمونه

کد	معادل فارسی
MI	شدت ضربه متوسط
HI	شدت ضربه زیاد
HH	ضربه زن سخت‌تر

۳۰۰۰ انجام و سپس نمونه‌ها به وسیله ی پودر آلومینا با اندازه ۰/۳ میکرومتر پرداخت شدند. برای حکاکی از محلول ۴ درصد نایتال به مدت ۴ ثانیه استفاده شد. ریزساختار نمونه‌ها به وسیله ی میکروسکوپ نوری مدل IM7200 میکروسکوپ الکترونی روبشی محیطی مدل FEI ESEM QUANTA 200 ساخت کشور آمریکا در آزمایشگاه شرکت آریا رسالک مطالعه شد. به منظور بررسی عمق اثر از تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی استفاده شد. روی هر عکس به وسیله ی نرم افزار Image J عمق اثر در چهار نقطه حساب و میانگین گرفته شد. همچنین به منظور بررسی تأثیر عملیات مکانیکی سطح بر ریزسختی، آزمون ریزسختی از سطح تا فاصله ی ۲۰۰ میکرومتری از آن، به وسیله دستگاه ریزسختی سنجی JENUS با نیروی اعمالی ۱۰۰ گرم انجام شد.

۲-۵ نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش

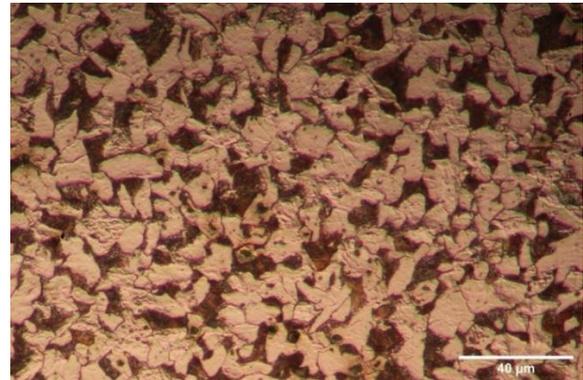
جدول ۳. نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش

شماره	کد نمونه	مدت زمان (دقیقه)	شدت ضربه	جنس ضربه زن
۱	0.36C	۰	متوسط	فولاد ۳۰۴
۲	0.36C MI 15 min	۱۵	متوسط	فولاد ۳۰۴
۳	0.36C MI 30 min	۳۰	متوسط	فولاد ۳۰۴
۴	0.36C MI 60 min	۶۰	متوسط	فولاد ۳۰۴
۵	0.36C HI 15 min	۱۵	زیاد	فولاد ۳۰۴
۶	0.36C HI 30 min	۳۰	زیاد	فولاد ۳۰۴
۷	0.36C MI HH 15 min	۱۵	متوسط	پیچ ۱۲.۹
۸	0.36C MI HH 30 min	۳۰	متوسط	پیچ ۱۲.۹
۹	0.36C MI HH 60 min	۶۰	متوسط	پیچ ۱۲.۹

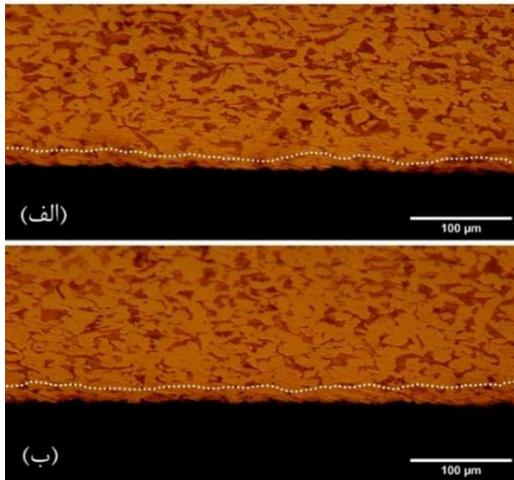
۳- نتایج و بحث

زمان‌های مختلف با شدت زیاد و متوسط در شکل ۷، شکل ۸ و شکل ۹ آورده شده است. با بررسی تصاویر ریزساختاری به کمک نرم‌افزار Image J عمق اثر در نمونه‌هایی که با شدت مختلف تحت عملیات مکانیکی سطح قرار گرفته بودند محاسبه و نتایج آن در شکل ۱۰ آورده شده است.

