



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Effect of Shot-Peening on the Wear Behavior of Two Types of High Manganese Austenitic Steel

Seyyed Amin Torabi¹, Kamran Amini^{2*}

1. MSc, Department of Mechanical Engineering, Tiran Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

2. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Tiran Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

Received 27 November 2017
Accepted 5 April 2018

Abstract:

In this research, the effect of shot-peening treatment on the wear behavior of two types of high manganese austenitic steel (Fe-7Mn-0.6Si- 1.2C and Fe-17Mn-0.6Si-1.2C) was investigated. In this regard, two samples with various manganese contents of 7 and 17 weight percent are cast, respectively. In order to achieve a uniform structure of austenite into all samples, solution-annealing process is performed at temperature of 1100°C during 2h. Micro hardness measurement and tensile testing as well as wear test according to the rubber wheel-dry sand method are conducted on all heat-treated samples. Surfacing hardening treatment by using of shot- peening equipment is done during 15 and 30 mines on all samples. The results showed that when the percentage of manganese increased from 7 to 17% in the heat-treated samples, hardness and tensile strength values are increased and improved about 27% and 10%, respectively. The surface hardness of high manganese austenite steels is increased due to the applying surface work hardening with shot-pinning treatment. Thus, the highest hardness is observed in the shot-peened sample at time of 30 min. however, the highest hardness and wear resistance are determined in the sample containing 7%Mn. The investigation of worn surfaces showed that the wear mechanism was abrasive mechanism. Moreover, the amount of and the depth of grooves are reduced with increasing of hardness values.

Keywords:

High manganese austenitic steel,
Shot-peening,
Strength,
Surface hard working,
Hardness,
Wear resistance.

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

Please cite this article using:

Torabi S.A., Amini K., Effect of Shot-Peening on the Wear Behavior of Two Types of High Manganese Austenitic Steel, in Persian, Founding Research Journal, 2017, 1(2) 121-132.
DOI: 10.22034/FRJ.2018.108598.1013

* Corresponding Author:

Kamran Amini, Associate Professor

Address: Department of Mechanical Engineering, Tiran Branch, Islamic Azad University, Isfahan, P.O. Box 8531911111, Tiran, Esfahan, Iran. Tel/Fax: +98 3142229000.

E-mail: K_amini@iautiran.ac.ir



انجمن علمی ریخته‌گری ایران

فصل نامه علمی پژوهشی

پژوهش نامه ریخته‌گری

تأثیر ساچمه‌کوبی بر رفتار سایشی دو نوع فولاد پر منگنز آستنیتی

سید امین ترابی^۱، کامران امینی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد تیران، دانشگاه آزاد اسلامی، تیران، اصفهان، ایران amintorabi1986@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد تیران، دانشگاه آزاد اسلامی، تیران، اصفهان، ایران K_amini@iautiran.ac.ir (نویسنده مکاتبه کننده)

دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۶

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۱۶

چکیده:

در این پژوهش به بررسی تأثیر عملیات ساچمه‌کوبی بر رفتار سایشی دو نوع فولاد پر منگنز آستنیتی با ترکیب اسمی Fe-7Mn-0.6Si-1.2C و Fe-17Mn-0.6Si-1.2C پرداخته شد. به این منظور دو نمونه یکی با ۷ درصد وزنی منگنز و دیگری با ۱۷ درصد وزنی منگنز ریخته‌گری شدند. عملیات آنیل انحلالی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۲ ساعت برای دستیابی به ساختار یکنواخت آستنیتی روی نمونه‌ها انجام شد. سپس آزمایش‌های سختی سنجی، کشش و سایش به روش چرخ ساینده- ماسه خشک بر روی نمونه‌های عملیات حرارتی شده انجام پذیرفت. عملیات کار سختی سطحی توسط دستگاه ساچمه‌کوبی به مدت ۱۵ و ۳۰ دقیقه بر روی نمونه‌ها صورت گرفت. نتایج نشان از بهبود ۲۷ و ۱۰ درصدی مقادیر سختی و استحکام کششی به واسطه افزایش درصد عنصر منگنز از ۷ به ۱۷ درصد در نمونه‌های عملیات حرارتی شده داشت. اعمال کار سختی سطحی توسط عملیات ساچمه‌کوبی موجب افزایش سختی در سطح هر دو نمونه پرمنگنز آستنیتی شد، به طوری که بالاترین میزان سختی در نمونه‌های ۳۰ دقیقه ساچمه‌کوبی شده مشاهده شد. ولیکن بالاترین سختی و مقاومت سایشی در نمونه محتوی ۷ درصد وزنی منگنز مشاهده شد. بررسی سطوح سایش نشان از خراشان بودن مکانیزم سایش داشت، هم چنین با افزایش سختی از تعداد و عمق شیارها در سطح سایش کاسته شد.

واژه‌های کلیدی:

فولاد پر منگنز آستنیتی، ساچمه‌کوبی، استحکام، کار سختی سطحی، سختی، مقاومت به سایش.

۱- مقدمه

انحلالی است، که همین موضوع موجب مقاومت سایشی ضعیف در ابتدای دوره کاری است [۱-۲، ۱۱]. در همین راستا و با توجه به کاربردهای ذکر شده، تحقیقات متنوعی در جهت بهبود خواص و کارایی این فولادها انجام شده است. تعدادی از پژوهش‌گران به مطالعه تأثیر افزایش عناصر آلیاژی پرداخته‌اند. نجف‌آبادی و همکاران [۱۳] با افزودن عنصر تیتانیوم به فولاد هادفیلد مرسوم مشاهده نمودند که هر چند با افزایش ۰/۶ درصدی عنصر تیتانیوم، سختی و در نتیجه مقاومت به سایش بهبود یافته، ولی به همان نسبت چقرمگی فولاد مذکور به علت تشکیل کاربیدهای پایدار TiC، کاهش یافت. در بررسی تأثیر عنصر وانادیم مشاهده شد که با افزایش درصد عنصر وانادیم، سختی و میزان مقاومت به سایش افزایش و در مقابل میزان چقرمگی و مقاومت به ضربه به علت عدم انحلال کاربیدهای مرز دانه‌ای کاهش یافت [۱۴].

بهبود کارایی فولادها در صنعت، همواره موضوع مورد مطالعه محققان بوده است. اخیراً، بیشترین تلاش‌های تحقیقاتی مختص توسعه مواد جدید با خواص فوق العاده‌ای همچون استحکام بالا، سختی، چقرمگی و مقاومت به سایش بوده است [۱]. در فولادهای پرمنگنز آستنیتی به دلیل برخورداری از خواص مطلوبی همچون چقرمگی، انعطاف پذیری، قابلیت کار سختی [۱-۳] و مقاومت در برابر سایش [۴] مورد توجه محققان بوده و در گستره‌ی وسیعی از صنایع همچون خودرو، استخراج معادن، معدن سنگ، مته‌های حفر چاه نفت، فولادسازی، راه آهن، لایروپ‌ها، کشتی‌سازی، صنایع چوب و تجهیزات خرد کننده سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴-۱۲]. نکته حائز اهمیت در مورد این فولادها، سختی اولیه پایین و در حدود HRC ۲۰ آن‌ها پس از عملیات آنیل

هزینه‌های سنگین توقف خط در این صنایع جهت تعویض قطعات مستهلک شده و حصول نتایج مطلوب خواص مکانیکی در پژوهش‌های قبلی نویسنده و همکاران [۱۹]، در این پژوهش به بررسی تاثیر هم‌زمان افزایش درصد عنصر منگنز همراه با اعمال کارسختی سطحی حاصل از عملیات ساچمه‌کوبی بر خواص سایشی دو نوع فولاد پرمنگنز آستنیتی با ترکیب اسمی Fe-17Mn-1.5Cr-0.6Si- و Fe-7Mn-1.5Cr-0.6Si-1.2C پرداخته می‌شود. هدف از انتخاب این دو آنالیز، بررسی امکان دستیابی به خواص مکانیکی و سایشی مطلوب با صرف هزینه‌های کمتر تولید بود. به این منظور نمونه‌ها پس از ریخته‌گری، عملیات آنیل انحلالی و ساچمه‌کوبی تحت بررسی ساختار، سختی‌سنجی و آزمایش سایش قرار گرفتند.

