

# بررسی تاثیر کار سختی اولیه بر رفتار سایشی فولاد پر منگنز آستنیتی

سید امین ترابی<sup>۱</sup>، کامران امینی<sup>۲\*</sup>، مصعب ناصری<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد تیران، دانشگاه آزاد اسلامی، تیران، اصفهان، ایران

۳- دانشیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۴- کارشناس ارشد، واحد تحقیق و توسعه شرکت صنایع ریخته گری اصفهان، اصفهان، ایران

\*K\_amini@iautiran.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۱۷)

## چکیده

در این پژوهش به بررسی رفتار سایشی فولاد پر منگنز آستنیتی با ترکیب اسمی Fe-17Mn-1.5Cr-0.6Si-1.2C تحت تاثیر کارسختی اولیه حاصل از اعمال دو فرآیند سخت کاری شامل ضربات یکنواخت پتک و شات پینینگ پرداخته شد. بدین منظور نمونه‌های حاصل از ریخته‌گری در قالب‌های ماسه‌ای تحت عملیات حرارتی آنیل انحلالی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت و سپس کوئنچ در آب قرار گرفتند و سپس نمونه‌سازی به کمک دستگاه وایرکات صورت پذیرفت. کار سختی اولیه به دو روش یکی با کمک ضربات یکنواخت پتک تحت نیروی ۱۰۰ تن به تعداد ۳۰۰ و ۶۰۰ ضربه و دیگری شات پینینگ کردن نمونه‌ها به مدت زمان ۱۵ و ۳۰ دقیقه اعمال گردید. آزمون‌های سختی، کشش، ضربه و سایش به روش چرخ ساینده-ماسه خشک بر روی نمونه‌ها انجام شد. جهت بررسی ساختار از میکروسکوپ نوری و جهت بررسی سطوح کشش و سایش از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد که فولاد مذکور در حالت کار سخت نشده در مقایسه با دیگر تحقیقات انجام شده از استحکام و مقاومت به ضربه بالاتری برخوردار بوده است. از طرف دیگر نتایج، افزایش میزان کار سختی در حضور درصد بالای عنصر منگنز و افزایش عدد سختی از HV ۲۹۰ به مقادیر HV ۶۵۳ و HV ۶۹۸ به ترتیب با اعمال ۶۰۰ ضربه پتک و ۳۰ دقیقه شات پینینگ را نشان داد. در نتیجه بهترین مقاومت به سایش به علت سختی سطحی بالاتر و در نتیجه کاهش وزن کمتر در دقایق اولیه سایش در نمونه ۳۰ دقیقه شات پینینگ مشاهده گردید. همچنین بررسی سطوح سایش نشان از خراشان بودن مکانیزم سایش با حضور خطوط موازی در سطح سایش داشته و با افزایش سختی در اثر اعمال کار سختی اولیه از عمق و تعداد شیارهای خراشان کاسته شد.

## کلمات کلیدی:

فولاد آستنیتی، فولاد پر منگنز، شات پینینگ، کار سختی، سختی، مقاومت به سایش.

## ۱- مقدمه

بهبود کارایی فولادها در صنعت همواره موضوع مورد مطالعه محققان بوده است. در این میان فولادهای پر منگنز آستنیتی با داشتن خواص مطلوبی همچون چقرمگی، انعطاف پذیری، قابلیت کار سختی [۱-۲] و مقاومت در برابر سایش [۳] در نوع

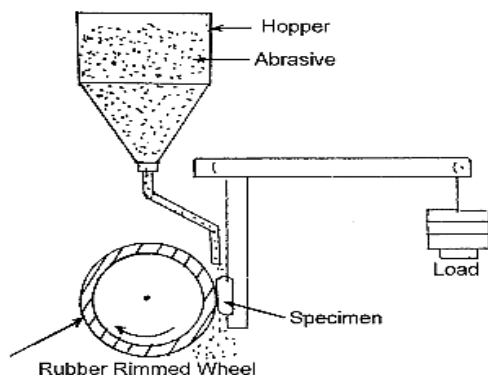
بین استفاده از فولادهای با درصد منگنز بالاتر (۱۵٪)، برای کاربردهایی که قابلیت نفوذ مغناطیسی پایینی دارند، اخیراً توسعه داده شده‌اند. استحکام و چقرمگی در دمای پایین از جمله خصوصیات این فولادهاست [۱۴]. تحقیقات نویسنده و همکاران نیز نشان داد که با افزایش اسمی درصد عنصر منگنز از ۱۲ به ۱۷ درصد وزنی، استحکام نهایی و مقاومت سایشی به ترتیب ۱۵ و ۶ درصد در مقایسه با فولاد هادفیلد مرسوم بهبود یافته است [۱۵]. با توجه به کاربردهای استراتژیک فولادهای پر منگنز آستنیتی در صنعت و تحمیل هزینه‌های سنگین توقف خط جهت تعویض قطعات مستهلک شده و حصول نتایج مطلوب از فولاد با درصد منگنز بالا عاملی گشت تا در این پژوهش به بررسی تاثیر اعمال کار سختی اولیه حاصل از ضربات پتک و شات پینینگ بر خواص سایشی فولاد پر منگنز آستنیتی با درصد اسمی Fe-1.2C-0.6Si-1.5Cr-17Mn پرداخته شود.

