

بررسی تاثیر عملیات حرارتی آستمپرینگ بر رفتار فرسایشی چدن داکتیل آلیاژی

محمد مسعود طاهری، مهدی علی زاده، عباس بهرامی، کامران صائبی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت مقاله: ۹۸/۰۷/۰۷ - پذیرش مقاله: ۹۹/۰۹/۲۳)

چکیده

در این پژوهش رفتار فرسایشی چدن داکتیل آستمپر شده کاربیدی و چدن داکتیل آلیاژی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. به این منظور نمونه‌های مربعی شکل با ابعاد ۳ سانتی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر تهیه شد. نمونه‌های چدن داکتیل آلیاژی تحت عملیات حرارتی آستمپرینگ قرار گرفتند. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز EDS انجام شد. قبل از آزمون فرسایش سختی و زبری نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها در پنج زاویه ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه تحت آزمون فرسایش قرار گرفتند. نمودار کاهش وزن استاندارد بر حسب زاویه رسم شد که نشان داد نمونه داکتیل آستمپر شده کاربیدی در همه زوایا مقاومت فرسایشی بهتری دارد. نتایج آزمون پراش پرتو ایکس از سطح نمونه‌ی چدن داکتیل آستمپر شده کاربیدی قبل و بعد از آزمون فرسایش نشان داد نمونه دارای ۳۸ درصد آستنیت باقی‌مانده است که بعد از آزمون فرسایش استحاله تحت کرنش پیدا کرده است و به مارتنزیت تبدیل شده است. آزمون ریزسختی سنجی روی نمونه چدن داکتیل آستمپر شده کاربیدی بعد از آزمون فرسایش انجام شد و نشان داد به دلیل استحاله در سطح سختی سطح آن از ۴۴۶ ویکرز به ۵۳۱ ویکرز افزایش پیدا کرده است. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح فرسایش شده نمونه‌ها نشان داد مکانیزم غالب فرسایش در زوایای کم (۳۰ تا ۶۰ درجه) برش و شخم زنی می‌باشد و در زوایای بالا (۶۰ تا ۹۰ درجه) مکانیزم غالب ترک و میکروتک می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فرسایش، چدن داکتیل آلیاژی، چدن داکتیل آستمپر شده کاربیدی، عملیات حرارتی آستمپرینگ، ریزساختار

An Investigation on Effect of Austempering Heat Treatment on The Erosion Behavior of Ductile Alloy Cast Iron

Mohammad Masood Taheri, Mehdi Alizaeh, Abbas Bahrami, Kamran Saebi

Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology

(Received 29 September 2019, accepted 13 December 2020)

Abstract

In this research, the erosion behavior of carbidic austempered ductile iron and alloyed ductile iron was studied and compared. For this purpose, cubic specimens with a size of 3*3*1 cm were prepared, and subsequently austempered. Microstructural characterization was carried out using optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) coupled with energy dispersive spectroscopy (EDS). Hardness and surface roughness were measured prior to the erosion test. Specimens underwent erosion test at the angles of 30, 45, 60, 75, and 90 degrees. Diagrams depicting weight loss for different angles denote that the carbidic specimens show higher erosion strength in all angles. Moreover, X-ray diffraction results from the surface of the carbidic specimens prior and after the erosion test demonstrated that there is 38 percent residual austenite on the surface of the carbidic specimens after the erosion test which provides evidence for the strain-induced transformation of austenite to martensite during erosion test. Micro-hardness tests on the surface of the carbidic specimens after the erosion test demonstrated an increase from 446 to 531 vickers due to the transformation. Moreover, as apparent from the SEM images, the dominant erosion mechanism is cutting and ploughing at low (30-60 degrees) and high angles (60-90 degrees) is crack and micro crack, respectively.

Keywords: Erosion, Ductile iron, Carbidic austempered ductile iron, Austempering heat treatment.

E-mail of Corresponding author : Masoodt70@yahoo.com.

مقدمه

مکانیزم فرسایش در مواد انعطاف پذیر مانند فلزات و آلیاژها، حذف مواد در اثر برش و شخم زدن ذرات جامد می‌باشد. برای مواد شکننده مانند سرامیک‌ها، انتقال انرژی از ذرات جامد به سطح مواد مورد نظر اتفاق می‌افتد. این فرایند باعث تغییر شکل مواد، شروع ترک و انتشار آن می‌شود. در نتیجه تکه‌های مواد از سطح جدا می‌شوند [۴].

در میان آلیاژهای صنعتی، چدن‌ها متنوع‌ترین خواص را با ارزان‌ترین قیمت دارا می‌باشند. در زمینه چدن‌های نشکن، نیاز گسترده صنعت برای دستیابی به ساختارهایی با استحکام و انعطاف‌پذیری بالاتر منجر به شروع تحقیقات گسترده جهت تغییر ساختار این چدن‌ها شده است. یکی از نتایج درخشان این تحقیقات، چدن‌های نشکن آستمپر شده (ADI) می‌باشد. در واقع آستمپر کردن عبارتست از فرآیندی از عملیات حرارتی که به منظور ایجاد ساختار آسفریتی در چدن‌ها انجام می‌گیرد و باعث بهبود خواص مکانیکی مانند استحکام، مقاومت به ضربه، انعطاف‌پذیری و مقاومت به سایش این‌گونه مواد می‌شود. در اوایل دهه ۷۰ میلادی تولید محدود ADI در آمریکا و اروپا شروع شده و در اواخر این دهه استفاده جهانی از این نوع چدن‌ها گسترش یافت. از سال ۱۹۸۰ میلادی به بعد حجم تحقیقات انجام شده افزایش چشمگیری پیدا کرد. در سال ۱۹۸۵ تولید جهانی این چدن کمتر از ۸۰۰۰ تن بود، در سال ۲۰۱۰ به ۲۰۰۰۰۰ تن رسید و پیشبینی می‌شود به ۵۰۰۰۰۰ تن در سال ۲۰۲۰ برسد [۵].