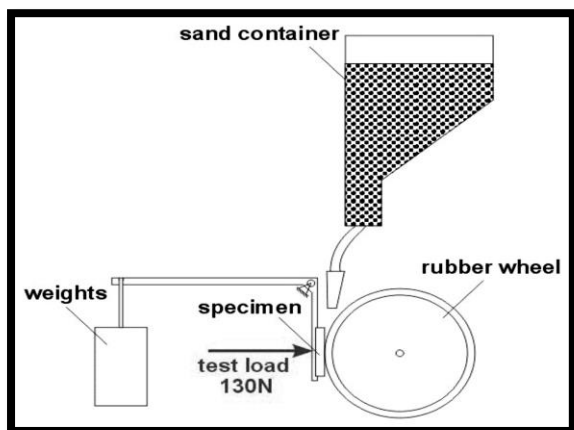
۲- مواد و روش تحقیق

آلیاژهای مورد استفاده در این پژوهش به روش ریخته‌گری در قالب‌های CO₂ بر اساس استاندارد ASTM E8 در شرکت صنایع ریخته‌گری اصفهان، تولید شدند [۲۰]. آماده‌سازی ذوب توسط کوره القایی با فرکانس شبکه با ظرفیت ۸۰۰ کیلوگرم انجام شد. قبل از ریخته‌گری آنالیز نهایی از ذوب گرفته شد. ذوب از کوره با دمای ۱۴۸۰°C درون پاتیل تخلیه شد. برای اکسیژن‌زدایی ذوب از آلومینیم به میزان ۱ درصد وزن مذاب و فروسیلیکومینیزیم به میزان ۰/۷ درصد وزن مذاب، استفاده شد. انتقال ذوب از کوره تا قالب‌ها توسط پاتیل حمل مذاب با ظرفیت ۱۰۰ کیلوگرم با جداره نسوز سیلیسی انجام و دمای ذوب‌ریزی ۱۴۲۰°C بود که توسط دستگاه پیرومتر کنترل گردید. ترکیب شیمیایی آلیاژها توسط دستگاه کوآنتومتری بر اساس استاندارد E415-99a کنترل و نتایج در جدول (۱) قابل مشاهده است [۲۱]. عملیات حرارتی آنیل انحلالی در دمای ۱۱۰۰°C و به مدت ۲ ساعت و سپس کوئنچ سریع در آب، برای انحلال کاربیدها انجام شد [۱۳]. نمونه‌سازی توسط

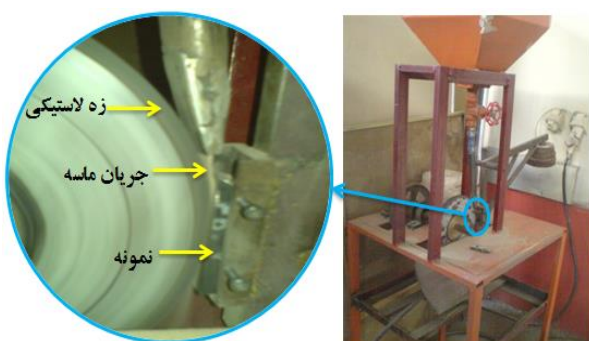
جدول ۱- ترکیب شیمیایی دو نمونه پر منگنز آستنیتی (درصد وزنی)

نمونه	C	Mn	Si	Cr	P	S
Fe-7Mn	۱/۱۸	۷/۵۰	۰/۶۰	۱/۴۰	۰/۰۴	۰/۰۳
Fe-17Mn	۱/۲۰	۱۷/۱۰	۰/۵۹	۱/۵۰	۰/۰۴	۰/۰۱

همچنین نتایج نشان از افزایش چشمگیر سختی اولیه از ۲۲۹ به ۳۲۹ HB به واسطه افزایش عنصر سیلیسیم از ۰/۰۵ به ۳/۵۱ درصد و تشکیل کاربید آهن به شکل Fe₃C حجیم در زمینه آستنیتی فولاد ریختگی هادفیلد مرسوم داشت [۱۵]. عباسی و همکاران [۱۶] مشاهده کردند که با افزایش ۱/۵ درصدی آلومینیم به فولاد هادفیلد حاوی ۱۲ درصد وزنی منگنز، میزان استحکام تسلیم و سختی روند افزایشی یافته و در مقابل استحکام کششی، درصد ازدیاد طول نسبی و انرژی ضربه روندی کاهش یافته به همراه داشته است. از سوی دیگر، بهبود در مقاومت سایشی به واسطه افزودن ۱/۵ درصد وزنی آلومینیم در شرایط سایش آرام (نیروی اعمالی پایین) را گزارش نمودند. سی و همکاران [۱۷] در مقایسه فولاد پرمنگنز و درصد سیلیسیم بالا نسبت به فولاد هادفیلد مرسوم مشاهده نمودند که هر چند میزان استحکام و مقاومت به ضربه روندی نزولی به همراه داشته ولیکن با افزایش سختی، بهبود مقاومت سایشی فولاد پر منگنز - پرسیلیسیم نسبت به فولاد هادفیلد مرسوم تحت نیروهای سایشی متفاوت حاصل شد. تعدادی از محققان نیز تاثیر عملیات کار سختی اولیه را مورد بررسی قرار دادند. در این زمینه، یان و همکاران [۱۸] با انجام عملیات ساچمه‌کوبی در مدت زمان ۳۰ دقیقه بر سطح فولاد هادفیلد مرسوم، بهبود ۷۲ درصدی در مقاومت به سایش را مشاهده نمودند. نتایج نشان از افزایش سختی از ۲۵۶ به ۷۷۴ HV به واسطه افزایش زمان ساچمه‌کوبی از نمونه خام تا نمونه ۱۲۰ دقیقه ساچمه‌کوبی داشت. نجف‌آبادی و همکاران [۱۳] با اعمال کار سختی اولیه توسط ضربات پتک بر فولاد هادفیلد مرسوم، افزایش سختی از ۲۷/۵ به ۳۱HRC را گزارش نمودند. ضمن اینکه نتایج نشان از بهبود مقاومت به سایش به واسطه این عملیات داشت. تحقیقات نویسنده و همکاران [۱۹] بر روی فولاد پرمنگنز آستنیتی حاوی ۱۷ درصد وزنی منگنز نشان داد که به واسطه عملیات کار سختی حاصل از اعمال ساچمه‌کوبی در مدت زمان ۳۰ دقیقه میزان سختی سطحی از ۲۹۰ به ۶۹۸ HV افزایش و در نتیجه ۴۰ درصد بهبود در مقاومت به سایش مشاهده شد. ضمن اینکه به واسطه اعمال هم‌زمان عملیات رسوب‌سختی در دمای ۵۵۰°C به مدت ۲ ساعت و ساچمه‌کوبی ۳۰ دقیقه‌ای سختی تا ۷۳۰HV افزایش و ۵۸ درصد بهبود در مقاومت به سایش حاصل شد. با توجه به کاربردهای استراتژیک فولادهای پرمنگنز آستنیتی در صنعت از جمله صنایع سیمان و معدن و تحمیل



(الف)



(ب)

شکل ۱- آزمایش سایش به روش چرخ ساینده-ماسه خشک (ASTM G65-00): (الف) تصویر نمادین، (ب) تصویر واقعی دستگاه