## ۲- مواد و روش انجام تحقیق

آلیاژ مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از ذوب قراضه فولاد هادفیلد، فرومنگنز، فرو کروم، کربن و فرو سیلیس توسط کوره القایی در شرکت صنایع ریخته‌گری اصفهان تهیه و درون قالب‌های ماسه‌ای به شکل Y بلوک بر اساس استاندارد E8 ASTM ریخته‌گری شد [۱۶]. ترکیب شیمیایی آلیاژ کنترل شده توسط دستگاه کوآتومتری Fundry Master 2005 در جدول (۱) قابل مشاهده است. عملیات حرارتی آنیل انحلالی در دمای ۱۱۰۰ °C و به مدت ۲ ساعت و سپس کوئنچ سریع در آب، جهت انحلال کاربیدها انجام پذیرفت [۸]. آماده سازی نمونه‌ها نیز توسط دستگاه وایرکات<sup>۳</sup> صورت گرفت. ریز ساختار نمونه‌ها در دو حالت قبل و بعد از عملیات حرارتی توسط میکروسکوپ نوری صا ایران مدل IMM-420.3 تهیه شد و اندازه متوسط دانه‌ها به کمک روش خطی طبق استاندارد ASTM E112 محاسبه گردید [۱۷].

خود منحصر به فرد می باشند و در صنایع بزرگی همچون معدن، مس، سیمان، راه آهن و خودرو کاربرد دارند [۴-۶]. نکته مهم در مورد این فولادها سختی پایین در محدوده HB ۲۵۰-۲۰۰ آنها پس از انجام عملیات آنیل انحلالی می‌باشد [۱]. همین موضوع موجب گردیده این فولادها، در ابتدای دوره کاری خود از مقاومت به سایش پایینی برخوردار باشند [۷]. با توجه به کاربردهای ذکر شده، تحقیقات متنوعی در راستای بهبود خواص و کارایی این فولادها انجام شده است. نجف آبادی و همکاران نسبت به افزودن عنصر تیتانیم به فولاد هادفیلد<sup>۱</sup> نوع مرسوم اقدام و مشاهده نمودند که هر چند با افزایش ۰/۶ درصدی عنصر تیتانیم سختی بهبود یافته، ولی به همان نسبت چقرمگی فولاد مذکور به علت تشکیل کاربیدهای پایدار TiC، کاهش یافته بود [۸]. در همین راستا، در دو پژوهش در زمینه تاثیر عنصر وانادیم نیز مشاهده گردید 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 یافته بود [۹-۱۰]. همچنین نتایج مطالعات نشان از افزایش چشمگیر سختی و به طبع آن بهبود مقاومت به سایش با افزایش درصد عنصر سیلیسیم و در مقابل افت خواص مکانیکی به خصوص چقرمگی و مقاومت به ضربه داشت [۱۱-۱۲]. ملاحظه گردید که هر چند استفاده از عناصر آلیاژی توانسته بود مقاومت به سایش را در فولاد پر منگنز آستنیتی بهبود دهد، ولی افت مقاومت به ضربه و تحمیل هزینه‌های بالاتر ریخته‌گری موجب گردید تا استفاده از روش‌های کارسختی اولیه مورد توجه محققان قرار گیرد. در این زمینه یان و همکاران با انجام عملیات شات پینینگ<sup>۲</sup> در مدت زمان ۳۰ دقیقه بر سطح فولاد هادفیلد مرسوم بهبودی ۷۲ درصدی در مقاومت به سایش را مشاهده نمودند [۱۳]. نجف آبادی و همکاران نیز مشاهده نمودند که اعمال کار سختی اولیه توسط ضربات پتک موجب افزایش سختی از HRC ۲۷/۵ به HRC ۳۱ حاصل از استحاله آستنیت به مارتنزیت و بهبود مقاومت به سایش در فولاد هادفیلد مرسوم می‌شود [۸]. در این

خشک (شکل ۱) و بر اساس استاندارد ASTM G65-00 تحت نیروی ۱۳۰ N و در مدت زمان ۳۰ دقیقه با استپ‌های ۵ دقیقه‌ای انجام شد [۲۱]. جهت بررسی سطوح سایش و تعیین مکانیزم سایش از میکروسکوپ الکترونی روبشی LEO مدل 435VP استفاده گردید.



شکل (۱): شماتیک دستگاه سایش چرخ ساینده-ماسه خشک (ASTM G65-00)  
(00)

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی ریز ساختار

ریز ساختار نمونه پر منگنز آستنیتی در دو حالت قبل و بعد از عملیات حرارتی در شکل (۲) نشان داده شده است. حضور کاربیدهای پیوسته در مرز دانه‌ها (شکل ۲-الف) موجب افت خواص مکانیکی از جمله کاهش استحکام و چقرمگی ضربه در این فولادها می‌گردد و به علت ترد و شکننده بودن در این حالت غیر قابل استفاده هستند [۸ و ۲۲]. همانطور که شکل (۲-ب) نشان می‌دهد با اعمال سیکل عملیات حرارتی آنیل انحلالی، کاربیدهای موجود انحلال یافته و ساختار یکنواخت آستنیتی با خواص مکانیکی مطلوب حاصل گردیده است. با توجه به پیشینه این نوع فولاد و وجود درصد بالای عناصر منگنز و آهن انتظار می‌رود کاربیدهای راسب شده در مرزها از نوع کمپلکس  $(Fe, Mn)_3C$  باشد [۵، ۸]. لازم به ذکر است که کاربیدهای موجود از نوع کاربیدهای گروه I با شبکه بلوری پیچیده هستند. خاصیت این کاربیدها انحلال ساده آنها با حرارت دادن در