چدن ADI دارای استحکام و انعطاف‌پذیری بالایی می‌باشد و استفاده از آن در خودروها، معادن و ماشین‌آلات کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است. بطورکلی به دلیل سختی و استحکام بالایی‌توان از این گروه از چدن‌ها در کاربردهای مقاوم به سایش استفاده کرد. به منظور افزایش مقاومت به سایشی چدن‌های ADI، چدن داکتیل آستمپر شده کاربیدی (CADI) در سال‌های اخیر توسعه یافته است. CADI دارای کاربید در زمینه آسفریت می‌باشد

برخورد ذرات سخت با سطح نرم که در آن ذرات یا توسط جریانی از گاز مانند هوا حمل می‌شود یا درون مایعی روان وجود دارد را سایش فرسایشی می‌نامند و جهت تفاوت قائل شدن با آسیب‌های سطحی که در اثر ضربه مایع پرفشار یا قطرات مایع به‌وجود می‌آیند آن را فرسایش ذرات جامد یا فرسایش در اثر برخورد ذرات جامد تعریف می‌کنند. مثال‌هایی از این نوع سایش فرسایشی عبارتند از: فرسایش در خطوط لوله‌های پتروشیمی، پمپ‌های معادن، فرسایش بدنه هواپیما و پره‌های توربین [۱]. میزان فرسایش مواد تابعی از شرایط سایش، جنس و اندازه ذرات ساینده موجود در مجموعه و همچنین پارامترهای متالورژیکی ماده تحت فرسایش همچون ساختار میکروسکوپی، فازها و دانه بندی دارد. به دلیل کثرت فاکتورهای موثر بر این نوع سایش آن‌ها در سه گروه زیر تقسیم بندی شده‌اند که عبارتند از [۲ و ۳]:

- ۱) ویژگی‌های ذرات مثل اندازه، شکل، سختی، جرم و استحکام ذرات.
- ۲) ویژگی‌های ماده مانند شکل، دما، تنش پسماند، خواص مکانیکی مانند سختی، چقرمگی شکست، خستگی و میکرو ساختار.
- ۳) جریان سیال مانند زاویه برخورد، جهت برخورد، تعداد برخورد، نوع سیال و سرعت برخورد ذرات.

زاویه برخورد ذرات ساینده یکی از عوامل بسیار مهم در فرایند فرسایش بوده و می‌تواند بین صفر تا ۹۰ درجه تغییر کند. مواد بسته به زاویه برخورد رفتار فرسایشی متفاوتی دارند. بطوریکه مواد انعطاف پذیر (فلزات نرم مانند آلومینیوم) بیشترین مقدار فرسایش را در زوایای کم و نزدیک به ۲۰ درجه دارند ولی در مقابل مواد ترد (سرامیک‌ها) بیشترین نرخ فرسایش را در زاویه عمود خواهند داشت [۱].

مواد و روش تحقیق

در ابتدا یک ورق به ضخامت ۱۰ میلی‌متر از نمونه چدن داکتیل آلیاژی تهیه شد. ترکیب شیمیایی نمونه چدن مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. جهت تست فرسایش ۱۰ نمونه به ابعاد ۳۰ در ۳۰ میلی‌متر توسط وایرکات از ورق های اولیه جدا شد. ۵ عدد از نمونه‌ها بعد از آماده‌سازی ابتدا در دمای ۸۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه تحت عملیات حرارتی آستنیت‌ه کردن قرار گرفتند. سپس در دمای ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸۰ دقیقه در کوره حمام نمک تحت عملیات حرارتی آستمپرینگ قرار گرفتند. بعد از عملیات آستمپرینگ قطعات در هوا سرد شدند.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی چدن داکتیل آلیاژی

C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Cu
۳/۵۳	۰/۱۳	۲/۲۱	۰/۳۵	۰/۳	۱/۱	۰/۷۳

جهت بررسی ریزساختار نمونه‌های چدن داکتیل آلیاژی و چدن CADI، نمونه‌ها توسط سنباده‌های گرید ۱۲۰ تا ۲۴۰۰ تحت سنباده‌زنی قرار گرفت و سپس نمونه‌ها توسط پودر آلومینای ۰/۳ میکرونی و پارچه ماهوتی پولیش شدند. پس از پولیش سطح، حکاکی نمونه های آماده‌شده توسط محلول نایتال ۲٪ به مدت ۱۰ ثانیه انجام گرفت.

جهت بررسی سختی نمونه‌ها، سختی سنجی به روش ویکرز تحت بار ۳۰ کیلوگرم روی نمونه ها انجام شد. قبل از آزمون سختی سنجی نمونه‌ها پولیش شدند و ۵ نقطه از سطح هر نمونه تحت این آزمون قرار گرفت و میانگین سختی این نقاط به عنوان عدد سختی هر نمونه اعلام شد. ریزسختی سطح مقطع نمونه چدن CADI بعد از عملیات فرسایش برای مقایسه سختی سطح با عمق با استفاده از دستگاه ریزسختی سنجی بررسی شد.