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریز ساختار

ریزساختار نمونه‌های پر منگنز آستنیتی در دو حالت ریخته‌گری و عملیات حرارتی شده در شکل (۲) آورده شده است. شکل‌های (۲-الف) و (۲-ج)، تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به کاربیدهای تشکیل شده در مرز دانه‌های دو نمونه پرمنگنز آستنیتی را به خوبی نشان می‌دهد. حضور کاربیدهای پیوسته در مرزدانه نمونه‌های خام، موجب افت خواص مکانیکی از جمله کاهش استحکام و چقرمگی ضربه در این فولادها می‌شود [۲۷، ۲۶، ۱۳]. بررسی‌ها نشان داده است که کاربیدهای رسوب یافته در این فولادها از نوع کمپلکس $(Fe, Mn)_3C$ است [۲۸-۲۶]. Jiang و همکاران [۲۷] نیز در مطالعات خود چنین نتیجه‌ای را گزارش نمودند. نجف‌آبادی و همکاران [۱۳] نیز بر حضور کاربید به شکل $(Fe, Mn)_3C$ در مرزدانه‌های آستنیت اشاره داشتند. حضور این کاربیدها موجب افت خواص مکانیکی فولادهای پرمنگنز

دستگاه برش سیم به روش تخلیه الکتریکی جهت انجام آزمایش‌ها انجام شد. ریزساختار نمونه‌ها در دو حالت قبل و بعد از عملیات آنیل انحلالی توسط میکروسکوپ نوری بررسی شد.

آزمایش کشش طبق استاندارد DIN 50125 در دمای محیط انجام شد [۲۲]. همچنین آزمایش‌های ماکرو سختی سنجی به روش ویکرز تحت نیروی 30 kg مطابق با استاندارد ASTM E92 [۲۳] و میکرو سختی سنجی به روش ویکرز بر اساس استاندارد ASTM E384 تحت نیروی 500 gf با سه مرتبه تکرار انجام شد [۲۴].

عملیات کارسختی سطحی به روش ساچمه‌کوبی توسط دستگاه ساچمه‌کوبی بر روی سطح نمونه‌ها صورت پذیرفت. در این عملیات، ساچمه‌های فولادی به قطر $0.8\text{--}0.6\text{ mm}$ با سختی 45 HRC و چگالی 7.49 kg/dm^3 توسط توربین با قدرت 15 kW و تعداد دور 3000 rpm در مدت زمان‌های 15 و 30 دقیقه بر سطح نمونه‌های با ابعاد $10 \times 25 \times 76\text{ mm}$ پرتاب شد.

آزمایش سایش به روش چرخ ساینده-ماسه خشک (شکل ۱) و بر اساس استاندارد ASTM G65-00 تحت نیروی 130 N و در مدت زمان 30 دقیقه (جدول ۲) با فاصله زمانی 5 دقیقه‌ای بر روی نمونه‌هایی با ابعاد $10 \times 25 \times 76\text{ mm}$ در دمای محیط انجام شد [۲۵].

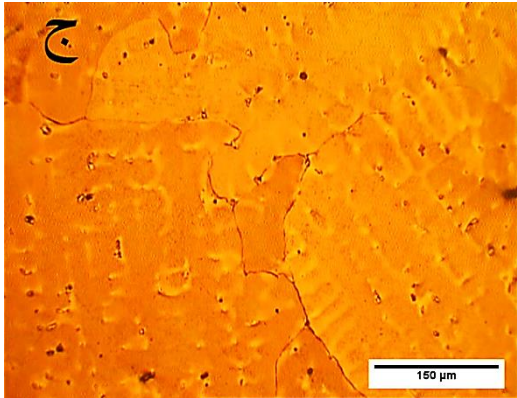
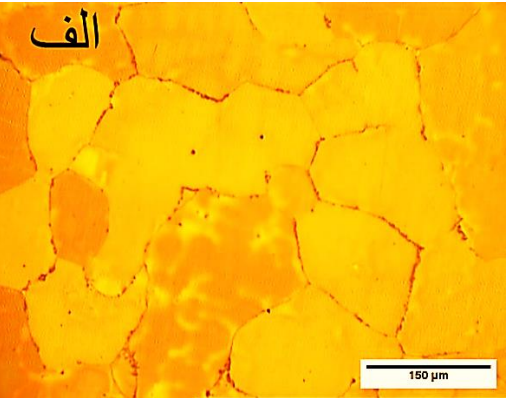
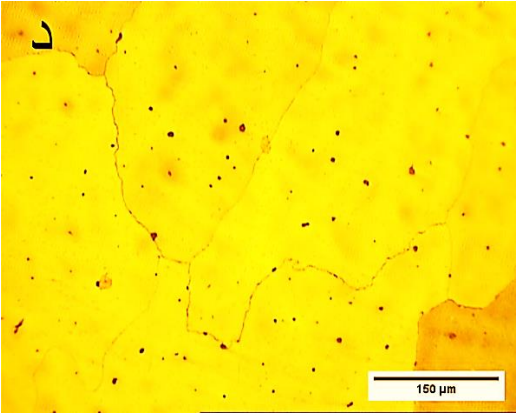
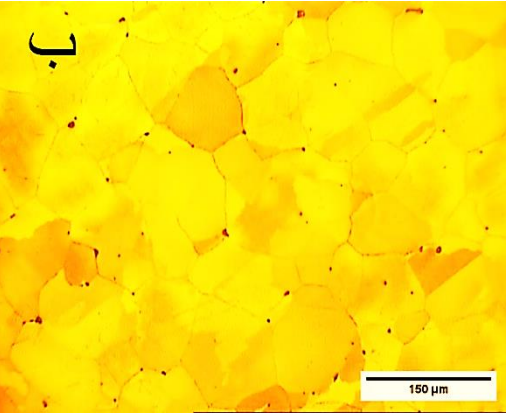
بررسی سطوح سایش و آنالیز نقطه‌ای EDS بر روی سطوح سایش، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. جهت بررسی تغییرات ساختار از دستگاه پراش پرتو ایکس با تابش گر $\text{CuK}\alpha$ با طول موج 1.54 \AA استفاده شد.

جدول ۲- متغیرهای آزمایش سایش و مقادیر آن

مقدار	متغیر
۱۳۰	نیروی اعمالی (نیوتن)
۲۰۰	سرعت چرخش (دور بر دقیقه)
۴۳۰.۹	مسافت سایش (متر)
هوا	شرایط محیطی
25 ± 5	دما (درجه سانتی‌گراد)
۲/۴	شتاب حرکتی (متر بر ثانیه)
۳۰	زمان آزمایش (دقیقه)
۳۵۰	سرعت ریزش ساینده (گرم بر دقیقه)
ماسه سیلیسی (۲۱۲-۳۰۰ میکرومتر)	ساینده
۲۳۰	قطر دیسک ساینده (میلیمتر)

جهت بررسی دقیق‌تر کاربیدهای موجود، آنالیز عنصری EDS از سطح نمونه ۱۷ درصد منگنز انجام شد. همان‌گونه که در شکل (۳) قابل مشاهده است، در تشکیل این کاربیدها به احتمال زیاد عناصر کروم، منگنز، آهن و سیلیسیم حضور دارند.

آستنیتی می‌شوند [۱۳،۲]. بنابراین بایستی عملیات آنیل انحلالی با هدف حذف این کاربیدها انجام شود. شکل‌های (۲-ب) و (۲-د)، ریزساختار نمونه‌ها پس از عملیات آنیل انحلالی در دمای 1100°C و به مدت ۲ ساعت و سپس کوئنچ در آب را نشان می‌دهد. کاربیدها در ساختار انحلال یافته و ساختاری حاوی دانه‌های آستنیت ایجاد شده است.