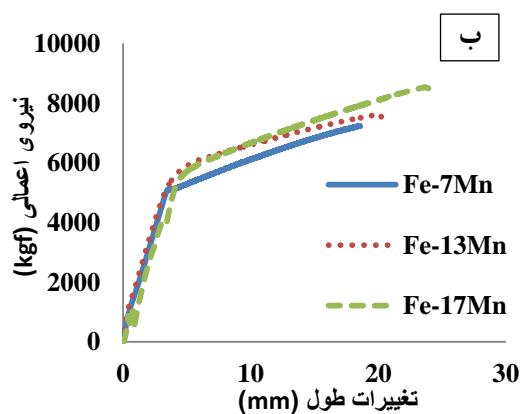
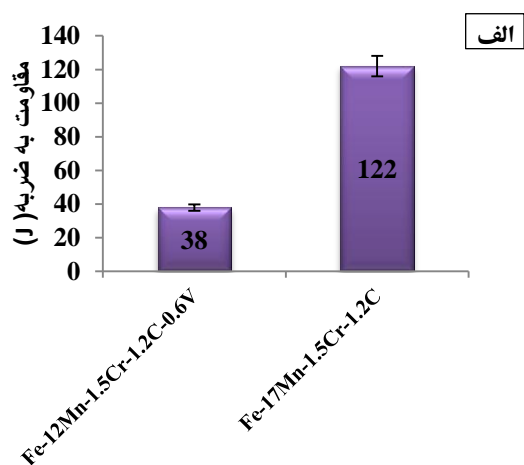
جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد پر منگنز آستنیتی ریخته‌گری شده بر حسب

درصد وزنی

عنصر	درصد وزنی
%C	۱/۲
%Mn	۱۶/۵
%Si	۰/۵۹
%Cr	۱/۵
%P	۰/۰۴
%S	۰/۰۱
%Fe	بقیه

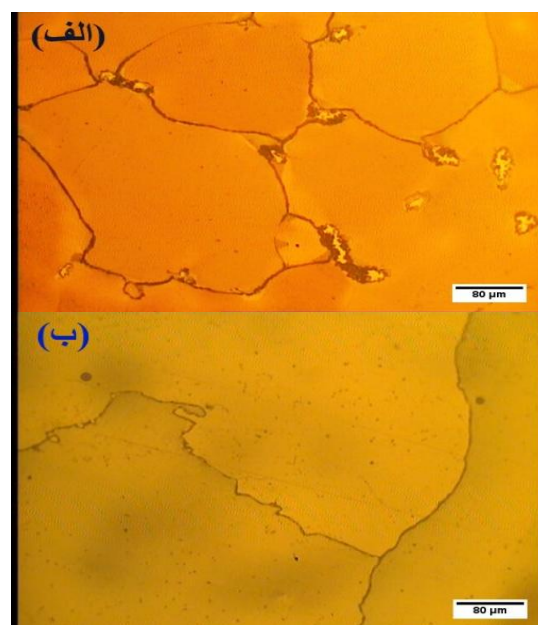
آزمون کشش به تعداد دو نمونه به شکل گرد بر اساس استاندارد DIN50125، توسط دستگاه کشش Gotech مدل-AL 7000LA20 در دمای محیط و بر روی نمونه خام انجام شد [۱۸]. آزمون ضربه بر اساس استاندارد ASTM E23، به روش شارپی به تعداد چهار نمونه با ظرفیت ۳۰۰ ژول در دمای محیط بر روی نمونه خام صورت پذیرفت [۱۹]. عملیات کار سختی اولیه توسط پتک اتوماتیک با نیروی اعمالی ۱۰۰ تن واقع در شرکت فولاد کوبان به ترتیب به تعداد ۳۰۰ و ۶۰۰ ضربه و عملیات شات پینینگ توسط دستگاه ساچمه زنی مدل S12202 واقع در شرکت سپاهان پیچ بر روی تمامی سطح نمونه‌ها صورت پذیرفت. ساچمه‌های فولادی به قطر 0.6 – 0.8 mm و با سختی 45HRC و دانسیته  $7.49 \text{ Kg/dm}^3$  توسط توربین با قدرت 15kW و تعداد دور 3000rpm در مدت زمان‌های ۱۵ و ۳۰ دقیقه بر سطح نمونه‌ها پرتاب گردید. سختی‌سنجی میکرو با کمک دستگاه کوپا مدل MH1 به روش ویکرز و با تکرار سه مرتبه برای هر نمونه در حالت قبل و بعد از اعمال کار سختی اولیه بر اساس استاندارد ASTM E384 و با اعمال نیروی ۵۰۰ gf صورت گرفت [۲۰]. آزمون سایش در راستای نزدیکی بیشتر به شرایط واقعی موجود در صنعت به روش چرخ ساینده-ماسه

پایین تر منگنز (۷ و ۱۲ درصد وزنی) که مورد پژوهش نویسنده و همکاران بوده، خواص مکانیکی (سختی، ازدیاد طول و استحکام) فولاد مذکور مطلوب تر می باشد [۱۵]. دوماً مقایسه نتایج حاصل از آزمون کشش فولاد مذکور با فولاد هادفیلد حاوی ۰/۶ درصد تیتانیم، میزان استحکام مشابهی را نشان می دهد [۸]. این در حالی است که افت ۸۰ درصدی در میزان ازدیاد طول برای نمونه حاوی تیتانیم در مقایسه با فولاد پر منگنز آستنیتی مشاهده گردیده است. سوم اینکه مقایسه مقاومت به ضربه فولاد مورد بحث با فولاد هادفیلد مرسوم حاوی ۰/۶ درصد عنصر وانادیم (فولاد با خواص مقاومت به سایش عالی در تحقیقات قبل [۹])، افت ۶۹ درصدی مقاومت به ضربه را با افزایش عنصر وانادیم نشان داده است.