نظر به اینکه در بررسی رفتار فرسایشی، پارامترهای مختلفی دخیل هستند و میزان فرسایش مواد تابعی از شرایط فرسایش، نیروی اعمالی، جنس ذرات و اندازه

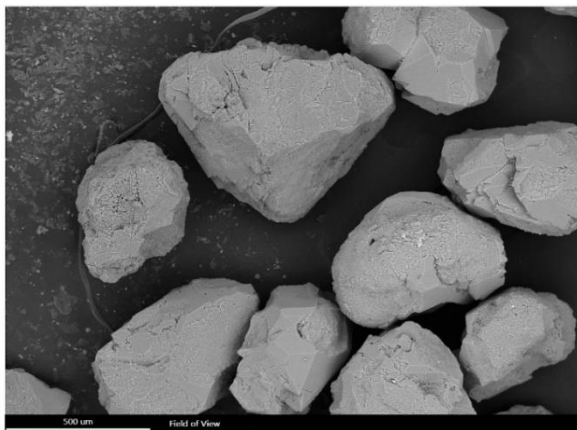
که باعث افزایش سختی و مقاومت سایشی در مقایسه با ADI می‌شود ولی مقاومت به ضربه آن کاهش می‌یابد. سختی CADI برابر چدن پرکرم است و مقایسه با چدن کم کروم که به عنوان گلوله آسیاب در صنعت معدن استفاده می‌شود بسیار بیشتر است. با این حال مقاومت به ضربه CADI ۲ تا ۴ برابر چدن پرکرم و ۵ تا ۱۰ برابر چدن کم کرم می‌باشد. مقاومت به سایش CADI بیشتر از مقاومت به سایش فولاد ابزار با سختی یکسان است [۶].

عملیات حرارتی آستمپرینگ چدن‌های نشکن شامل آستنیت‌ه کردن قطعات ریخته شده در محدوده‌ی حرارتی ۹۵۰-۸۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت کافی و سپس سرد نمودن در یکی حمام نمک مذاب شامل پتاسیم نیترات و سدیم نیترات می‌باشد. درجه حرارت آستمپرینگ در محدوده ۴۵۰-۲۳۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. مدت زمان نگه‌داری در دمای آستمپرینگ به پارامترهای متعدد بستگی داشته و بین نیم ساعت تا چند ساعت متغیر است. در اثر اعمال سیکل عملیات حرارتی ریزساختار چدن CADI شامل فریت سوزنی، آستنیت باقی‌مانده غنی از کربن، و تیغه‌های کاربرد خواهد شد. در حقیقت وجود چنین ساختار دوگانه‌ای در آلیاژ، تامین کننده خواص مکانیکی بسیار مطلوبی خواهد شد. از مزایای این چدن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۷]:

- صرفه‌جویی در انرژی به میزان ۱۰ تا ۳۰ درصد
- کاهش وزن قطعه به میزان ۱۰ درصد نسبت به فولادها
- ریخته‌گری آسان و هزینه‌های پایین تولید
- مقاومت به سایش عالی
- قابلیت جذب ارتعاش به دلیل وجود گرافیت آزاد
- قابلیت ماشین‌کاری نسبتاً مناسب
- سیکل عملیات حرارتی نسبتاً کوتاه

هدف از پژوهش حاضر بررسی و مطالعه تاثیر عملیات حرارتی آستمپرینگ بر رفتار فرسایشی چدن داکتیل آلیاژی می‌باشد.

در این پژوهش برای انجام تست‌های فرسایش از ماسه سیلیسی با اندازه ذرات ۵۰۰-۳۰۰ میکرومتر و سختی ۱۳۰۰ ویکرز به عنوان ساینده استفاده گردید. شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از این ماسه‌ها را نشان می‌دهد. هرچه دانه‌های ماسه بدون زاویه تر و کروی تر باشد نرخ فرسایش کمتر خواهد شد.



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از ذرات ماسه.

نمونه‌ها قبل و بعد از تست فرسایش توسط دستگاه اولتراسونیک در محلول استون شست و سو داده شدند. بعد از شست و شوی نمونه در مرحله قبل و بعد از تست فرسایش نمونه‌ها در کوره خشک شده سپس توسط ترازو با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم توزین شدند.

در شکل ۲ تصویری شماتیک از دستگاه آزمون فرسایش نشان داده شده است. این دستگاه که در دانشکده مواد دانشگاه صنعتی اصفهان طراحی و ساخته شده است شامل چهار بخش اصلی کمپرسور هوا، مخزن تغذیه ذرات سازنده، افشانک (نازل) و نگهدارنده نمونه است که مطابق استاندارد G76-13 ساخته شده است. کمپرسور هوا به عنوان عامل محرک ذرات ساینده عمل می‌نماید و ذرات ماسه را با سرعت معین به سمت سطح مورد آزمایش پرتاب می‌کند. کمپرسور هوای استفاده شده در این تحقیق قابل افزایش فشار هوا تا ۱۵ بار دارد. مخزن تغذیه ذرات

