



## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### مقاله پژوهشی:

### مقایسه رفتار سایشی چدن نشکن در دو حالت آستمپر شده و سریع سرد شده و برگشت داده شده

حسن ثقفیان لاریجانی<sup>۱\*</sup>، سهیل نوایی<sup>۲</sup>، علی شریفی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، ۲- دانشجوی کارشناسی: دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

\* نویسنده مکاتبه کننده: تلفن: ۰۲۱-۷۷۲۴۰۵۴۰، تهران، نارمک، دانشگاه علم و صنعت ایران، صندوق پستی: ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶، E-mail: saghafian@iust.ac.ir

#### چکیده:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۳۰

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۲۱

در تحقیق حاضر، رفتار سایشی نمونه‌هایی از جنس چدن نشکن با ساختار اولیه پرلیتی که تحت دو سیکل عملیات حرارتی مختلف، سختی یکسان بدست آوردند، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند. به این منظور، تعدادی از این نمونه‌ها پس از آستنیت‌شدن در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۲۰ دقیقه، در دمای  $290^{\circ}\text{C}$  در حمام نمک مذاب آستمپر شده و سپس در هوا سرد شدند. بقیه‌ی نمونه‌ها پس از آستنیت‌شدن با شرایط مشابه، به طور مستقیم در محیط روغن سریع سرد شده و سپس به مدت ۷۵ دقیقه در دمای  $505^{\circ}\text{C}$  برگشت داده شدند. به منظور مقایسه رفتار سایشی نمونه‌های حاصل از دو سیکل یاد شده، از روش پین روی دیسک مطابق استاندارد ASTM-G99 استفاده شد. در این آزمایش نمونه‌ها به صورت دیسک تهیه شدند و تحت نیروهای ۲۵ و ۷۵ نیوتن و با سرعت لغزش ثابت  $0/08$  متر بر ثانیه و برای مسافت ۱۰۰۰ متر در شرایط خشک، توسط پین‌هایی از جنس فولاد ۵۲۱۰۰، ساییده شدند. در نتیجه‌ی بررسی‌های انجام شده روی سطوح سایش، کاهش وزن نمونه‌ها و ضرایب اصطکاک بدست آمده، مشاهده شد در نیروی کم (۲۵ نیوتن)، نمونه‌ی سریع سرد شده و برگشت داده شده نسبت به نمونه‌ی آستمپر شده، از مقاومت سایشی بالاتری برخوردار است. در حالی که در نیروی زیاد (۷۵ نیوتن)، نمونه‌ی آستمپر شده بر نمونه‌ی سریع سرد شده و برگشت داده شده برتری دارد.

#### واژه‌های کلیدی:

چدن نشکن، آستمپرینگ، سریع سرد کردن و برگشت، عملیات حرارتی، سایش.

#### ارجاع به این مقاله:

حسن ثقفیان لاریجانی، سهیل نوایی، علی شریفی، مقایسه رفتار سایشی چدن نشکن در دو حالت آستمپر شده و سریع سرد شده و برگشت داده شده، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، پاییز ۱۳۹۸، جلد ۳، شماره ۳، صفحات ۱۴۱-۱۵۰.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/ftj.2019.179001.1079