شکل (۴): مقایسه نتایج آزمون: (الف): ضربه و (ب): کشش با دیگر نمونه های پر منگنز آستنیتی

دمای آستنیت در مقایسه با کاربیدهای نوع II با شبکه بلوری ساده می باشد [۲۳].



شکل (۲): ریز ساختار متالوگرافی نمونه پر منگنز آستنیتی: (الف): ریخته گری (خام) و (ب): عملیات حرارتی شده

نتایج محاسبه اندازه دانه فولاد ریخته گری شده پس از عملیات حرارتی آنیل انحلالی در جدول (۲) قابل مشاهده می باشد.

جدول (۲): عدد اندازه دانه فولاد پر منگنز آستنیتی

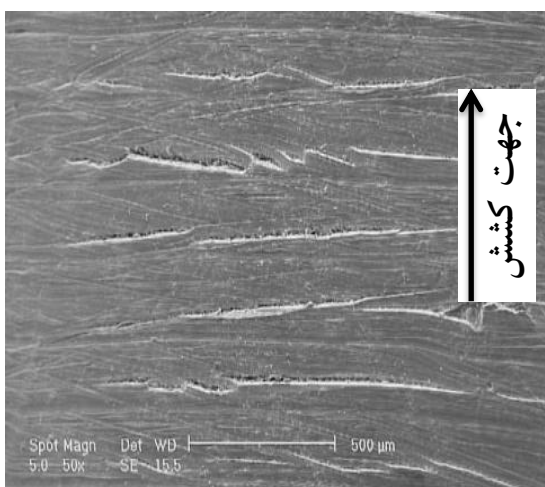
دمای ذوب	قطر متوسط دانه (μm)	عدد اندازه دانه (ASTM)
ریزی ۱۴۲۰°C	۲۰۰±۸	۱/۵

### ۳-۲- نتایج آزمون کشش، سختی و ضربه نمونه خام (بدون اعمال کار سختی)

مقایسه نتایج نهایی آزمون های کشش، سختی و ضربه نمونه خام (بدون کار سختی اولیه) با نتایج دیگر پژوهش ها در شکل (۴) و جدول (۳) آورده شده است. نتایج حاصل از این آزمون ها از چند منظر قابل بحث و بررسی می باشد. اولاً در مقایسه فولاد مورد بحث با دیگر فولادهای پر منگنز آستنیتی با درصدهای

جدول (۳): مقایسه خواص مکانیکی نمونه‌های پر منگنز آستنیتی

خواص مکانیکی	سختی (HV)	استحکام تسلیم (Mpa)	استحکام نهایی (Mpa)	ازدیاد طول (%)	مقاومت به ضربه (J)
Fe-17Mn	۲۹۰±۳	۴۷۶±۱	۷۴۵±۱	۲۶±۰/۵	۱۲۲±۵
Fe-13Mn	۲۵۴±۴	۴۶۵±۵	۶۳۴±۹	۱۸/۵±۲/۵	-
Fe-7Mn	۲۱۳±۳	۴۶۱±۳	۶۷۴±۷	۱۶/۶±۰/۶	-



شکل (۵): تصویر تهیه شده SEM از پدیده چروکیدگی در سطح نمونه کشش فولاد پر منگنز آستنیتی

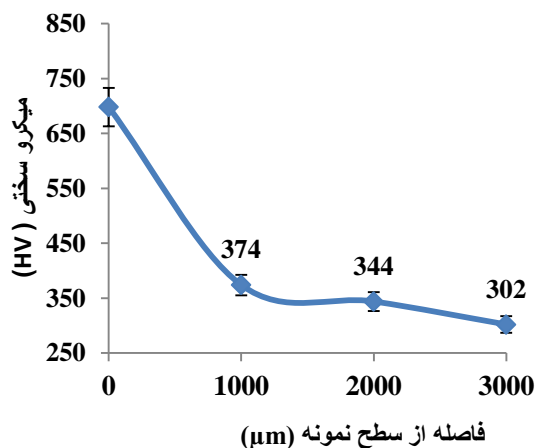
### ۳-۲-۱- کرنش دوقلویی نمونه‌های کشش

پدیده جالبی که در حین آزمون کشش فولادهای پر منگنز آستنیتی رخ می‌دهد، چروکیدگی سطحی یا به اصطلاح عامیانه پوست پرتقالی شدن<sup>۴</sup> سطح نمونه‌های کشش می‌باشد. تصویر SEM از سطح نمونه کشش در شکل (۵) آورده شده که حضور 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 می‌باشد. 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 [۲۴]. از سوی دیگر، به علت کار سخت شدن لایه‌های زیر سطحی و چقرمگی بیشتر آن، ترک‌های تشکیل شده با برخورد با لایه‌های ریز دوقلویی، 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 [۲۴].