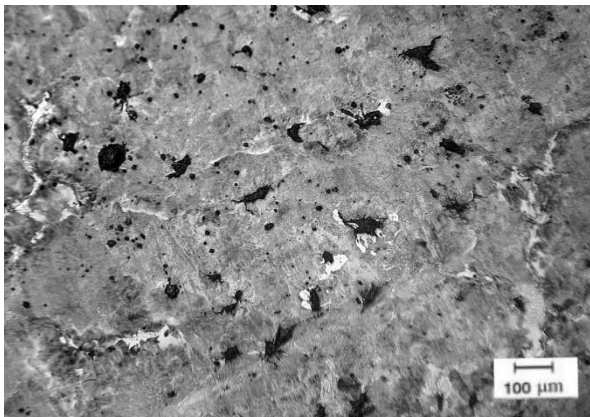
ذرات ساینده موجود در مجموعه و همچنین پارامترهای متالورژیکی ماده تحت سایش همچون ساختار میکروسکوپی، فازها و دانه بندی و سایر پارامترهای دیگر دارد به همین خاطر در این مطالعه به هنگام انجام عملی آزمایش‌ها، پارامترهای ورودی در چندین سطح مختلف انتخاب شدند. این پارامترهای تنظیمی به همراه سطوح تغییرات آنها در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین سایر پارامترهای موثر در سایش فرسایشی به عنوان متغیر ثابت در نظر گرفته شده است که در جدول ۳ آورده شده است. انتخاب پارامترهای متغیر بر اساس شرایط واقعی کارکرد نمونه‌ها صنعت و همچنین محدودیت‌های دستگاه تست فرسایش انتخاب شده است. مقادیر مربوط به پارامترهای ثابت در جدول ۳ براساس مطالعه آزمایش‌های قبلی انجام شده روی مواد با سختی مشابه و همینطور با انجام تست‌های اولیه برای رسیدن به کاهش وزن موثر و فرسایش کافی بر اساس تصاویر SEM می‌باشد

جدول ۲. پارامترهای متغیر در آزمون فرسایش

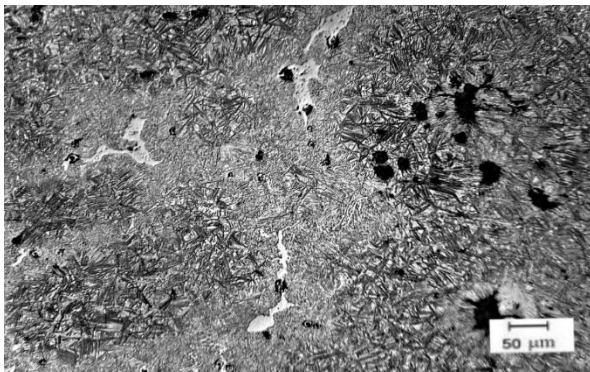
پارامتر	سطوح تغییرات
زاویه برخورد ذرات ساینده (درجه)	۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰
مواد سایش شونده	چدن داکتیل آلیاژی چدن داکتیل آستمپر شده کاربیدی

جدول ۳. پارامترهای ثابت در آزمون فرسایش

پارامتر	توضیحات / مقدار
سرعت ذرات ساینده	۱۰ متر بر ثانیه
دبی خروجی ذرات از نازل	۱۵۰ گرم بر دقیقه
زمان انجام آزمون	۶ دقیقه
فاصله نازل تا نمونه	۵ سانتی متر
فشار کمپرسور	۶ بار
قطر نازل	۴ میلی متر



شکل ۳. تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار چدن داکتیل آلیاژی.



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار چدن داکتیل آستمپر شده کاربردی.

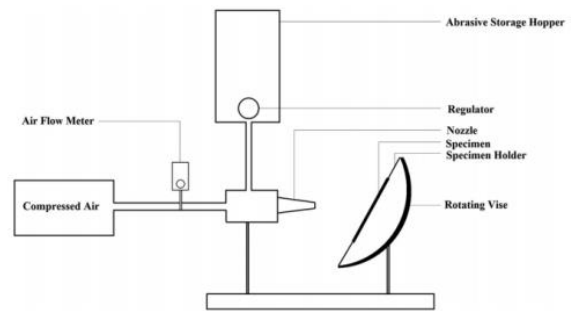
جدول ۴ سختی نمونه‌های چدن داکتیل آلیاژی و چدن داکتیل آستمپر شده کاربردی را بر حسب ویکرز نشان می‌دهد.

جدول ۴. سختی نمونه‌ها بر حسب ویکرز

سختی (ویکرز)	نمونه
۳۲۶	چدن داکتیل آلیاژی
۴۳۱	چدن داکتیل آستمپر شده کاربردی

شکل ۵ الگوی پراش پرتو ایکس از سطح چدن داکتیل آلیاژی قبل و بعد آزمون فرسایش را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است آزمون فرسایش تاثیر بر فازهای موجود در سطح این نمونه نداشته است.

ساینده از جنس فولادی با حجم ۳۰ لیتر می‌باشد. ذرات سیلیس توسط یک شیر در پایین‌ترین قسمت مخزن قابل تنظیم است و ذرات ساینده توسط افشانکی به قطر ۵ میلیمتر به سطح نمونه برخورد می‌کند. فاصله بین افشانک و سطح نمونه قابل تنظیم در محدوده ۵۰ تا ۴۰۰ میلیمتر می‌باشد.