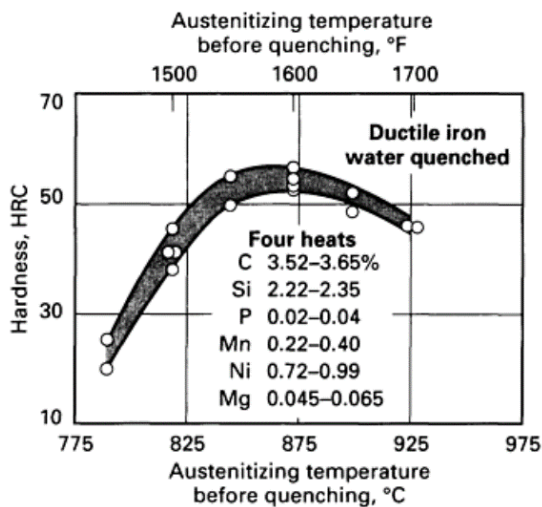
#### ۱- مقدمه

پرکربن در آسفریت می‌تواند به دو صورت توده‌ای (بلوکی) و نازک (فیلمی) وجود داشته باشند. با انجام عملیات آستمپر کردن خواص مکانیکی و فیزیکی چدن نشکن افزایش می‌یابد و به حد قابل رقابت با فولادها می‌رسد. در حقیقت چدن‌های نشکن آستمپر شده (ADI) تلفیق بسیار خوبی از استحکام و انعطاف‌پذیری، هزینه پایین و قابلیت طراحی بالا، مقاومت سایشی و خستگی خوب، چقرمگی و ماشین‌کاری ارائه می‌کنند [۳،۱]. آستمپر کردن در چدن‌های نشکن شامل سه مرحله است، در مرحله اول آستنیت اولیه به فریت سوزنی و آستنیت پرکربن شبه‌پایدار (واکنش نکرده) تبدیل می‌شود، سپس در مرحله دوم با تشکیل فریت‌های سوزنی بیشتر، مقدار کربن آستنیت باقیمانده بیشتر شده و آستنیت پایدار می‌شود و

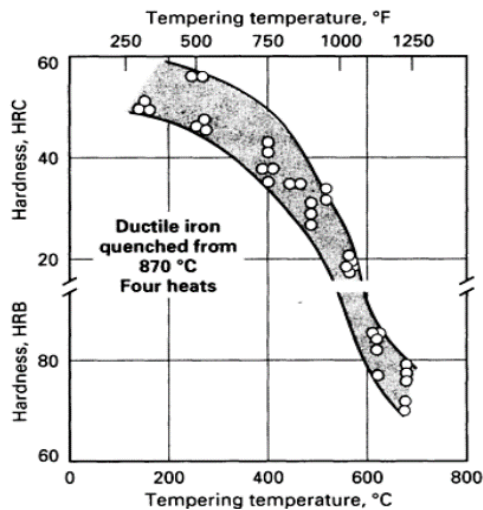
خواص مکانیکی چدن نشکن وابسته به ساختار زمینه است. پس با بهبود ریزساختار زمینه می‌توان خواص مطلوب‌تری بدست آورد. عملیات حرارتی آستمپر کردن به صورت یک عملیات هم‌دما است به طوری که ابتدا برای آستنیت‌کردن در محدوده دمایی  $850^{\circ}\text{C}$  تا  $950^{\circ}\text{C}$  به مدت زمان کافی حرارت داده می‌شود. سپس تا محدوده دمایی استحاله بینیتی که بین  $230^{\circ}\text{C}$  تا  $450^{\circ}\text{C}$  است، سریع سرد می‌شود و پس از نگهداری به مدت زمان کافی در این دما در هوا خنک می‌شود. ریزساختار بدست آمده از آستمپر کردن، ترکیبی از فریت تیغه‌ای یا لایه‌ای و آستنیت پرکربن است که به مجموعه این دو فاز کنار هم، آسفریت گفته می‌شود که در کنار کره‌های گرافیت قرار دارد [۲،۱]. آستنیت

## Archive of SID

داده شده با سختی برابر بررسی شوند و مکانیزم‌های حاکم بر سایش این نمونه‌ها در نیروهای مختلف تعیین و مورد مقایسه قرار گیرند.