### ۳-۳- نتایج آزمون سختی

پس از اعمال کار سختی اولیه، سختی سنجی از سطح نمونه‌ها صورت گرفت. نتایج حاکی از افزایش سختی با افزایش تعداد ضربات اعمالی از صفر تا ۶۰۰ ضربه و نیز افزایش زمان شات پینینگ از صفر تا ۳۰ دقیقه داشته است. این نتایج در شکل (۶) آورده شده و همانطور که در ادامه به آن پرداخته می‌شود، در توافق مناسب با یافته‌های دیگر پژوهشگران است. نجف آبادی و همکاران با اعمال کار سختی اولیه توسط ضربات پتک، رشد ۱۱ درصدی سختی در فولاد هادفیلد حاوی ۰/۶ درصد تیتانیوم را گزارش نمودند [۸]. یان و همکاران نیز با اقدام به عملیات شات پینینگ بروی سطح نمونه‌های پر منگنز، افزایش سختی از HV ۲۵۶ به HV ۶۷۶ را با افزایش زمان این عملیات از ۲ دقیقه به ۶۰



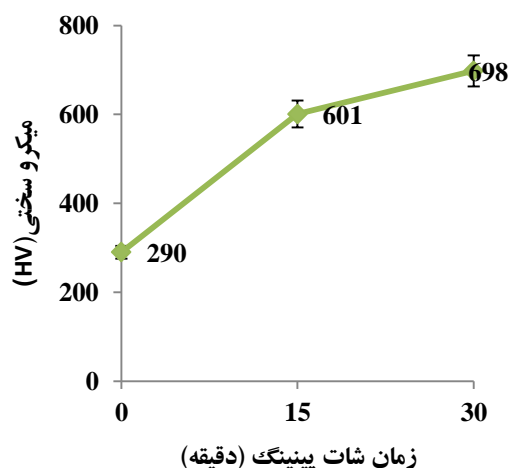
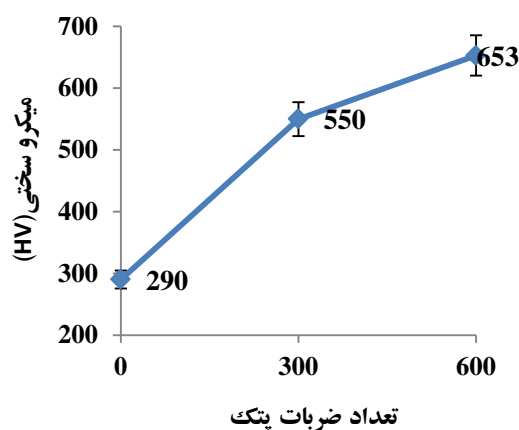
شکل (۷): تغییرات سختی از سطح تا عمق نمونه شات پینینگ در زمان ۳۰ دقیقه

به خوبی قابل مشاهده است که با افزایش فاصله از سطح و نفوذ به عمق از میزان سختی کاسته شده است که یان و همکاران نیز بر همین موضوع اشاره داشتند [۱۳]. می توان گفت با اعمال عملیات کار سختی، سختی ناشی از استحاله آستنیت به مارتزیت افزایش یافته [۸، ۲۶] و این استحاله به صورت لایه ای در سطح حاصل شده است. با نفوذ به عمق، ساختار نرم و چقرمه فولاد که دارای زمینه آستنیتی می باشد بدون تغییر باقی مانده است. در نتیجه فولادی با سطحی بسیار سخت و مغزی نرم که برای کاربردهای صنعتی (منجمله چکش های سنگ شکن) مناسب می باشد، حاصل گردیده است.

#### ۳-۴- نتایج آزمون سایش

نتایج حاصل از آزمون سایش در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش سختی ناشی از عملیات کار سختی اولیه، مقاومت به سایش بهبود یافته است. نجف آبادی و همکاران در بررسی تاثیر ضربات پتک بر مقاومت سایشی فولاد هادفیلد مرسوم به نتایج مشابهی دست یافتند [۸]. یان و همکارانش نیز در بررسی تاثیر عملیات شات پینینگ بر مقاومت سایشی، بهبودی ۷۲ درصدی در مقاومت به سایش حاصل از عملیات ۳۰ دقیقه شات پینینگ را گزارش نمودند [۱۳].

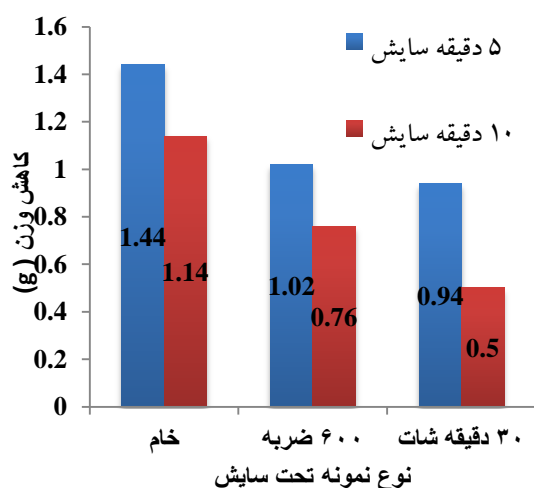
دقیقه گزارش نموده اند [۱۳]. می توان گفت که در حضور درصد بالای عنصر منگنز، قابلیت سختی پذیری افزایش یافته و از طرف دیگر با افزایش تعداد ضربات اعمالی و زمان شات پینینگ، استحاله آستنیت به مارتزیت بیشتری رخ داده و سختی در لایه های سطحی افزایش یافته است [۲۳، ۲۵].



شکل (۶): مقایسه نتایج سختی سنجی نمونه ها بر حسب تعداد ضربات پتک و زمان شات پینینگ

به منظور ارزیابی عمق نفوذ عملیات کار سختی، میزان تغییرات سختی از سطح تا عمق برای نمونه شات پینینگ در زمان ۳۰ دقیقه (نمونه با بیشترین میزان سختی سطحی) مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل (۷) آورده شده است.