		ریختگی
		
Fe-17Mn	Fe-7Mn	آلیاژ

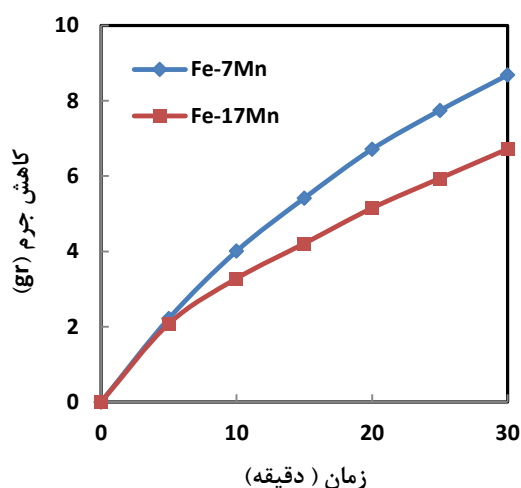
شکل ۲- ریزساختار نمونه‌های پر منگنز آستنیتی: الف) Fe-7Mn ریخته‌گری، ب) Fe-7Mn عملیات حرارتی آنیل انحلالی شده، ج) Fe-17Mn ریخته‌گری و د) Fe-17Mn عملیات حرارتی آنیل انحلالی شده

جدول ۳- نتایج آزمایش‌های سختی و کشش و سایش نمونه‌های پر منگنز آستنیتی

نمونه	میکرو سختی (HV)	ماکرو سختی (HV)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	درصد ازدیاد طول	کاهش جرم در آزمایش سایش (g)
Fe-7Mn	۲۱۳	۱۹۱	۴۶۱	۶۷۴	$16/6 \pm 0/6$	۸/۶۹
Fe-17Mn	۲۹۰	۲۱۸	۴۷۹	۷۴۵	$26 \pm 0/5$	۶/۷۲

سایش از هر دو نمونه ۷ و ۱۷ درصد وزنی منگنز عملیات حرارتی شده انجام پذیرفت. نتایج حاکی از آن است که انجام آزمایش سایش موجب بالا رفتن میزان سختی در سطح نمونه شد و همین موضوع بهبود مقاومت به سایش با گذشت زمان و کاهش نرخ سایش را توجیه می‌نماید. جدول (۴)، مقایسه نتایج میکروسختی را در دو حالت قبل و بعد از آزمایش سایش نشان می‌دهد.

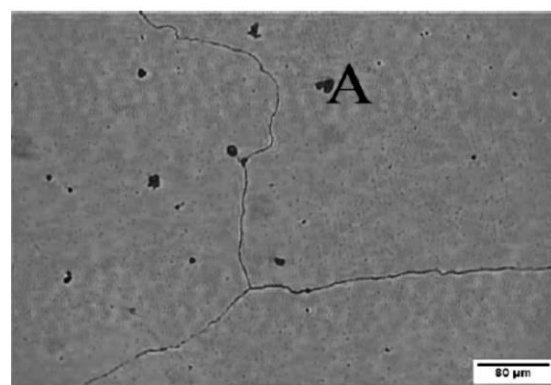
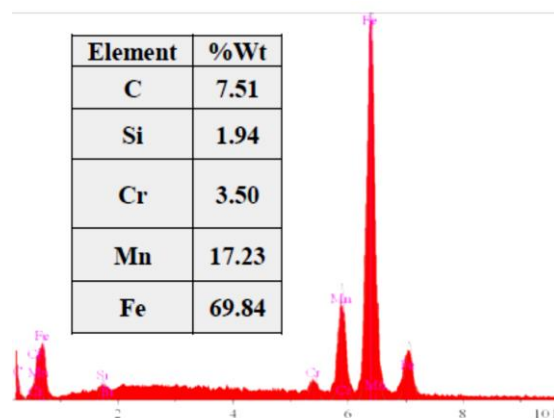
مقایسه کلی نتایج آزمایش کشش نشان از افزایش بسیار جزئی استحکام تسلیم با افزایش درصد وزنی عنصر منگنز دارد. نتایج حاصل شده، با نتایج هادفیلد [۲] و تحقیقات Hofer [۳۱] هم‌خوانی دارد. در مطالعات انجام شده، به تأثیر بسیار اندک افزایش این عنصر بر افزایش استحکام



شکل ۴- نمودار میزان کاهش جرم بر حسب زمان در دو نمونه فولاد پر منگنز آستنیتی

جدول ۴- مقایسه میکروسختی قبل و بعد از آزمایش سایش در نمونه‌های پر منگنز آستنیتی

نمونه	وضعیت	میکرو سختی (HV)
Fe-7Mn	قبل از سایش	۲۱۳±۳
	بعد از سایش	۳۱۰±۲
Fe-17Mn	قبل از سایش	۲۹۰±۱
	بعد از سایش	۳۸۱±۵



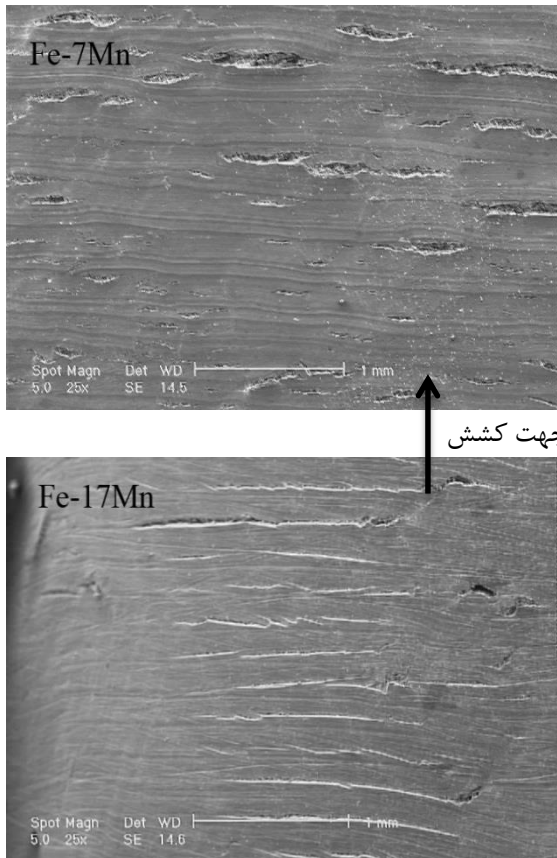
شکل ۳- آنالیز EDS از کاربیدهای ریز (نقطه A) در نمونه Fe-17Mn بعد از عملیات حرارتی

۳-۲- نتایج آزمایش‌های سختی، سایش و کشش

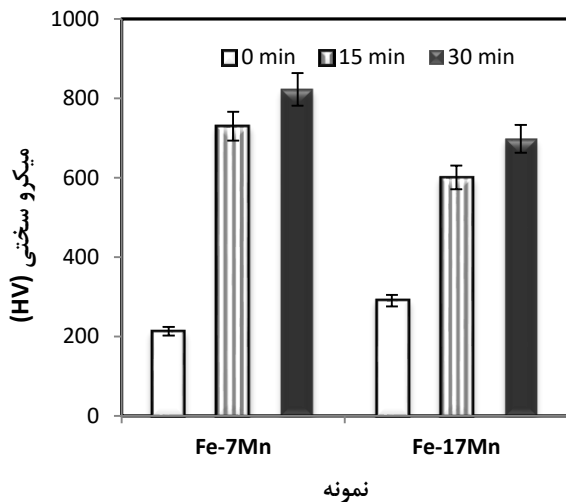
جدول (۳)، مقادیر حاصل از آزمایش‌های سختی، سایش و کشش دو نمونه پر منگنز آستنیتی را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که با افزایش درصد عنصر منگنز و تشکیل محلول جامد بعد از عملیات حرارتی، سختی در فولاد حاوی ۱۷ درصد وزنی منگنز در مقایسه با فولاد حاوی ۷ درصد وزنی منگنز، افزایش یافته است. نتایج حاصل با نتایج Tomaszewska و همکارانش [۲۹] مطابقت دارد. آن‌ها افزایش سختی از ۱۳۰ به ۱۷۸HV را با افزایش ۱۰ درصدی عنصر منگنز گزارش نمودند.