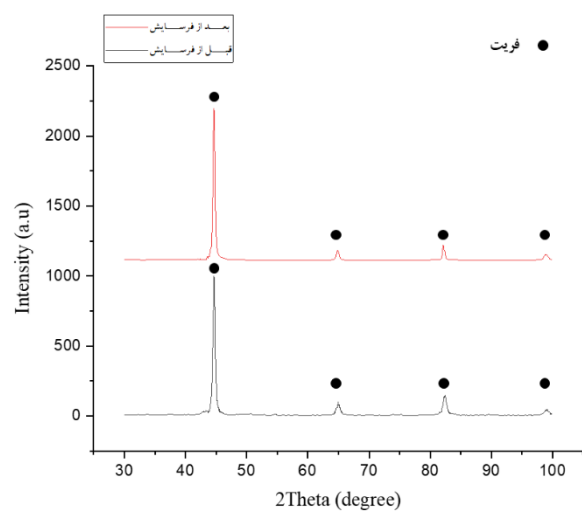
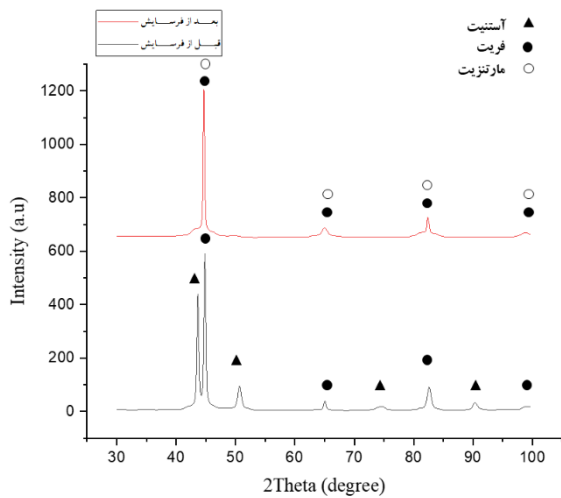


شکل ۲. تصویر شماتیک دستگاه آزمون فرسایش.

جهت بررسی سطوح فرسایش و مشخص شدن مکانیزم‌های فرسایش از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. برای بررسی فازهای تشکیل شده در فرایند عملیات حرارتی آستمپرینگ و همچنین بعد از آزمون فرسایش، آزمون پراش پرتو ایکس انجام شد.

نتایج و بحث

شکل ۳ تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار چدن داکتیل آلیاژی در حالت ریختگی بعد از حکاکی در محلول نایتال ۲٪ را نشان می‌دهد. فازهای تشکیل شده در ریزساختار شامل فریت در اطراف کره‌های گرافیت، گرافیت کروی، کاربید و زمینه پرلیتی می‌باشد. شکل ۳ تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار چدن داکتیل آستمپر شده کاربردی بعد از حکاکی را نشان می‌دهد. ریزساختار این نمونه شامل زمینه آسفریتی (آستنیت پرکن به همراه تیغه‌های فریت) می‌باشد و همچنین کره‌های گرافیت و کاربیدهای فلزی در زمینه دیده می‌شود.



شکل ۶. الگوی پراش پرتوی ایکس چدن داکتیل آستمپر شده کاربردی.

شکل ۵. الگوی پراش پرتو ایکس چدن داکتیل آلیاژی.

به منظور مقایسه سختی سطح نمونه قبل و بعد از آزمون فرسایش یک نمونه از چدن CADI بعد از آزمون فرسایش بصورت عمودی سطح مقطع زده شد و سختی سطح و عمق آن به وسیله دستگاه ریزسختی سنج اندازه گیری شد که نتایج آن در جدول ۵ مشاهده می شود. علت بیشتر بودن سختی نمونه در سطح نسبت به عمق به استحالتهای که حین آزمون فرسایش در سطح نمونه رخ می دهد برمیگردد. در حین آزمون فرسایش آستنیت باقی مانده موجود در سطح نمونه به علت برخورد ذرات ماسه با استحاله تحت کرنش به مارتنزیت تبدیل می شود و به همین دلیل سختی سطح افزایش پیدا می کند.

جدول ۵. نتایج آزمون ریزسختی سنجی نمونه CADI بعد از آزمون فرسایش

سختی (ویکرز)	نمونه
۵۳۱	چدن CADI - سطح
۴۴۶	چدن CADI - عمق

شکل ۷ تغییرات نرخ فرسایش را با تغییر زاویه برخورد ذرات ساینده برای چدن داکتیل آلیاژی و چدن CADI نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود میزان فرسایش شدیداً تابع زاویه برخورد ذرات ساینده وابسته است. طبق تئوری بیتر دو نوع مکانیزم ترد و نرم برای برداشت ماده در

شکل ۶ الگوی پراش پرتو ایکس از سطح چدن داکتیل آستمپر شده کاربردی قبل و بعد از آزمون فرسایش را نشان می دهد. همانطور که مشخص است نمونه قبل از فرسایش دارای آستنیت می باشد ولی بعد از فرسایش اثری از آستنیت در سطح نمونه نمی باشد. در عوض پیکهای مربوط به فریت گسترش یافته است. الگوی پراش پرتو ایکس فاز فریت و مارتنزیت بر هم همپوشانی دارند و امکان تمییز دادن آنها از هم وجود ندارد. با توجه به تحقیقات قبلی در زمینه فرسایش آلیاژهای آهنی دارای آستنیت باقی مانده و همینطور با توجه به نتیجه آزمون ریزسختی سنجی که نشان دهنده سختی بیشتر سطح فرسایش شده نسبت به عمق نمونه است می توان اینطور نتیجه گرفت که آستنیت موجود در سطح تحت تنش استحاله پیدا کرده است و به مارتنزیت تبدیل شده است [۸].