معناست که با اعمال فرآیند کار سختی بیشتر (افزایش تعداد ضربات و یا افزایش زمان شات پینینگ) سختی بالاتر و مقاومت به سایش بهتری حاصل گردیده بود [۲۵]. نکته مورد توجه از نتایج سختی سنجی و نتایج آزمون سایش این است که کمترین کاهش وزن مربوط به نمونه ۳۰ دقیقه شات شده با بیشترین مقدار سختی سطحی بوده و به همین ترتیب این روند تا نمونه خام نیز حاکم است. همچنین دو نکته از شکل (۹) قابل بحث و بررسی می‌باشد.

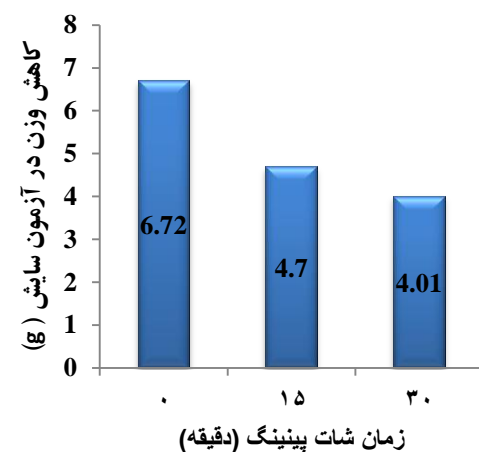
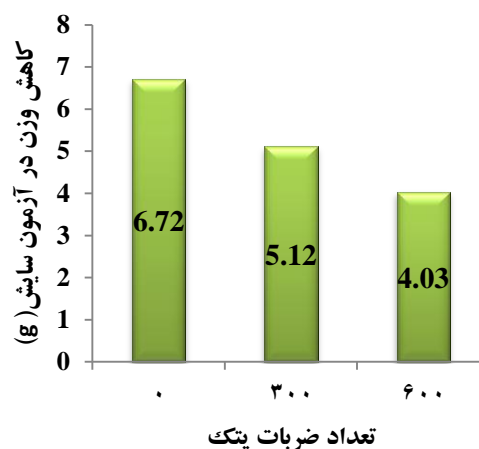


شکل (۹): بررسی میزان مقاومت به سایش در دقایق اولیه آزمون سایش

اولاً به واسطه ایجاد کار سختی حاصل از آزمون سایش در سطح نمونه‌ها، میزان کاهش وزن با گذشت زمان روندی نزولی به همراه داشته است. دوماً مقایسه نمونه‌های کار سخت شده با نمونه خام در دقایق اولیه آزمون سایش (بالاترین نرخ کاهش وزن) روندی نزولی به همراه داشته و نتیجه مطلوب یعنی افزایش مقاومت به سایش در بحرانی‌ترین زمان سایش حصول گردیده است. این امر تضمین کننده بهبود شرایط سایشی بوده و دستیابی به کمترین نرخ سایش در قطعات را حاصل می‌نماید.

### ۳-۴-۱- بررسی سطوح سایش و تعیین مکانیزم

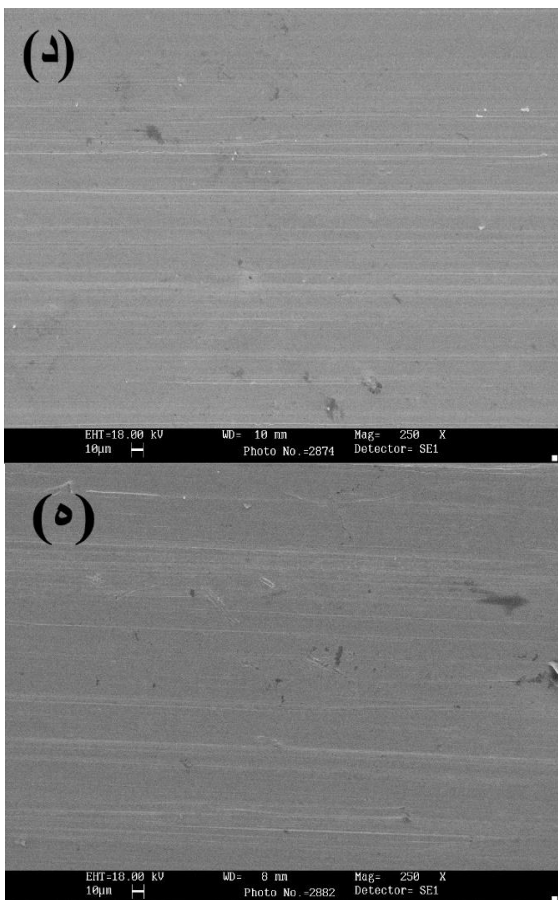
تصاویر SEM از سطح نمونه‌های سایش یافته در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. با توجه به خراش‌های موازی موجود در سطح نمونه‌ها می‌توان گفت، مکانیزم سایش غالباً از نوع خراشان