از سوی دیگر آنچه که به خوبی از جدول (۳) برمی‌آید این است که مقاومت به سایش بیشتر در نمونه ۱۷ درصد وزنی منگنز با افزایش سختی به واسطه افزایش درصد عنصر منگنز است [۳۰]. دلیل این موضوع سختی بالاتر در نمونه حاوی ۱۷ درصد وزنی منگنز است. نکته قابل توجه اینکه در حین آزمایش سایش و با گذشت زمان، میزان کاهش وزن نمونه کمتر می‌شود. شکل (۴)، نتایج حاصل از میزان کاهش جرم بر حسب زمان را به خوبی نشان می‌دهد. برای بررسی بیشتر، سختی‌سنجی میکرو در دو حالت قبل و بعد از اتمام آزمایش

آزمایش کشش این فولادها، پدیده گلوئی شدن اتفاق نیفتد [۳۲].



شکل ۵- تصاویر تهیه شده توسط SEM از پدیده چروکیدگی در سطح نمونه‌های کشش فولاد پر منگنز آستنیتی

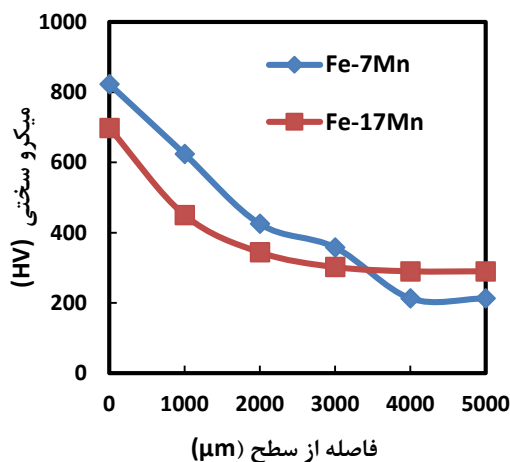


شکل ۶- اثر زمان ساچمه کوبی و مقدار منگنز بر تغییرات سختی سطحی نمونه‌های فولاد پر منگنز

تسلیم اشاره شده است [۳۱،۲]. در مقابل با افزایش درصد منگنز از ۷ درصد به ۱۷ درصد وزنی، میزان انرژی نقص چیده شدن کاهش و لذا تنش برشی لازم برای لغزش افزایش یافته و در مقابل شرایط برای کرنش دوقلوبی بالاتر تسهیل می‌شود. در نتیجه استحکام کششی بالاتری حاصل شده است [۳۲].

مطابق جدول (۳)، مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار منگنز، درصد ازدیاد طول نسبی افزایش یافته است. علت این افزایش، در ارتباط با تأثیر افزایش درصد عنصر منگنز و ایجاد ساختار مطلوب آستنیتی است [۳۳-۳۵]. زیرا بعد از عملیات حرارتی، ساختار فاقد حضور کاربید (به خصوص حالت پیوسته) است. Song و همکارانش [۳۳] در بررسی‌های خود تأثیر افزایش عنصر منگنز بر افزایش میزان چقرمگی را مشاهده نمودند. Mahlami و همکاران [۳۴] نیز افزایش درصد ازدیاد طول نسبی با افزایش درصد منگنز را گزارش کردند. نتایج نشان از افزایش ۴۰ درصدی در میزان ازدیاد طول به واسطه افزایش درصد وزنی عنصر منگنز از ۱۳ به ۲۶ درصد داشت. ضمن اینکه در نتایج Tomaszewska و همکاران [۲۹] نیز درصد ازدیاد طول بالا به واسطه حضور میزان منگنز با مقادیر بالا گزارش شده بود. پدیده قابل توجه در حین آزمایش کشش فولادهای پر منگنز آستنیتی، چروکیدگی سطحی یا به اصطلاح پوست پرتقالی شدن سطح نمونه‌های کشش است. تصاویر SEM از سطح نمونه کشش در شکل (۵) آورده شده است که وقوع این پدیده را به خوبی نشان می‌دهد. محققان این رفتار را به تغییر شکل ناهمگن دانه‌ها مرتبط دانسته‌اند و معتقدند که چروکیدگی زمانی رخ می‌دهد که تغییر شکل تنها در یک دستگاه لغزش رخ دهد. علت این پدیده، ایجاد کرنش حجمی و چرخش دانه‌ها در اثر اعمال نیروی کشش است. کرنش و چروکیدگی سطحی سبب ایجاد تنش‌های برشی در سطح می‌شوند و در نتیجه، سطح که استحکام و چقرمگی کمتری نسبت به درون ماده دارد، دچار ترک می‌شود. از سوی دیگر، به علت کار سخت شدن لایه‌های زیر سطحی و چقرمگی بیشتر آن، ترک‌های تشکیل شده با برخورد با لایه‌های ریز دوقلوبی، امکان نفوذ به عمق قطعه را ندارند و رشد آن‌ها در حد چند میکرومتر محدود می‌شود. بنابراین ترک‌های سطحی قادر به رشد به درون دانه نیستند و به این ترتیب نمی‌تواند عامل شکست باشد. می‌توان گفت که پخش شدن کامل چروکیدگی در سطح موجب آن گردیده، که در حین

شده است. مشاهده می‌شود که با نفوذ از سطح به عمق از میزان تاثیر عملیات کارسختی سطحی توسط عملیات ساچمه‌کوبی کاسته شده و بالاترین میزان تاثیرگذاری در سطح حاصل شده است.



شکل ۷- اثر عملیات ساچمه‌کوبی بر توزیع سختی از سطح تا عمق در دو نمونه فولاد با منگنز مختلف

با اعمال عملیات کارسختی سطحی، سختی به واسطه تغییر ساختار از آستنیت به مارتنزیت [یا دوقلویی] افزایش می‌یابد [۱۳]. این تغییر ساختار در لایه‌های سطحی رخ داده است. برای بررسی بیشتر از دو نمونه عملیات حرارتی شده و ساچمه‌کوبی شده در فولاد حاوی ۷ درصد وزنی منگنز، آنالیز XRD انجام شد. همان‌طوری که در شکل (۸) مشخص است، در نمونه‌ای که تحت تاثیر عملیات ساچمه‌کوبی قرار گرفته است، مارتنزیت به وجود آمده است. در حالی که ساختار نمونه عملیات حرارتی شده آستنیتی است. ایجاد مارتنزیت ناشی از تبدیل آستنیت به مارتنزیت در اثر عملیات ساچمه‌کوبی است. از سوی دیگر در نمونه ۱۷ درصد وزنی منگنز به علت حضور عنصر منگنز با درصد بالا و پایداری فاز آستنیت مکانیزم کارسختی، ایجاد ساختار ریزدانه (نانو کریستالی) در سطح ساچمه‌کوبی شده است. یان و همکاران [۱۸] در بررسی خود با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مشاهده نمودند که به واسطه انجام عملیات ساچمه‌کوبی در سطح نمونه‌ها، ساختار ریز دانه‌تر و سختی سطحی افزایش و در نتیجه مقاومت به سایش بهبود یافته بود.