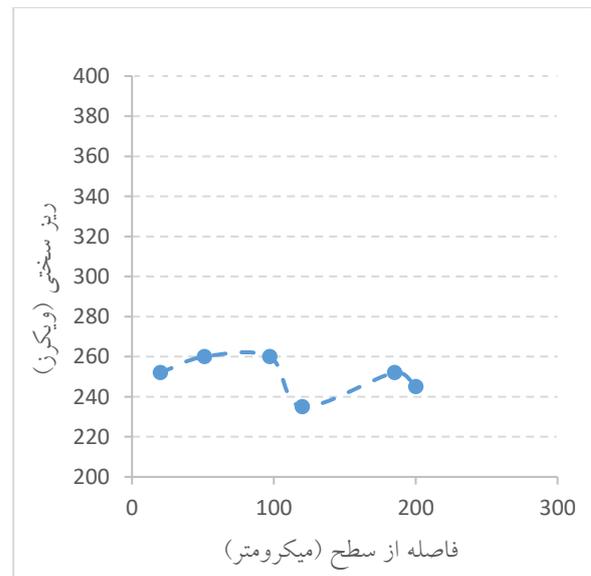
شکل ۶ و شکل ۷ به ترتیب تصویر ریزساختار و نتایج ریزسختی میلگردی از جنس فولاد ساده کربنی را نشان می‌دهند. بر اساس این نتایج، سختی نمونه در بازه‌ی ۲۳۵ تا ۲۶۰ ویکرز قرار دارد.



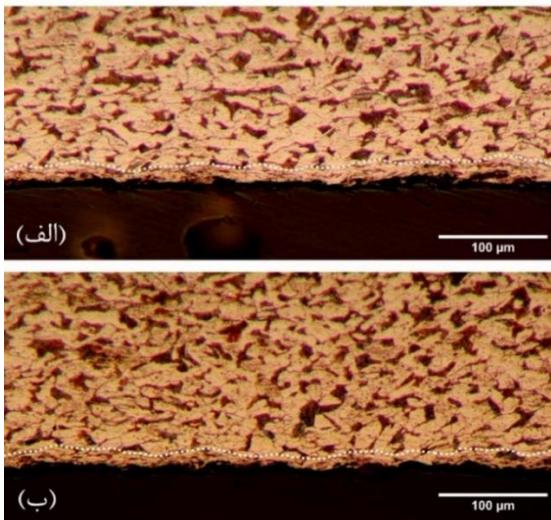
شکل ۵. تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار نمونه‌ی اولیه.



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار نمونه پس از عملیات مکانیکی سطح با شدت زیاد به مدت الف: ۱۵ ب: ۳۰ دقیقه.



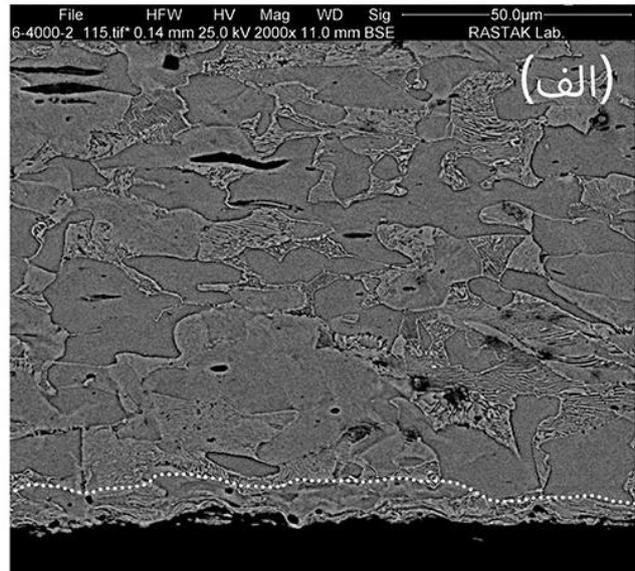
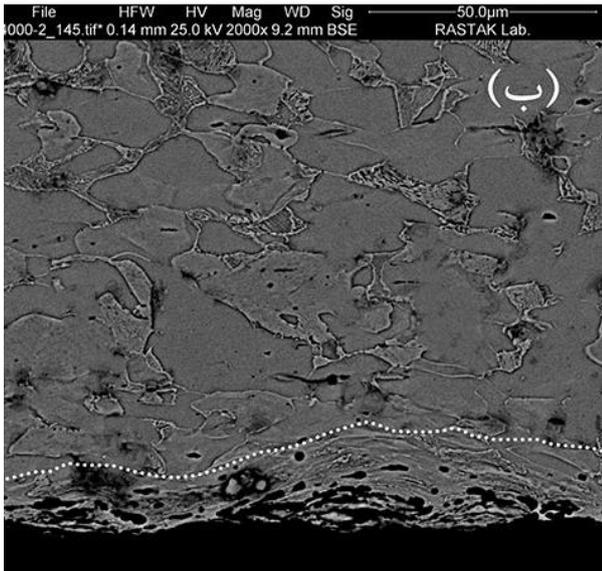
شکل ۶. نمودار ریزسختی برحسب فاصله از سطح در نمونه‌ی اولیه.