سایش فرسایش معرفی شده است [۹]:

$$W_C = \frac{M}{2e} (V_1 \cos \alpha - V_2 \cos \alpha) \quad (1)$$

$$W = W_D + W_C \quad (2)$$

$$W_D = \frac{M(V_1 \sin \alpha - k)}{2\varepsilon} \quad (3)$$

که در آن W میزان سایش فرسایشی کل، W_D میزان فرسایش ناشی از مکانیزم ترد، W_C میزان فرسایش ناشی از مکانیزم نرم (برش)، V_1 سرعت اولیه ذره، V_2 سرعت ذره بعد از برخورد به سطح، α زاویه برخورد، K حداکثر سرعت برخورد ذره که هیچگونه تغییر شکل پلاستیک ایجاد نکند، M جرم ذرات ساینده، ε انرژی لازم برای حذف یک واحد از حجم ماده و e ضریب سایش فرسایشی ناشی از برش.

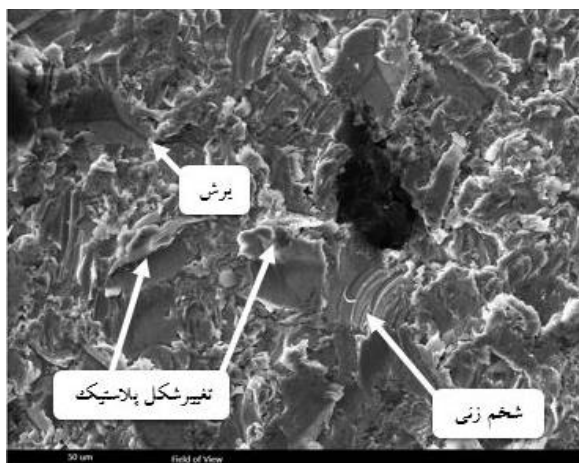
طبق تئوری بیتر در زوایای برخورد کم چون مقدار $\sin(\alpha)$ به سمت صفر میل می کند بنابراین مقدار فرسایش ناشی از ناشی از مکانیزم ترد (W_D) کاهش یافته و مکانیزم اصلی برداشت ماده ناشی از شخم زنی سطح و برداشت سطح توسط ذرات ساینده می باشد. در نتیجه در زوایای برخورد کم هرچه سختی و استحکام ماده بالا باشد، در برابر برش ذرات ساینده مقاومت بیشتری داشته و میزان سایش فرسایشی آن کمتر خواهد بود. در حالی که با افزایش زاویه برخورد تدریجاً $\cos(\alpha)$ به صفر میل کرده و در نتیجه مقدار فرسایش ناشی از مکانیزم ترد افزایش یافته و مکانیزم برداشت اصلی ماده فرسایش ناشی از میکروتُرک ها می باشد. به همین دلیل در زاویه های برخورد بالا (۹۰-۶۵) هرچه ماده دارای سختی بالاتری باشد ایجاد ترک و رشد

آن در اثر برخورد ذرات ساینده کار راحت تری بوده و مقاومت فرسایشی ماده کمتر می شود [۹].

شکل ۷ نتایج حاصل از تست های تجربی را نشان می دهد. همینطور که در این شکل ملاحظه می شود، حداکثر نرخ فرسایش چدن داکتیل آلیاژی در زاویه ۴۵ درجه رخ داده است ولی حداکثر نرخ فرسایش چدن CADI در زاویه ۶۰ درجه رخ داده است که با مقایسه این زوایا با سختی نمونه ها (جدول ۴) می توان به این نتیجه رسید که هرچه سختی نمونه بیشتر باشد به علت انعطاف پذیری کمتر و تردی بیشتر در زوایای بالاتر مقاومت فرسایشی کمتری از خود نشان می دهد. همچنین نتایج نشان می دهد که مقاومت فرسایشی نمونه CADI نسبت به نمونه دیگر در زوایای کم بسیار بیشتر است ولی این اختلاف در زوایای بالا کم می شود. علت این اتفاق این است که در زوایای کم مکانیزم غالب فرسایش خراش و برش می باشد که نمونه CADI به علت سختی بالای سطح در برابر این نوع مکانیزم بسیار مقاوم است ولی در زوایای بالا که مکانیزم غالب بیشتر مربوط به ایجاد ترک در نمونه است مقاومت فرسایشی چدن CADI تفاوت چندانی با نمونه دیگر ندارد. به طور کلی علت مقاومت فرسایشی پایین مواد نرم در زوایای کم و مواد ترد در زوایای بالا این است که نمونه های دارای سختی کمتر انعطاف پذیری بیشتری داشته و به هنگام اعمال ضربه با تغییر شکل در برابر آن مقامت می کنند ولی با توجه به نرمی زیاد در مقابل برش و خراش مقاومت کمتر دارند. در حالی که در مواد سخت تر به دلیل انعطاف پذیری کم و نداشتن تغییر شکل زیاد هنگام برخورد ذرات ساینده ترک هایی در سطح بوجود می آید و با به هم پیوستن این ترک ها قسمتی از سطح به صورت چاله جدا می شود [۱۰]. بخش نظری که مربوط به نظریه بیتر می باشد بیان می کند در زوایای پایین تر برخورد ذرات مکانیزم اصلی فرسایش ناشی از مکانیزم نرم (شخم زنی) می باشد که در این مکانیزم هرچه سختی ماده بیشتر باشد نرخ فرسایش کمتر است. نتایج