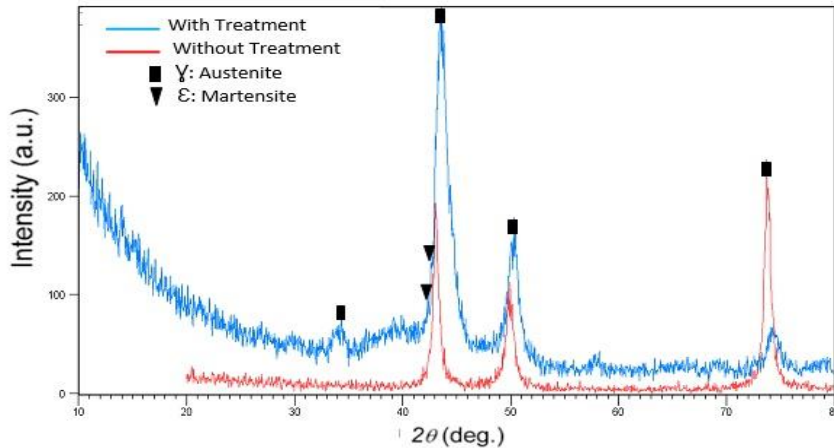
۳-۳- بررسی تاثیر عملیات ساچمه‌کوبی بر سختی

برای بررسی تاثیر عملیات ساچمه‌کوبی بر سختی سطحی، این عملیات بر روی سطح نمونه‌های پر منگنز آستنیتی در زمان‌های ۱۵ و ۳۰ دقیقه انجام شد. نتایج حاصله در شکل (۶) ارائه شده است که از آن می‌توان مشاهده نمود که:

(۱) در حضور عنصر منگنز و درصد بالای آن در هر دو نمونه، قابلیت کارسختی افزایش یافته و بنابراین با انجام عملیات ساچمه‌کوبی، به دلیل انجام کار سختی بیشتر و ریز شدن دانه‌های سطحی [۱۸]، سختی در لایه‌های سطحی افزایش یافته و هم‌چنین با افزایش زمان ساچمه‌کوبی (۱۵ به ۳۰ دقیقه) این اثر شدیدتر و لذا سختی افزایش بیشتری می‌یابد [۱۳، ۳۶-۳۷]. این نتایج با نتایج سایر محققین تطابق دارد. یان و همکاران [۱۸] نیز با اقدام به عملیات ساچمه‌کوبی بر روی سطح نمونه‌های پرمنگنز، افزایش سختی از ۲۵۶ به ۶۷۶ HV را با افزایش زمان این عملیات از ۲ دقیقه به ۶۰ دقیقه گزارش نموده‌اند. نجف‌آبادی و همکاران [۱۳] با اعمال کارسختی اولیه توسط ضربات پتک، رشد ۱۱ درصدی سختی در فولاد هادفیلد حاوی ۰/۶ درصد تیتانیوم را گزارش نمودند.

(۲) افزایش سختی سطحی حاصل از عملیات ساچمه‌کوبی در نمونه ۷ درصد وزنی منگنز در مقایسه با نمونه ۱۷ درصد وزنی منگنز در هر دو زمان ۱۵ و ۳۰ دقیقه ساچمه‌کوبی بیشتر است. دلیل این موضوع آن است که در نمونه با ۷ درصد منگنز، پایداری آستنیت کمتر بوده و لذا تاثیر عملیات کارسختی برای استحاله آستنیت به مارتنزیت بیشتر است. هی و همکاران [۳۸] در بررسی خود نتایج یکسانی را مشاهده نمودند. آنها گزارش کردند که فولاد عملیات حرارتی شده با درصد منگنز متوسط در مقایسه با فولاد هادفیلد مرسوم تحت نیروهای ضربه‌ای به سختی بالاتر از ۷۰۰ HV رسیده است، به گونه‌ای که نتایج آزمایش سایش از بهبودی ۶۴ الی ۱۴۶ درصدی این نمونه‌ها در مقابل نمونه هادفیلد مرسوم و نیز فولاد عملیات حرارتی نشده را نشان داده بود.

در شکل (۷)، نتایج سختی‌سنجی از سطح تا عمق هر دو نمونه پر منگنز آستنیتی ساچمه‌کوبی شده در زمان ۳۰ ارائه



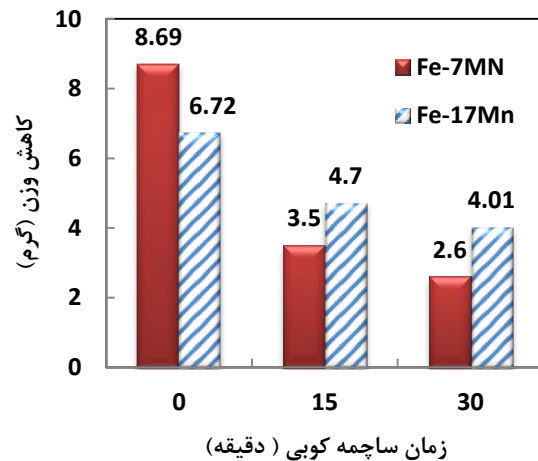
شکل ۸- آنالیز اشعه ایکس از سطح نمونه عملیات حرارتی شده و نمونه ساچمه‌کوبی در نمونه حاوی ۷ درصد وزنی منگنز

همکاران [۱۳] نیز از بهبود مقاومت سایشی به واسطه افزایش سختی حاصل از کارسختی ضربات پتک حتی در فواصل طولانی سایش داشت. البته بایستی به این نکته اشاره داشت که نمونه ۷ درصد منگنز به علت دستیابی به سختی سطحی بالاتر مقاومت به سایش مطلوب‌تری را ارائه نموده است.

۳-۵- بررسی سطوح سایش و تعیین مکانیزم

در شکل (۱۰)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح ساییده‌شده نمونه‌های پر منگنز آستنیتی در شرایط مختلف ساچمه‌کوبی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به علت ایجاد شیارهای موازی در سطح، مکانیزم سایش غالباً از نوع خراشان است [۴۰-۳۹]. همچنین بر اساس داده‌های شکل (۶) و تصاویر میکروسکوپی شکل (۱۰-الف، ت و ج) یا شکل (۱۰-ب، پ و ث)، مشاهده می‌شود که با افزایش میزان ساچمه‌کوبی و افزایش سختی هر دو نمونه‌های پرمنگنز، عمق و عرض شیارهای ایجاد شده کاهش می‌یابد که تاثیر عملیات ساچمه‌کوبی را بر افزایش مقاومت به سایش نشان می‌دهد. در واقع با کارسخت شدن سطح در اثر عملیات ساچمه‌کوبی، شرایط برای تغییر شکل پلاستیک اولیه و نفوذ مواد سخت‌ساینده به داخل سطح سخت‌تر می‌شود و از این طریق، مقاومت به سایش در مراحل اولیه سایش که سختی سطح بسیار پایین است، بهبود می‌یابد [۳، ۱۲].