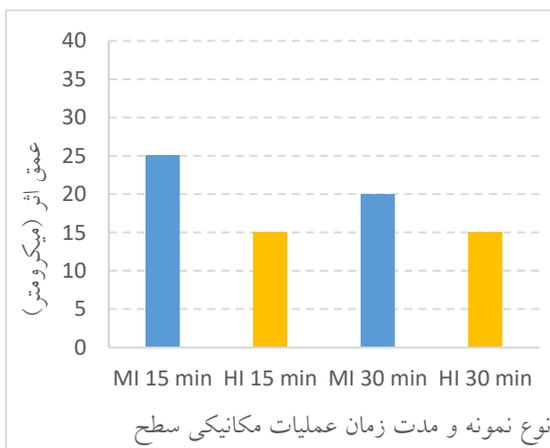
شکل ۸. تصاویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار نمونه پس از عملیات مکانیکی سطح با شدت متوسط به مدت الف: ۱۵ ب: ۳۰ دقیقه.

۳-۱ تأثیر شدت عملیات مکانیکی سطح

تصاویر ریزساختار میکروسکوپی نوری و الکترونی روبشی محیطی از نمونه پس از عملیات مکانیکی سطحی به مدت



شکل ۹. تصاویر میکروسکوپی الکترونی از ریزساختار نمونه پس از عملیات مکانیکی سطح به مدت ۳۰ دقیقه الف: شدت زیاد ب: شدت متوسط.

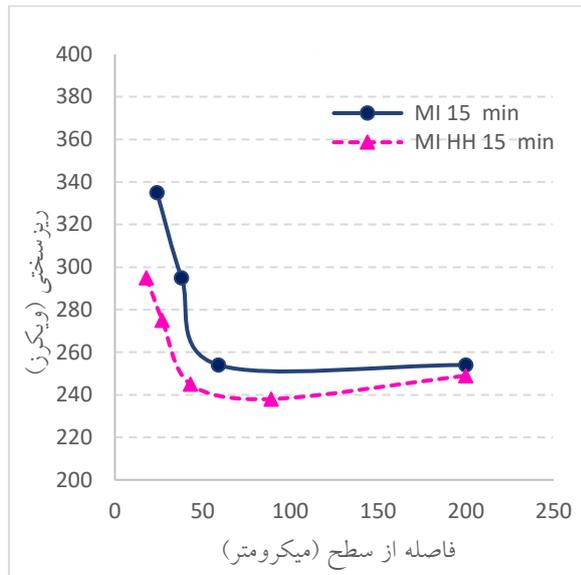


شکل ۱۰. نمودار تأثیر شدت عملیات مکانیکی سطح بر عمق اثر. نکته تکمیلی رنگ زرد: عملیات مکانیکی سطح با شدت زیاد رنگ آبی: عملیات مکانیکی سطح با شدت متوسط.

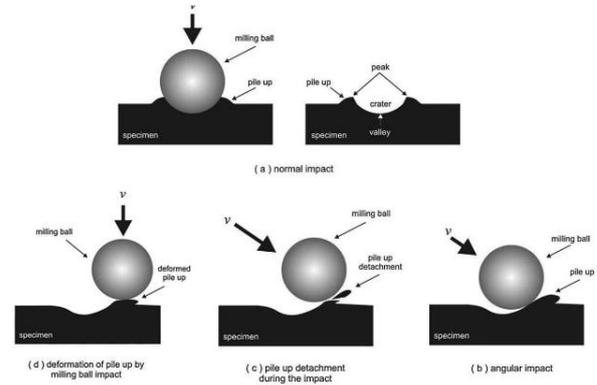
مطابق با شکل ۱۰ و تصاویر میکروسکوپی نوری و الکترونی (شکل ۷، شکل ۸ و شکل ۹) می‌توان این مورد را بیان کرد که انجام عملیات مکانیکی سطح با شدت زیاد منجر به کاهش عمق اثر می‌شود. کاهش این منطقه می‌تواند به دلیل این باشد که با افزایش شدت ضربه در عملیات مکانیکی سطح، فشردگی بیشتری در ناحیه تغییر شکل یافته رخ می‌دهد. علاوه بر این افزایش شدت عملیات مکانیکی می‌تواند منجر به کنده شدن سطح فلز شود. در پژوهشی نیز آریفویانتو^۱ و همکاران [۱۵] که به بررسی تأثیر عملیات سایش مکانیکی سطح بر زبری فولاد زنگ نزن AISI316L پرداختند، نشان دادند که مطابق با شکل ۱۱ با اعمال هر ضربه در حین عملیات، یک فرورفتگی در سطح فولاد ایجاد می‌شود که در اطراف هر فرورفتگی، دو انباشتگی^۲ رخ می‌دهد. با افزایش سرعت ضربه، انرژی ضربه نیز افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به کنده شدن انباشتگی‌های ایجاد شده از سطح فولاد شده و فرسایش سطح را افزایش دهد.