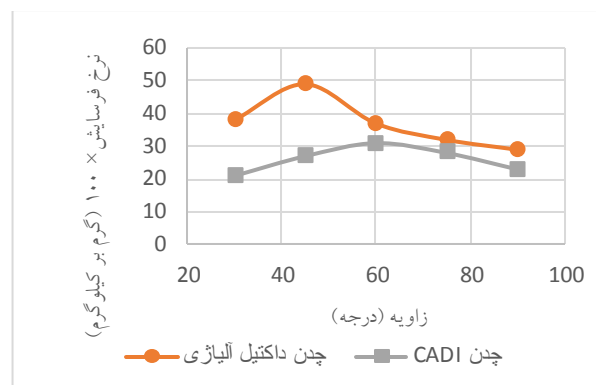
شکل ۱۰ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح فرسایش چدن CADI در زاویه ۳۰ درجه را نشان می‌دهد. به علت استحاله آستنیت به مارتزیت در چدن CADI برخلاف نمونه دیگر در زوایای مایل هم علاوه بر مکانیزم برش شاهد حضور ترک‌های ریز نیز هستیم. شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح فرسایش چدن CADI در زاویه ۹۰ درجه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است در زاویه ۹۰ درجه ترک‌ها و چاله‌های بیشتری وجود دارد. به دو دلیل یکی به خاطر برخورد عمودی ذرات ساینده انرژی بیشتری منتقل می‌شود به سطح و یکی هم به علت وجود مارتزیت و تردی آن ترک‌های بیشتری نسبت به نمونه دیگر مشاهده می‌شود.

شکل ۱۲ تصویر سطح مقطع چدن CADI بعد از فرسایش را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود برخورد ذرات ساینده باعث کنده شدن کره‌های گرافیت می‌شود. کنده شدن کره‌های گرافیت باعث لبه دار شدن سطح نمونه در محل کنده شدن می‌شود که با برخورد ذرات ساینده به راحتی کنده می‌شوند و باعث افزایش نرخ فرسایش می‌شوند.



شکل ۸. تصویر SEM از سطح فرسایش چدن داکتیل آلیاژی در ۳۰ درجه.

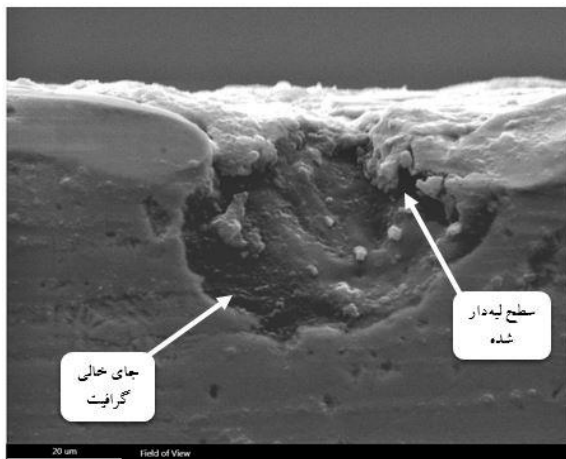
ازمایش نیز این بخش از نظریه بیتر را تایید می‌کند زیرا در زوایای کم نرخ فرسایش چدن CADI بسیار کمتر است. در زوایای بالاتر نظریه بیتر بیان می‌کند که مکانیزم اصلی فرسایش مکانیزم ترد(ایجاد و رشد ترک) می‌باشد و هرچه سختی ماده بیشتر و انعطاف پذیری کمتر باشد فرسایش ماده بیشتر می‌شود. نتایج آزمایش نیز نشان می‌دهد که در زوایای بالاتر فاصله بین نرخ فرسایش دو ماده بسیار کمتر شده است که ناشی از سختی بالاتر و فرسایش بیشتر چدن CADI در زوایای بالاتر می‌باشد که تایید کننده نظریه بیتر است.



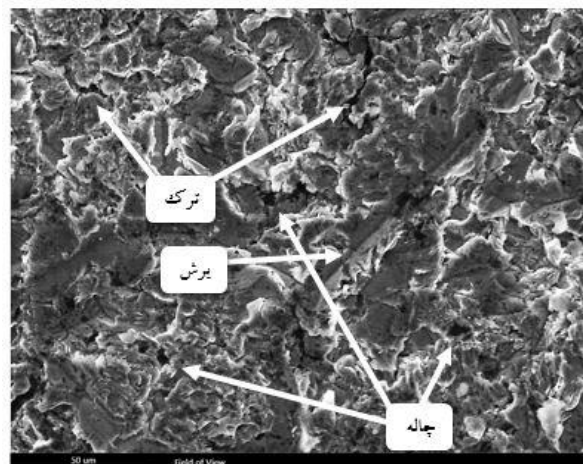
شکل ۷. مقایسه تاثیر زاویه برخورد ذرات ساینده بر نرخ فرسایش نمونه‌ها.

شکل ۸ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح فرسایش چدن داکتیل آلیاژی را در زاویه ۳۰ درجه نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است مکانیزم غالب در این زاویه برش و شخم زنی می‌باشد. تغییر شکل پلاستیک در لبه خراش‌های سطحی دیده می‌شود [۱۱].

شکل ۹ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح فرسایش چدن داکتیل آلیاژی در زاویه ۹۰ درجه را نشان می‌دهد. در این زاویه مکانیزم غالب ترک می‌باشد ولی برش هم قابل مشاهده می‌باشد. به علت اینکه انرژی ذرات در ۹۰ درجه صرف نفوذ آن‌ها به سطح می‌شود در این زاویه چاله و لبه‌های بیرون آمده هم مشاهده می‌شود [۱۲].