شکل ۱- دمای آستنیت‌ه و سختی نهایی بعد از سریع سرد شدن و برگشت دادن [۹]



شکل ۲- رابطه دمای بازگشت و سختی نهایی [۹]

## ۲- مواد و روش تحقیق

نمونه‌هایی از چدن نشکن با ترکیب بدست آمده از آزمایش اسپکترومتری نوری و نشان داده شده در جدول (۱)، در قالب ماسه‌ای با چسب سیلیکات سدیم و گاز CO<sub>2</sub> و با استفاده از ماسه سیلیسی به صورت استوانه‌هایی با قطر ۳۳ میلی‌متر ریخته شده است. برای آستمپر کردن، نمونه‌ها در دمای ۹۰۰°C و به مدت ۱۲۰ دقیقه در کوره‌ی مقاوم‌تی آستنیت‌ه شدند و سپس بسرعت در حمام نمک KNO<sub>3</sub> ۵٪ و NaNO<sub>3</sub> ۵٪ با دمای ۲۹۰°C قرار گرفتند در پی این عمل، پس از نگهداری به مدت ۱۲۰ دقیقه در هوا سرد شدند. بقیه‌ی نمونه‌های پس از آستنیت‌ه شدن در ۰۹۹°C، به صورت مستقیم در روغن سرد شدند.

سرانجام با ادامه فرایند آستمپر کردن در مرحله سوم، کاربرد تشکیل می‌شود [۴،۵].

در مرحله اول، فریت از آستنیت جوانه می‌زند و به سمت داخل دانه آستنیت رشد می‌کند. با رشد فریت، مقدار کربن آستنیت افزایش می‌یابد و آستنیت پرکربن (با مقدار کربن حداکثر تا ۲/۲٪) تشکیل می‌شود که به دلیل بالا بودن مقدار کربن، تا دمای اتاق پایدار است [۷،۶]. اگر قبل از اتمام مرحله اول قطعه سرد شود، مارتنزیت به وجود می‌آید که ناشی از حضور آستنیت واکنش نکرده (UAV<sup>۱</sup>) است که مقدار کربن آن کم است و به مارتنزیت تبدیل می‌شود. آستنیت واکنش نکرده در دمای محیط پایدار نیست و با اعمال نیروی سایش، امکان دارد به مارتنزیت تبدیل شود [۸].

دمای آستنیت‌ه شدن بر فرآیند سخت‌کاری متوالی چدن‌های نشکن، دمایی بین ۸۴۵ الی ۹۲۵ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۱). برای کاهش ترک‌های ناشی از تنش، سرد کردن متوالی در روغن ترجیح داده می‌شود. زمان آستنیت‌ه کردن در اینجا تاثیر محسوسی بر ساختمان و سختی حاصله از سریع سرد کردن دارد، با افزایش بیش از اندازه دمای آستنیت‌ه، به دلیل افزایش مقدار آستنیت باقی‌مانده، سختی نهایی کاهش می‌یابد. همچنین زمان آستنیت‌ه کردن نیز در مقدار آستنیت باقی‌مانده تاثیرگذار است [۹].

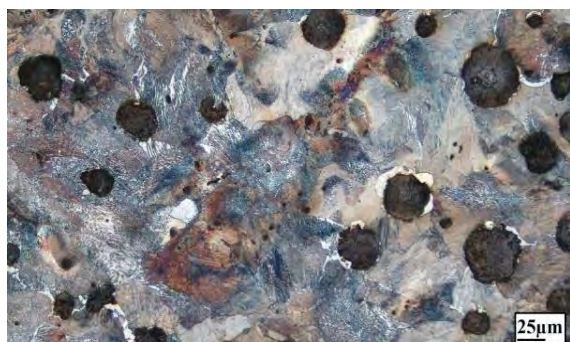
اصولا بعد از سریع سرد کردن، قطعات چدنی، آن‌ها را بازگشت می‌دهند. برای رسیدن به سختی مورد نظر و پیش‌بینی شده، می‌توان از نمودارهایی نظیر نمودار شکل (۲) استفاده کرد. مطابق شکل (۲) مشاهده می‌شود دمایی بین ۴۲۵ تا ۶۵۰°C برای برگشت دادن انتخاب می‌شود [۱۰].

یکی از کاربردهای مهم چدن‌های نشکن در صنعت، ساخت قطعات مقاوم به سایش است. مکانیزم‌های سایش مهم در این چدن‌ها، چسبان، خراشان و اکسیدی هستند [۱۱،۱۲]. از عوامل موثر در مقاومت سایشی چدن نشکن، اندازه، توزیع گرافیت و نیز ریزساختار زمینه را می‌توان نام برد [۱۳].