^۲ Pile Up

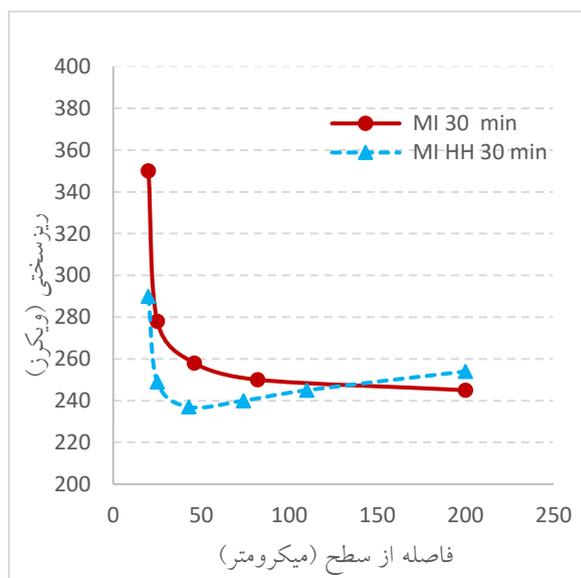
^۱ Arifvianto



شکل ۱۱. مدلی از تکامل سطح در حین عملیات سایش مکانیکی سطح الف: ضربه معمولی ب: ضربه زاویه دار ج: جدا شدن انباشتگی در حین ضربه د: تغییر شکل انباشتگی در حین ضربه [۱۵].



شکل ۱۲. نمودار تأثیر شدت عملیات مکانیکی سطح به مدت ۱۵ دقیقه بر مقادیر ریزسختی برحسب فاصله از سطح.

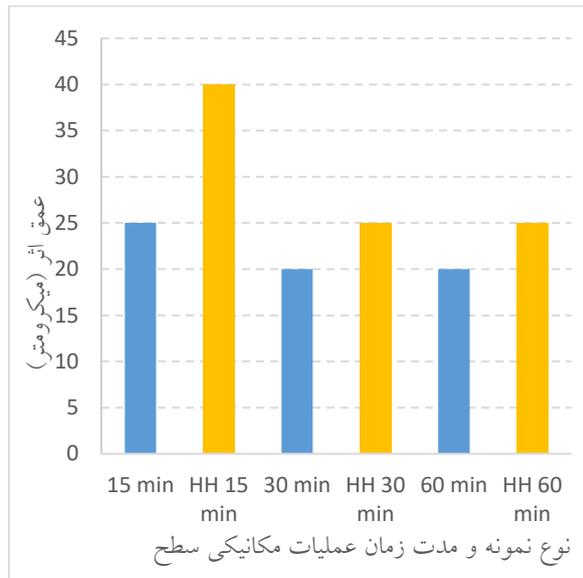


شکل ۱۳. نمودار تأثیر شدت عملیات مکانیکی سطح به مدت ۳۰ دقیقه بر مقادیر ریزسختی برحسب فاصله از سطح.

۲-۳ تأثیر جنس ضربه زن در عملیات مکانیکی سطح

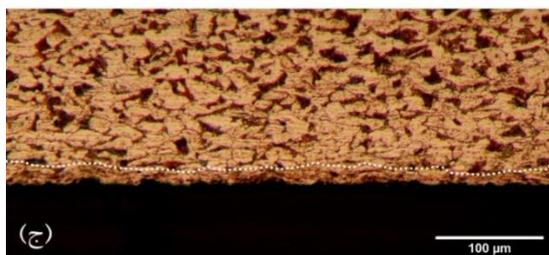
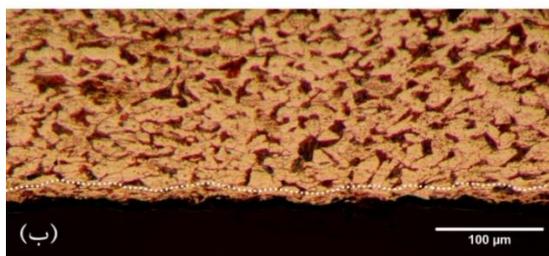
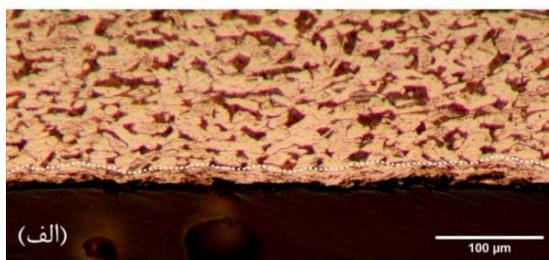
به منظور بررسی دیگر متغیرهایی که می‌توانند منجر به تغییر شکل مومسان شدیدتری بر روی نمونه شوند؛ به بررسی تأثیر جنس ضربه زن پرداخته شد. با توجه به شکل ۱۵ و تصاویر