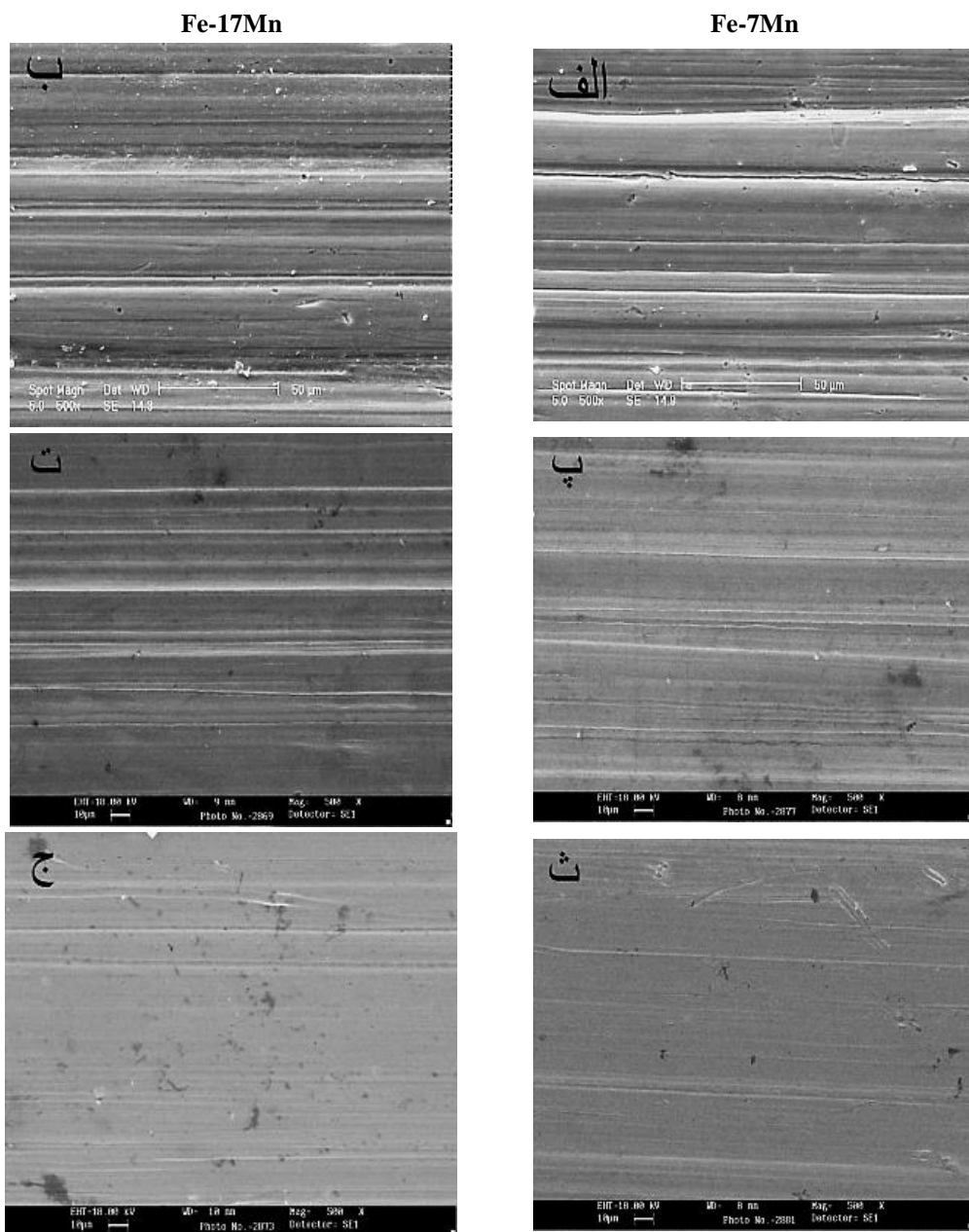
آنالیز عنصری EDS از سطح سایش یافته نمونه ۱۷ درصد وزنی منگنز در حالت الکترون برگشتی در شکل (۱۱) آورده شده است. مشخص است که در حین آزمایش سایش، مکانیزم تریوشیمیایی رخ نداده است.



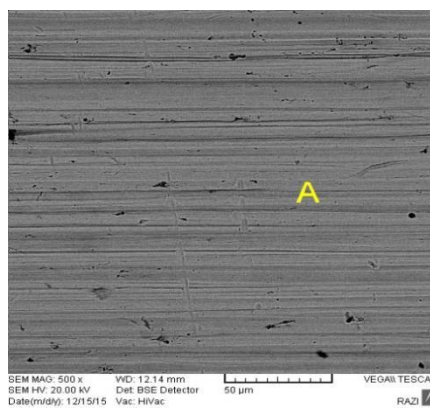
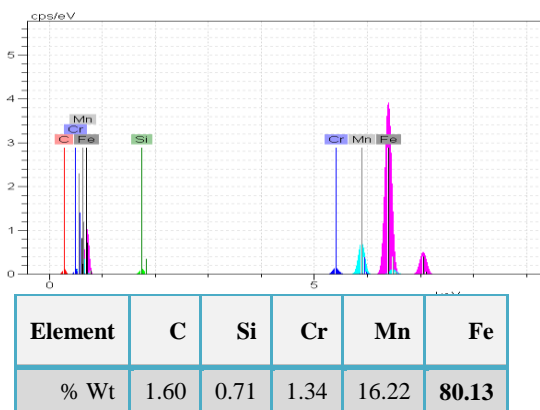
شکل ۹- میزان کاهش وزن نهایی نمونه‌های پر منگنز آستنیتی بعد از عملیات ساچمه‌کوبی در آزمون سایش

۳-۴- نتایج آزمایش سایش بعد از عملیات ساچمه‌کوبی

شکل (۹) میزان کاهش وزن نهایی نمونه‌های پر منگنز آستنیتی بعد از عملیات ساچمه‌کوبی در آزمون سایش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در هر دو نمونه پرمنگنز آستنیتی با افزایش زمان ساچمه‌کوبی و به تبع آن افزایش میزان سختی سطحی، میزان مقاومت به سایش روند صعودی به همراه داشته است. این به دلیل وقوع کار سختی، ایجاد ساختار مارتنزیتی و نیز ریزش دانه‌ها در اثر اعمال کار مکانیکی حاصل از عملیات ساچمه‌کوبی است [۱۴، ۱۸]. کمترین نرخ سایش در نمونه‌های ۳۰ دقیقه ساچمه‌کوبی مشاهده شد. یان و همکاران [۱۸] در بررسی تاثیر عملیات ساچمه‌کوبی بر مقاومت سایشی فولاد هادفیلد مرسوم، بهبودی ۷۲ درصدی در مقاومت به سایش حاصل از عملیات ۳۰ دقیقه ساچمه‌کوبی را گزارش نمودند. نتایج نجف‌آبادی و



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح سایش یافته نمونه‌های پر منگنز آستنیتی: (الف) ۷ درصد منگنز عملیات حرارتی شده، (ب) ۱۷ درصد منگنز عملیات حرارتی شده، (پ) ۷ درصد منگنز - ۱۵ دقیقه ساچمه‌کوبی، (ت) ۱۷ درصد منگنز - ۱۵ دقیقه ساچمه‌کوبی، (ث) ۷ درصد منگنز - ۳۰ دقیقه ساچمه‌کوبی، (ج) ۱۷ درصد منگنز - ۳۰ دقیقه ساچمه‌کوبی



شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز عنصری EDS از نقطه A در سطح سایش نمونه حاوی ۱۷ درصد وزنی منگنز

- [4] Agunsoye J., Isaac T., Abiona A., On the comparison of microstructure characteristic and mechanical properties of high chromium white iron with the Hadfield austenitic manganese steel, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2013, 1, 24-28.
- [5] Srivastava A., Das K., Microstructural characterization of Hadfield austenitic manganese steel, *Journal of Materials Science*, 2008, 43, 5654-5658.
- [6] Fattah-Alhosseini A., Izadia B., Asadi-Asadabad M., Evaluation of corrosion behavior on Mn-Cr austenitic steels using 0.1M HCl solution, *Journal of Advanced Materials and Processing*, 2014, 2(1) 55-63.
- [7] Si H., Xiong R., Song F., Wen Y., Pen H., Wear resistance of austenitic steel Fe-17Mn-6Si-0.3C with high silicon and high manganese, *Journal of Acta Metall*, 2014, 27, 352-358.
- [8] Dastur Y.N., Leslie W.C., Mechanism of work hardening in Hadfield manganese steel, *Metallurgical Transaction A*, 1981, 12(5) 479-759.
- [9] Guo S.L., Sun D.Y., Zhang F.C., Feng X.Y., Qian L.H., Damage of Hadfield steel crossing due to wheel rolling impact passages, *Wear*, 2013, 305, 267-273.
- [10] Razavi Gh. Ansaripour R.A., Monajatizadeh A. H., Toroghinejad M.R., An investigation on full annealing temperature and annealing twins density in Fe-33Mn-3Si-2Al high-manganese steel, *Journal of Advanced Materials and Processing*, 2013, 1(1) 3-8.
- [۱۱] عباسی، م.، حجازی ج.، خیراندیش ش.، خرازی ی.، تاثیر آلومینیم بر رفتار تریبولوژیکی فولاد هادفیلد تحت سایش آرام. *مجله علوم و مهندسی سطح*، ۱۳۹۵، ۲۹، ۵۵-۶۷.
- [۱۲] عباسی، م.، خیراندیش ش.، خرازی ی.، حجازی ج.، بررسی تاثیر برخی عوامل اصلی بر رفتار سایشی فولاد هادفیلد. *مجله علوم و مهندسی سطح*، ۱۳۸۸، ۷، ۶۹-۸۰.
- [13] Najafabadi V.N., Amini K., Alamdarlo M.B., Investigating the effect of titanium addition on the wear resistance of Hadfield steel, *Metallurgical Research Technology*, 2014, 111, 375-382.
- [14] Silman G.I., Pristuplyuk N.I., Froltov M.S., Effect of vanadium on the structure and properties of high manganese steel, *Journal of Metal Science and Heat Treatment*, 1980, 22, 124-127.
- [15] Akeel D., Omar A., Phase transformations of Hadfield manganese steels, *Journal of Engineer and Technology*, 2007, 25(26) 227-289.
- [16] Abbasi M., Kheirandish, Sh., Kharrazi Y., Hejazi J., On the comparison of the abrasive wear behavior of aluminum alloyed and standard Hadfield steels, *Wear*, 2010, 268, 202-207.
- [17] Si H., Xiong R., Song F., Wen Y., Pen H., Wear resistance of austenitic steel Fe-17Mn-6Si-0.3C with high silicon and high manganese, *Journal of Acta Metall.*, 2014, 27, 352-358.
- [18] Yan W, Fang L, Sun K, Xu Y, Effect of surface work hardening on wear behavior of Hadfield steel, *Materials Science and Engineering A*, 2007, 460-461, 542-549.
- [19] Torabi S.A., Amini K., Gharavi F., The effect of shot peening and precipitation hardening on the wear behavior of high manganese austenitic steels, *Metallurgical Research and Technology*, 2017, 114, 1-6.
- [20] ASTM: E8 / E8M – 16a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2004.