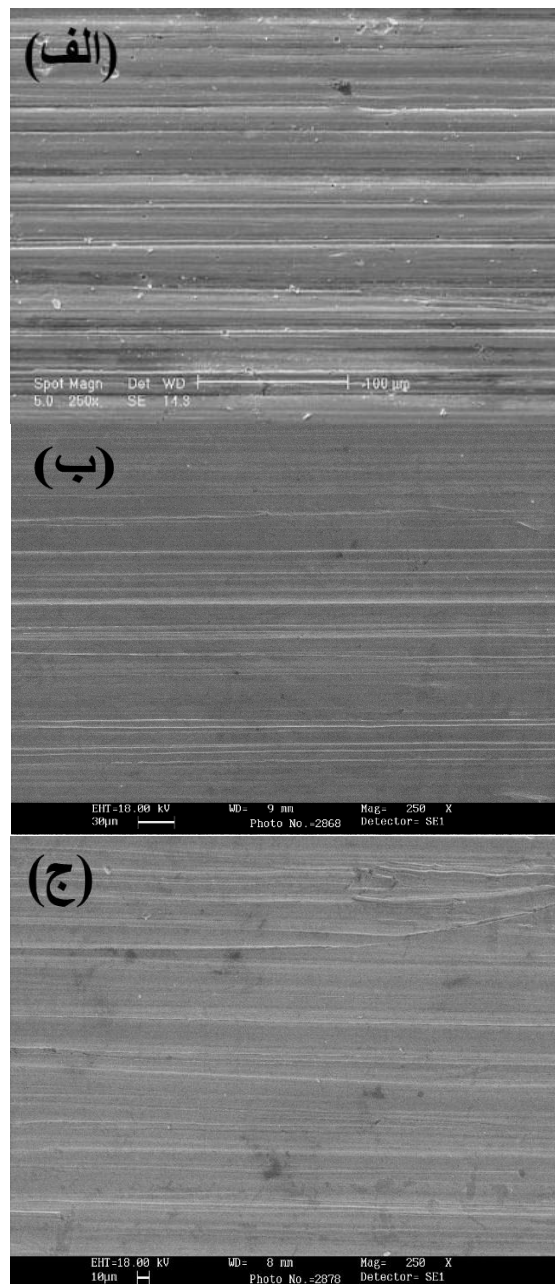
شکل (۸): مقایسه نتایج نهایی آزمون سایش تحت اعمال کار سختی اولیه (بر حسب تعداد ضربات پتک و زمان شات پینینگ)

از سوی دیگر در شکل (۹) قابل مشاهده است که با اعمال کار سختی اولیه و افزایش سختی، میزان کاهش وزن در دقایق اولیه سایش (بیشترین مقادیر کاهش وزن) روندی نزولی به همراه داشته است. در توضیح این روند می‌توان گفت در حضور درصد بالای عنصر منگنز و بهبود قابلیت سختی پذیری، افزایش فرآیند سخت کاری سطحی باعث افزایش کارسختی شده و در نتیجه مقاومت به سایش نیز بهبود یافته است [۲۳]. ژیادانگ و همکاران نیز مشاهده نمودند که با افزایش نیروی ضربات از  $J$  به  $0.7J$ ، میزان سختی افزایش یافته و از سوی دیگر این افزایش سختی از عمق به سطح روندی صعودی داشته است. این بدین

می‌باشد [۲۷]. مقایسه سطوح سایش حاکی از کاهش میزان سایش خراشان با افزایش تعداد ضربات پتک و زمان شات پینینگ است. این روند به دلیل افزایش سختی و به طبع آن افزایش مقاومت به سایش در اثر اعمال کار سختی اولیه و استحاله آستنیت به مارتریت انجام می‌پذیرد [۸].



شکل (۱۰): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش یافته نمونه‌ها: (الف): خام، (ب): ۳۰۰ ضربه، (ج): ۱۵ دقیقه شات پینینگ، (د): ۶۰۰ ضربه و (ه): ۳۰ دقیقه شات پینینگ



#### ۴- نتایج

۱- اعمال سیکل حرارتی آنیل انحلالی بروی فولاد پر منگنز آستنیتی موجب حذف کاربیدهای موجود در مرزدانه‌ها و حصول ساختار یکنواخت آستنیتی با خواص مکانیکی (استحکام و مقاومت به ضربه) مطلوب گردیده است.

۲- بررسی نتایج آزمون‌ها نشان داد می‌توان بدون استفاده از عناصر گران قیمت در فولاد پر منگنز آستنیتی و تنها با بهره‌مندی از عملیات کار سختی به مقادیر مطلوب خواص مکانیکی و مقاومت به ضربه دست یافت.

۳- با اعمال کار سختی اولیه بر روی فولاد پر منگنز آستنیتی، میزان سختی افزایش یافته، به طوری که با اعمال تعداد ضربات پتک ۳۰۰ و ۶۰۰ ضربه در مقایسه با نمونه خام، سختی به ترتیب