با توجه به شکل ۶ پیشینه‌ی ریزسختی نمونه‌ای که تحت عملیات قرار نگرفته است، ۲۶۰ ویکرز می‌باشد، بنابراین ریزسختی بیش از ۲۶۰ ویکرز، نشان دهنده‌ی تأثیر عملیات مکانیکی سطح بر افزایش ریز سختی است. در رابطه با تأثیر شدت عملیات مکانیکی بر ریزسختی نیز همان‌طور که در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، ریزسختی نمونه‌هایی که با شدت متوسط تحت عملیات قرار گرفته‌اند بیشتر از شدت زیاد است. به گونه‌ای که در نمونه‌های شدت متوسط که به مدت ۱۵ و ۳۰ دقیقه تحت عملیات قرار گرفته‌اند، ریزسختی تا حدود ۳۴۰ ویکرز افزایش یافته است اما برای نمونه‌های شدت زیاد، پیشینه ریزسختی حدود ۲۸۰ ویکرز می‌باشد. با توجه به پژوهش تسای^۱ و همکاران [۳۰]، به نظر می‌رسد که انجام عملیات مکانیکی سطح با شدت بالا منجر به افزایش انرژی ورودی به قطعه شود. هنگامی که انرژی ورودی در عملیات سایش مکانیکی سطح از حد بهینه فراتر رود، می‌تواند منجر به پدیده کار نرمی شود و سختی قطعه از حداکثر مقدار خود کاهش می‌یابد.

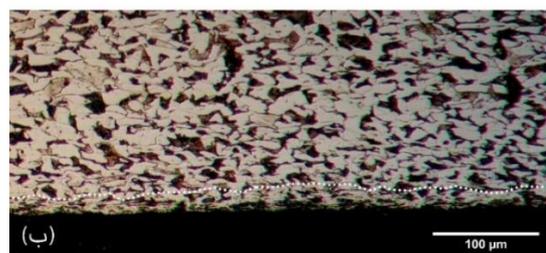
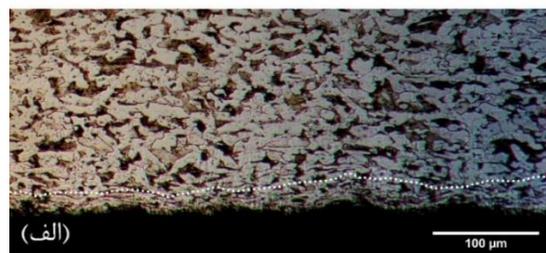


شکل ۱۴. نمودار تأثیر جنس ضربه‌زن در عملیات مکانیکی سطح بر عمق اثر.

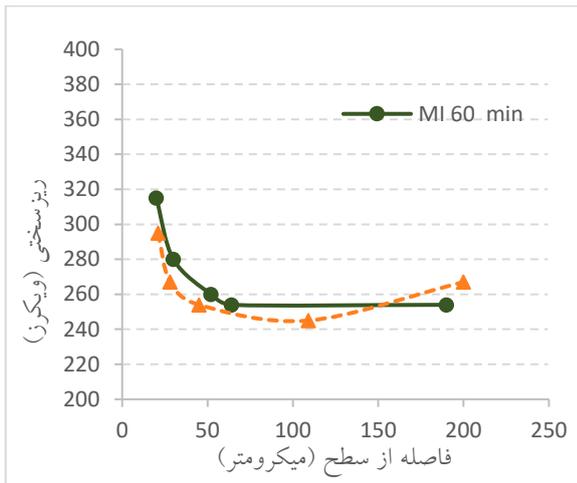
میکروسکوپی نوری که در شکل ۱۵ و شکل ۱۶ آورده شده است، می‌توان گفت که عمق اثر در نمونه‌هایی که به وسیله‌ی ضربه‌زن سخت‌تر مورد عملیات مکانیکی سطحی قرار گرفته‌اند، به‌طور قابل‌توجهی بیشتر است. با توجه به ثابت بودن دیگر متغیرها به‌طور قطعی جنس ضربه‌زن دلیل افزایش عمق اثر است که می‌توان علت این اتفاق را این‌گونه بیان کرد که با افزایش سختی ضربه‌زن، تغییرشکل مومسان شدیدتری بر روی نمونه اعمال می‌شود که می‌تواند منجر به افزایش عمق اثر شود. علاوه بر این در حین عملیات مکانیکی سطح با گذشت زمان سطح نمونه سخت‌تر می‌شود و پس از سخت شدن سطح، اگر ضربه‌زن سختی کافی نداشته باشد نمی‌تواند منجر به تغییرشکل مومسان بیشتر شود لذا احتمالاً دلیل افزایش عمق اثر با ضربه‌زن سخت‌تر همین موضوع است.