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- در هر دو نمونه فولاد با درصد منگنز ۷ و ۱۷ درصد، با انجام عملیات حرارتی آنیل انحلالی در دمای 1100°C به مدت ۲ ساعت، کاربیدهای پیوسته حذف و ساختاری حاوی دانه‌های آستنیت ایجاد می‌شود.
- ۲- با افزایش عنصر منگنز از ۷ به ۱۷ درصد وزنی پس از عملیات حرارتی آنیل انحلالی، سختی در حدود ۲۷ درصد، ازدیاد طول در حدود ۳۶ درصد، استحکام تسلیم در حدود ۳ درصد، استحکام نهایی در حدود ۱۰ درصد و مقاومت به سایش در حدود ۲۳ درصد افزایش یافت.
- ۳- به واسطه اعمال عملیات ساچمه‌کوبی به دلیل کارسختی سطحی، ایجاد فاز مارتنزیت (در فولاد حاوی ۷ درصد وزنی منگنز) و ایجاد دانه‌های نانوسایز در سطح، سختی سطحی را افزایش داده و با افزایش زمان ساچمه‌کوبی از ۱۵ به ۳۰ دقیقه این افزایش سختی بیشتر می‌شود.
- ۴- پس از اعمال کار سختی سطحی توسط عملیات ساچمه‌کوبی، سختی و مقاومت سایشی در نمونه ۷ درصد وزنی منگنز نسبت به نمونه ۱۷ درصد منگنز بهبود یافت. دلیل این موضوع پایداری کمتر آستنیت در نمونه ۷ درصد وزنی منگنز است که موجب شده تاثیر عملیات ساچمه‌کوبی در ایجاد مارتنزیت در این نمونه بیشتر باشد. بررسی سطح نمونه‌های سایش حاکی از وقوع مکانیزم سایش خراشان است. با افزایش سختی نمونه‌ها، مقاومت در برابر سایش خراشان بیشتر و لذا سطح سایش دارای شیارهای کمتر و ضمناً عمق شیارها نیز کمتر است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود وظیفه می‌دانند از همکاری مدیریت و کارکنان شریف شرکت‌های صنایع ریخته‌گری اصفهان و سپاهان پیچ، تشکر و قدردانی نمایند.

مراجع

- [1] Liu F.C., Lv B., Zhang F.C., Yang S., Enhanced work hardening in Hadfield steel during explosive treatment, *Materials Letters*, 2011, 65, 2333-2336.
- [2] Subramanya D.K., Swansiger A.E., Avery H.S., Austenitic Manganese Steel, *ASM Metals Handbook*, Vol. 1, 10th edition, 1993, 822-840.
- [۳] عباسی، م.، خیراندیش ش.، خرازی ی.، حجازی ج.، استفاده از سنگ ساینده جهت ارزیابی رفتار سایشی فولادها، *نشریه مهندسی متالورژی و مواد*، ۱۳۹۰، ۲۱(۲) ۵۷-۷۰.

behavior of 100Cr6 alloy steel, *Kovove Mater.*, 2014, 52, 163-169.

- [21] ASTM: E415 - 99a, Standard Test Method for Optical Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel, 1999.
- [22] DIN 50125, Testing of Metaliv Materials Tensile Test Pieces, 2009.
- [23] ASTM: E92-82, Standard Test Methods for Vickers Hardness Hardness of Metallic Materials.
- [24] ASTM: E384-16, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, 2005.
- [25] ASTM G65-00, Standard Test Method for Measuring Abrasion using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, 2010.
- [26] Tasker J., Austenitic manganese steel fact and fallacy, *Technical Advances in Steel Casting England*, 1983, 15, 1-13.
- [27] Jiang W. H., Pan W. D., Ren Y. L., Han X. L., In-situ Formation of TiC /Hadfield Steel Composites, *Journal of Materials Science Letters*, 1998, Vol.17, pp.1527-1529.
- [28] Subramanyam D.K., Grub G., Chapin H., Austenitic Manganese steel Casting, *ASM Metals Handbook*, 9th edition, 1993, 9, 237-241.
- [29] Tomaszewska A., Jablonska M., Hadasik E., Niewieski G., Kawalla R., Research of selected properties of high manganese steel wires, *Materials Science and Engineering*, 2011, 22, 1-6.
- [30] Atabaki M., Jafari S., Abdollah-pour H., Abrasive wear behavior of high chromium cast iron and hadfield steel-a comparison, *Journal of Iron and Steel Research*, 2012, 19, 43-50.
- [31] Hofer S., Schestak M., Comparison of austenitic high-Mn-steels with different Mn and C-contents regarding their processing properties, *Journal of BMH*, 2011, 156, 99-104.
- [۳۲] عباسی، م.، خیراندیش، ش.، حجازی، ج.، خرازی، ی.، ارتباط بین کرنش دوقلوبی و پدیده‌ی چروکیدگی سطحی در تغییر شکل مومسان فولاد آستنیتی منگنزی، نشریه مهندسی متالورژی و مواد، ۱۳۹۳، ۲۵(۲) ۱-۱۲.
- [33] Song C., Xia W., Zhang J., Guo Y., Zhai Q., Microstructure and mechanical of Fe-Mn based alloys after sub-rapid solidification, *Journal of Materials and design*, 2013, 51, 262-267.
- [34] Mahlami C.S., PAN X., An overview on high manganese steel casting, *World Foundry Congress*, 2014, 1-10.
- [35] Alaneme K.K., Folorunso D.O., Aramide F.O., Aribo S., Effect of precipitation hardening on hardness and microstructure of austenitic manganese steels, *Journal of Mineral and Materials Characterization & Engineering*, 2010, 9(2) 157-164.
- [36] Krauss G., *Heat Treatment and Processing Principles*, ASM International, Second Edition, 1990.
- [37] Xiaodong D., Guodong S., Yifei W., Jianfeng W., Haoyu Y., Abrasion behavior of high manganese steel under low impact energy and corrosive conditions, *Advances in Tribology*, 2009, 1-5.
- [38] He Zh. M., Jiang Q., Fu Sh., Xie J., Improved work-hardening ability and wear resistance of austenitic manganese steel under non-severe impact-loading conditions, *Wear*, 1987, 120, 305-319.
- [39] Kato K., Adhachi K., *Modern Tribology Handbook*, CHRC Press, 2001.
- [40] Paydar H., Amini K., Akhbarizadeh A., Investigating the effect of deep cryogenic heat treatment on the wear