- [4] S. Haitao, R. Xiong, F. Song, Y. Wen & H. Pen, "Wear Resistance of Austenitic Steel Fe-17Mn-6Si-0.3C with High Silicon and High Manganese", *Journal of Acta Metall*, No.27, pp. 352-358, 2014.
- [5] S. L. Guo, D. Y. Sun, F. C. Zhang, X. Y. Feng & L. H. Qian, "Damage of a Hadfield steel crossing due to wheel rolling impact passages", *Journal of Wear*, Vol. 305, pp. 267-273, 2013
- [6] R. A. A. Gh. Razavi, Ansaripour, H. Monajatizadeh, and M. R. Toroghinejad, "An Investigation on Full Annealing Temperature and Annealing Twins' Density in Fe-33Mn-3Si-2Al High-Manganese Steel", *Journal of Advanced Materials and Processing*, Vol. 1, No. 1, 2013, 3-8.
- [7] E. C. Liu, F. C. Zhang & S. Yang, "Enhanced work hardening in hadfield steel during explosive treatment", *Materials letters*, No. 65, pp. 2333-2336, 2011.
- [8] V. N. Najafabadi, K. Amini & M. B. Alamdarlo, "Investigating the effect of titanium addition on the wear resistance of Hadfield steel", *Metallurgical Research Technology*, No. 111, pp. 375-382, 2014.
- [9] آ. باقری، س. کاویانی و م. اسماعیلیان، "بررسی تاثیر وانادیم بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد پر منگنز"، انتشارات جامعه ریخته گران ایران، شماره ۱۰۰، ص ص. ۳۶-۲۷، ۱۳۹۱.
- [10] G. I. Silman, N. I. Pristuplyuk & M. S. Froltov, "Effect of vanadium on the structure and properties of high manganese steel", *Journal of Metal science and heat treatment*, Vol. 22, pp. 124-127, 1980.
- [11] D. Akeel & A. Omar, "Phase Transformations of Hadfield Manganese Steels", *Journal of Engineer and Technology*, Vol. 25, No. 26. pp. 227-289, 2007.
- [۱۲] س. ا. ترابی، ک. امینی و م. ناصری، "بررسی مقاومت به سایش فولاد آستنیتی پر منگنز-پرسلیسیم Fe-17Mn-6Si-1.2C صنعت ریخته گری، شماره ۱۲۵، صفحه ۷۹-۷۵، ۱۳۹۵.
- [13] W. Yan, L. Fang, K. Sun, Y. Xu, "Effect of surface work hardening on wear behavior of Hadfield steel", *Materials Science and Engineering*, Vol. 460-461A, pp. 542-549, 2007.
- [14] Takaki, S. Nakatsu & H. Tokunago, "Effect of Austenite Grain Size on  $\epsilon$  Martensitic
- ۴۷ و ۵۶ درصد افزایش یافته و در نمونه‌های شات پینینگ با زمان ۱۵ و ۳۰ دقیقه در مقایسه با نمونه خام، سختی به ترتیب ۵۲ و ۵۸ درصد افزایش یافته است.
- ۴- بهترین مقاومت به سایش در نمونه ۳۰ دقیقه شات پینینگ شده از فولاد پر منگنز آستنیتی مشاهده گردید، ضمن اینکه کمترین کاهش وزن در دقایق ابتدایی (قبل از کار سخت شدن حاصل از سایش) نیز در همین نمونه اندازه گیری شد.
- ۵- با توجه به نتایج حاصله و نیز امکانات موجود، هزینه‌های اجرایی و فرم پیچیده قطعات صنعتی روش شات پینینگ جهت اعمال کار سختی اولیه فولاد پر منگنز آستنیتی مطلوبتر می‌باشد.
- ۶- بررسی سطوح سایش نشان از غالب بودن مکانیزم سایش خراشان در نمونه‌های پر منگنز آستنیتی داشت. با افزایش سختی حاصل از افزایش تعداد ضربات و یا زمان عملیات شات پینینگ از عمق و تعداد خراش‌ها کاسته شده است.

## ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان لازم می‌دانند از همکاری مدیریت و پرسنل شریف شرکت‌های صنایع ریخته‌گری اصفهان و سپاهان پیچ در به سرانجام رسیدن این پژوهش تشکر و قدردانی نمایند.

## ۶- مراجع

- [1] D. K. Subramanya, A. E. Swansiger & H. S. Avery, "Austenitic manganese steel", *ASM Metals Handbook*, 1, 10<sup>th</sup> edition, pp. 822-840, 1993.
- [2] J. Agunsoye, T. Isaac & A. Abiona, "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*, Vol. 1, pp. 24-28, 2013.
- [3] A. Fattah-alhosseinia, B. Izadia & M. Asadi Asadabad, "Evaluation of corrosion behavior on Mn-Cr austenitic steels using 0.1 M HCl solution", *Journal of Advanced Materials and Processing*, Vol. 2, No. 1, 2014, 55-63.

[27] K. Kato & K. Adhachi, "Modern Tribology Handbook", chrc, Press, 2001.

Transformation in Fe-15mass%Mn Alloy", Journal of Material Transactions, Vol. 34, No. 6, pp. 489-495, 1993.

### ۷- پی نوشت

- [1] Hadfield steel
- [2] Shot peening
- [3] Wire Cutting Machine
- [4] Orange Peeling

[۱۵] س.ا. ترابی، ک. امینی و م. ناصری، " بررسی تاثیر محتوی منگنز بر ریز ساختار و خواص مکانیکی فولادهای پر منگنز آستنیتی"، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، گزارش علمی، ۱۳۹۴.

[16] ASTM: E8 / E8M – 16a, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", 2004.

[17] ASTM: E112-96, "Standard Test Methods for Determining Average Grain Size", 1996.

[18] Din: 50125, "Testing of metallic materials Tensile test pieces", 2009.

[19] ASTM: E23, "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials", 1982.

[20] ASTM: E384 – 16, "Standard Test Method for Micro indentation Hardness of Materials", 2005.

[21] ASTM: G65-00, "Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus", 2010.

[22] J. Tasker, "Austenitic Manganese Steel Fact and Fallacy", Technical Advances in Steel Casting England, Vol. 15, pp. 1-13, 1983.

[۲۳] م. گلغذار، "اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها"، ویرایش دوم، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۱.

[۲۴] م. عباسی، ش. خیراندیش، ج. حجازی، و ی. خرازی، "ارتباط بین کرنش دوقلویی و پدیده ی چروکیدگی سطحی در تغییر شکل موم سان فولاد آستنیتی منگیزی"، نشریه مهندسی متالورژی و مواد، سال بیست و پنجم، شماره ۲، ۱۳۹۳.

[25] D. Xiaodong, S. Guodong, W. Yifei, W. Jianfeng, Y. Haoyu, "Abrasion Behavior of High Manganese Steel under Low Impact Energy and Corrosive Conditions", Advances in Tribology, pp. 1-5, 2009.

[26] J. Tianfo, Z. Fuching, "The work-hardening behavior of medium manganese steel under impact abrasive wear condition", materials science and engineering, Voi. 31, pp. 275-279, 1997.