شکل ۱۶. تصاویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار نمونه پس از عملیات مکانیکی سطح با ضربه‌زنی از جنس فولاد ۳۰۴ الف: ۱۵ دقیقه ب: ۳۰ دقیقه ج: ۶۰ دقیقه.



شکل ۱۵. تصاویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار نمونه پس از عملیات مکانیکی سطح با ضربه‌زن سخت‌تر (پیچ ۱۲،۹) الف: ۱۵ دقیقه ب: ۳۰ دقیقه ج: ۶۰ دقیقه.



شکل ۱۹. نمودار تأثیر جنس ضربه‌زن بر مقادیر ریزسختی برحسب فاصله از سطح پس از عملیات مکانیکی سطح به مدت ۶۰ دقیقه.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر متغیرهای مختلف در عملیات مکانیکی سطح بر ریزساختار و ریزسختی میلگردی از جنس فولاد کم کربن پرداخته شد. بر اساس آزمایش‌های انجام شده و نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه‌گیری‌های زیر را انجام داد:

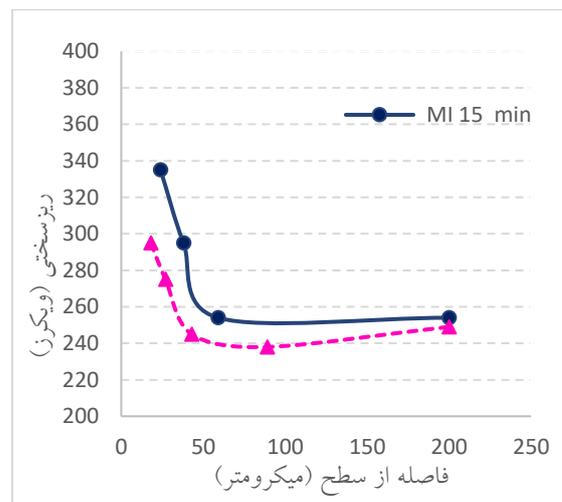
۱- پس از عملیات مکانیکی، در سطح و نواحی زیرسطحی تغییر شکل مومسان شدیدی رخ داده است. با تغییر متغیرهای مختلف، عمق اثر متفاوتی نیز دیده می‌شود به طوری که کمترین و بیشترین میزان عمق اثر به ترتیب ۱۵ و ۴۰ میکرومتر مشاهده می‌شود.

۲- نتایج سختی‌سنجی نشان می‌دهد که پس از انجام عملیات مکانیکی، شبیهی از سطح به سمت مرکز نمونه در سختی مشاهده می‌شود، به طوری که سختی در سطح افزایش یافته و بافاصله گرفتن از سطح، کاهش می‌یابد. نتایج سختی‌سنجی مشخص کردند که پس از عملیات مکانیکی سطح، بیشینه سختی از ۲۶۰ ویکرز، به ۳۴۰ ویکرز می‌رسد.

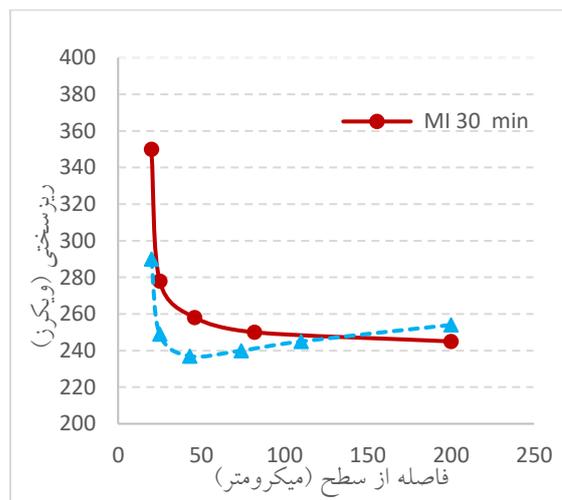
۳- با انجام عملیات مکانیکی سطح با شدت زیاد، عمق اثر، نسبت به حالت استفاده از شدت متوسط از ۲۵ میکرومتر به ۱۵ میکرومتر کاهش پیدا می‌کند.

۴- استفاده از ضربه‌زن سخت‌تر منجر به افزایش عمق اثر تا ۴۰ میکرومتر می‌شود.