شکل ۱۲. تصویر SEM از سطح مقطع چدن CADI بعد از آزمون فرسایش.



شکل ۹. تصویر SEM از سطح فرسایش چدن داکتیل آلیازی در ۹۰ درجه.

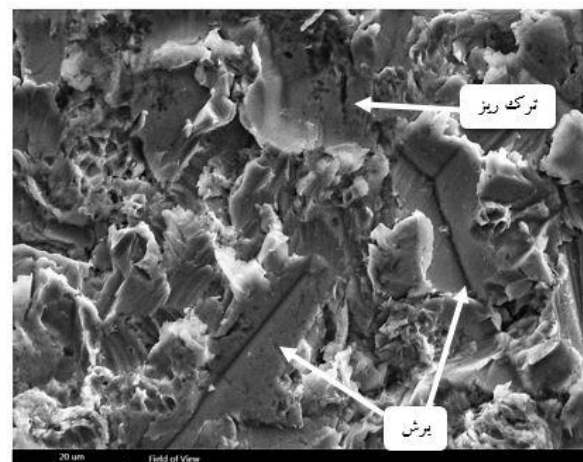
نتیجه گیری

۱. آزمون فرسایش بر روی چدن CADI باعث استحاله تحت تنش آستنیت باقی مانده به مارتنزیت شده و سختی و مقاومت به فرسایش نمونه را بخصوص در زوایای پایین بهبود می دهد.

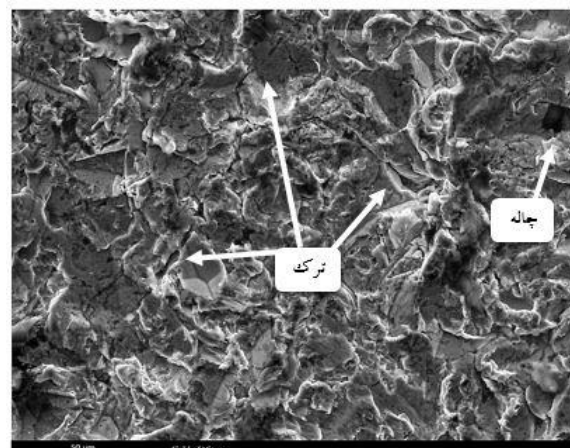
۲. مکانیزم غالب فرسایش در زوایای کم شخم زنی، برش و برش ریز و تغییر فرم پلاستیک است و در زوایای زیاد مکانیزم غالب فرسایش ترک و میکرو ترک و تغییر فرم پلاستیک است.

۳. میزان سایش فرسایشی شدیداً به زاویه برخورد ذرات ساینده وابسته بود و در زوایای برخورد کم چدن داکتیل آستمپر شده کاربیدی به علت سختی بیشتر مقاومت به سایشی بسیار بهتری دارد. در زاویه ۹۰ درجه باز هم مقاومت به سایشی چدن داکتیل آستمپر شده کاربیدی بهتر است ولی اختلاف نرخ فرسایش آن ها کمتر شده است.

۴. گرافیت موجود در ساختار می تواند منشاء ترک باشد و مقاومت فرسایشی قطعه را کم کند. هرچه میزان کروی بود گرافیت بیشتر باشد احتمال تشکیل ترک با منشاء گرافیت کمتر می شود.



شکل ۱۰. تصویر SEM از سطح فرسایش چدن CADI در ۳۰ درجه



شکل ۱۱. تصویر SEM از سطح فرسایش چدن CADI در ۹۰ درجه.

مراجع

1. I. Hutchings, and p. Shipway, *Tribology: Friction and wear of engineering materials*. Butterworth-Heinemann, (2017).
2. L. Xiao, Sh. Kazumichi, and K. Kusumoto., *Impact Angle Dependence of Erosive Wear for Spheroidal Carbide Cast Iron*, *Materials transactions* (2017): F-M2017816.
۳. بخشی، سعیدرضا، تریبولوژی، اصطکاک و سایش مواد مهندسی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، (۱۳۸۳).
4. W. Yu-Fei, and Zhe. Yang, *Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials*, *Wear*, 265.5-6 (2008) 871-878.
5. K. Hayrynen and J. R. Keough. *Austempered Ductile Iron-The State of the Industry in 2003*, In Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, (2003).
6. D. Pedro and R. C. Dommarco, *Rolling contact fatigue resistance of Carbide Austempered Ductile Iron (CADI)*, *Wear*, 418 (2019) 94-101.
۷. صدیقزاده بهنام ، آشنایی با چدن نشکن آستمپر، انتشارات اندیشه سرا، (۱۳۸۹).
8. A. Zammit, S. Abela, and M. Grech, *The effect of shot peening on the scuffing resistance of Cu-Ni austempered ductile iron*, *Surface and Coatings Technology*, 308 (2016) 213-219.
9. J.G.A. Bitter, *A study of erosion phenomena part I*, *wear*, 6 (1963) 5-21.
10. H. Wensink, and M.C. Elwenspoek, *A closer look at the ductile–brittle transition in solid particle erosion*, *Wear*, 253 (2002) 1035-1043.
11. K. Grilec, S. Jakovljević and D. Prusac, *Erosion of ductile cast iron with quartz particles*, *Technical Gazette*, 17(2010) 1-22.
12. M.A. Islam, and Z.N. Farhat, *Effect of impact angle and velocity on erosion of API X42 pipeline steel under high abrasive feed rate*, *Wear*, 311(2014) 180-190.