در رابطه با تأثیر جنس ضربه‌زن بر ریزسختی نیز مطابق با شکل ۱۷، شکل ۱۸ و شکل ۱۹ مشاهده شد که انجام عملیات مکانیکی سطح با ضربه‌زنی از جنس فولاد ۳۰۴، ریزسختی را بیشتر از ضربه‌زن سخت‌تر (پیچ ۱۲.۹) افزایش می‌دهد. به گونه‌ای که بیشترین سختی نمونه‌هایی که با ابزار ۳۰۴ مورد عملیات قرار گرفته‌اند، ۳۴۰ ویکرز است و سختی بیشینه در نمونه‌های پردازش شده با ابزار سخت‌تر نیز، ۲۹۰ ویکرز است. این مورد نیز همانند انجام عملیات با شدت بالا می‌تواند به دلیل افزایش بیش از حد انرژی ورودی به قطعه باشد.



شکل ۱۷. نمودار تأثیر جنس ضربه‌زن بر مقادیر ریزسختی برحسب فاصله از سطح پس از عملیات مکانیکی سطح به مدت ۱۵ دقیقه.



شکل ۱۸. نمودار تأثیر جنس ضربه‌زن بر مقادیر ریزسختی برحسب فاصله از سطح پس از عملیات مکانیکی سطح به مدت ۳۰ دقیقه.

nanostructured surface layer", *Acta Materialia*, Vol. 58, No. 7, pp. 2376–2386, 2010.

۵- منابع

[9] Tsai, B.F., Chen, Y.C., Ou, S.F., Wang, K.K., Hsu, Y.C., "Fabrication of superhydrophobic titanium surfaces by anodization and surface mechanical attrition treatment", *International Journal of Applied Ceramic Technology*, Vol. 16, No. 1, pp. 211–220, 2019.

[1] Olugbade, T.O., Lu, J., "Literature review on the mechanical properties of materials after surface mechanical attrition treatment (SMAT)", *Nano Materials Science*, Vol. 2, No. 1, pp. 3–31, 2020.

[10] Azadmanjiri, J., Berndt, C.C., Kapoor, A., Wen, C., "Development of Surface Nano-Crystallization in Alloys by Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT)", *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, Vol. 40, No. 3, pp. 164–181, 2015.

[2] اسدی نژاد، ر. پاینده، ی و میرزاخانی، ب، تأثیر عملیات مکانیکی سطحی بر ریزساختار و خواص مکانیکی میلگردی از جنس فولاد کم کربن، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، ۱۴۰۱.

[11] Guo, F.A., Zhu, K.Y., Trannoy, N., Lu, J., "Examination of thermal properties by scanning thermal microscopy in ultrafine-grained pure titanium surface layer produced by surface mechanical attrition treatment", *Thermochimica Acta*, Vol. 419, No. 1–2, pp. 239–246, 2004.

[3] Duan, M., Luo, L., Liu, Y., "Microstructural evolution of AZ31 Mg alloy with surface mechanical attrition treatment: Grain and texture gradient", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 823, pp. 153691, 2020.

[12] Zhang, Z., Li, Y., Peng, J., Guo, P., Huang, J., Yang, P., Wang, S., Chen, C., et al., "Combining surface mechanical attrition treatment with friction stir processing to optimize the mechanical properties of a magnesium alloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 756, No. April, pp. 184–189, 2019.

[4] Tadge, P., Sasikumar, C., "Improvements in Mechanical Properties of Spring Steel Through Surface Tempering and Hardening Assisted by SMAT", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 71, No. 6, pp. 1543–1552, 2018.

[13] Chen, G., Fu, Y., Cui, Y., Gao, J., Guo, X., Gao, H., Wu, S., Lu, J., et al., "Effect of surface mechanical attrition treatment on corrosion fatigue behavior of AZ31B magnesium alloy", *International Journal of Fatigue*, Vol. 127, No. March, pp. 461–469, 2019.

[5] Tao, N.R., Wang, Z.B., Tong, W.P., Sui, M.L., Lu, J., Lu, K., "An investigation of surface nanocrystallization mechanism in Fe induced by surface mechanical attrition treatment", *Acta Materialia*, Vol. 50, No. 18, pp. 4603–4616, 2002.

[14] Chemkhi, M., Reirant, D., Roos, A., Garnier, C., Waltz, L., Demangel, C., Proust, G., "The effect of surface mechanical attrition treatment on low temperature plasma nitriding of an austenitic stainless steel", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 221, pp. 191–195, 2013.

[6] Pandey, V., Singh, J.K., Chattopadhyay, K., Srinivas, N.C.S., Singh, V., "Influence of ultrasonic shot peening on corrosion behavior of 7075 aluminum alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 723, pp. 826–840, 2017.

[15] Arifvianto, B., Suyitno, Mahardika, M., "Effects of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on a rough surface of AISI 316L stainless steel", *Applied Surface Science*, Vol. 258, No. 10, pp. 4538–4543, 2012.

[7] Kargar, F., Laleh, M., Shahrabi, T., Rouhaghdam, A.S., "Effect of treatment time on characterization and properties of nanocrystalline surface layer in copper induced by surface mechanical attrition treatment", *Bulletin of Materials Science*, Vol. 37, No. 5, pp. 1087–1094, 2014.

[8] Wang, Z.B., Lu, K., Wilde, G., Divinski, S. V., "Interfacial diffusion in Cu with a gradient

Surface Engineering, Vol. 0, No. 0, pp. 1–10, 2020.

[24] Benafia, S., Retraint, D., Yapi Brou, S., Panicaud, B., Grosseau Poussard, J.L., "Influence of Surface Mechanical Attrition Treatment on the oxidation behaviour of AISI316L stainless steel", *Corrosion Science*, Vol. 136, No. March, pp. 188–200, 2018.

[25] Roland, T., Retraint, D., Lu, K., Lu, J., "Fatigue life improvement through surface nanostructuring of stainless steel by means of surface mechanical attrition treatment", *Scripta Materialia*, Vol. 54, No. 11, pp. 1949–1954, 2006.

[26] Benafia, S., Retraint, D., Panicaud, B., Poussard, J.L.G., "Influence of surface mechanical attrition treatment on the oxidation behavior of AISI316L stainless steel at 750°C", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 63, 2014.

[27] Samih, Y., Beausir, B., Bolle, B., Grosdidier, T., "In-depth quantitative analysis of the microstructures produced by Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT)", *Materials Characterization*, Vol. 83, pp. 129–138, 2013.

[28] Arifvianto, B., Suyitno, Mahardika, M., Dewo, P., Iswanto, P.T., Salim, U.A., "Effect of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on microhardness, surface roughness and wettability of AISI316L", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 125, No. 3, pp. 418–426, 2011.

[29] Kalsar, R., Suwas, S., "A novel way to enhance the strength of twinning induced plasticity (TWIP) steels", *Scripta Materialia*, Vol. 154, pp. 207–211, 2018.

[30] Tsai, W.Y., Huang, J.C., Gao, Y.J., Chung, Y.L., Huang, G.R., "Relationship between microstructure and properties for ultrasonic surface mechanical attrition treatment", *Scripta Materialia*, Vol. 103, pp. 45–48, 2015.

[16] Bajda, S., Dymek, S., Krzyzanowski, M., Retraint, D., Majta, J., Lisiecki, Ł., Kwiecień, M., "Characterization of nanocrystallised multilayered metallic materials produced by the SMAT followed by constrained compression", *Materials Characterization*, Vol. 145, No. August, pp. 250–257, 2018.

[17] Zhou, J., Sun, Z., Kanouté, P., Retraint, D., "Effect of surface mechanical attrition treatment on low cycle fatigue properties of an austenitic stainless steel", *International Journal of Fatigue*, Vol. 103, pp. 309–317, 2017.

[18] Sun, Y., Bailey, R., Moroz, A., "Surface finish and properties enhancement of selective laser melted AISI316L stainless steel by surface mechanical attrition treatment", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 378, No. September, pp. 124993, 2019.

[19] Singh, D., Gatey, A.M., Devan, R.S., Antunes, V., Figueroa, C.A., Joshi, A.A., Hosmani, S.S., Singh, D., et al., "Surface treatment response of AISI 2205 and AISI 304L steels: SMAT and plasma-nitriding", *Surface Engineering*, Vol. 0, No. 0, pp. 1–11, 2018.

[20] Shadangi, Y., Chattopadhyay, K., Singh, V., "Microstructural Modification and Tensile Behavior of IF Steel Processed through Surface Mechanical Attrition Treatment", *Jom*, Vol. 72, No. 12, pp. 4330–4339, 2020.

[21] Wang, Z.B., Lu, J., Lu, K., "Wear and corrosion properties of a low carbon steel processed by means of SMAT followed by lower temperature chromizing treatment", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 201, No. 6, pp. 2796–2801, 2006.

[22] Frija, M., Hassine, T., Fathallah, R., Bouraoui, C., Dogui, A., "Finite element modelling of shot peening process: Prediction of the compressive residual stresses, the plastic deformations and the surface integrity", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 426, No. 1–2, pp. 173–180, 2006.

[23] Ran, M., Zhang, C., Wen, L., Zhou, H., Zheng, W., "Effect of surface mechanical attrition treatment on stainless steel corrosion",