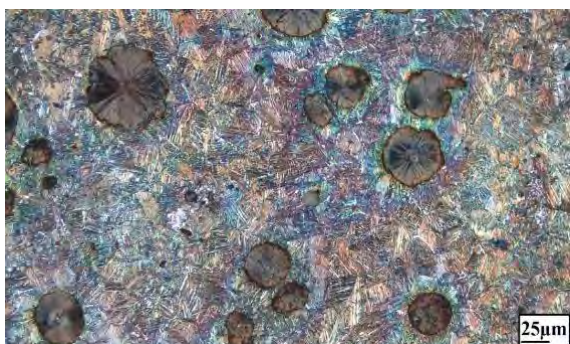
نقش گرافیت‌ها در سایش با توجه به نیروی اعمالی سایش تغییر می‌کند. در نیروهای کم به عنوان روانساز عمل می‌کنند و باعث کاهش نرخ سایش می‌شوند [۱۴] ولی در نیروهای بالا عامل اصلی افزایش سایش هستند [۱۵]. در نیروهای بالا به دلیل حضور آسفریت در زمینه احتمال پدیده TRIP و تشکیل مارتنزیت وجود دارد که باعث بهبود رفتار سایشی می‌شود [۱۶،۱۷].

در این مقاله سعی شده رفتار سایشی در نیروهای پایین و بالا برای یک چدن نشکن با دو ساختار مختلف، یکی در حالت آستمپر شده و دیگری در حالت سریع سرد شده و سپس برگشت

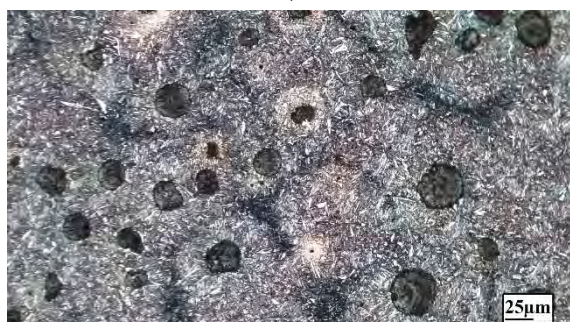
ریزساختار نمونه سریع سرد شده و برگشت داده شده مشاهده می‌شود. همان‌طور که قابل ملاحظه است، ریزساختار شامل تیغه‌های کاملاً مشهود مارتنزیت است. ریزساختار همچنین شامل کاربیدهای انتقالی ریز است. بعد از برگشت دادن نمونه سریع سرد شده، کربن تیغه‌های مارتنزیت کم شده و مقداری فریت و کاربید انتقالی ایجاد می‌شود [۲۰]. شکل (۴) که به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده است، این کاربیدها را نشان می‌دهد. در شکل (۴-ب) که بعد از برگشت دادن نمونه سریع شده تهیه شده است، کاربیدهای ریز مشاهده می‌شود. سختی این نمونه سریع سرد شده بعد از برگشت دادن از 53 HRC به 40 HRC کاهش یافت.



الف



ب



ج

شکل ۳- الف) تصویر میکروسکوپ نوری چدن نمونه‌ی ریخته شده در بزرگنمایی 200X، دارای زمینه‌ی پرلیتی-فریتی، ب) تصویر متالوگرافی نمونه‌ی آستمپر شده در بزرگنمایی 200X، ج) تصویر نمونه‌ی سریع سرد شده و برگشت داده شده در بزرگنمایی 200X

سیس برای رسیدن به سختی برابر در دمای  $505^{\circ}\text{C}$  و به مدت ۷۵ دقیقه در کوره مقاومتی بازگشت داده شدند. نمونه‌ها پس از حک‌کاری با استفاده از محلول نایتال ۲٪ و به مدت نگهداری ۵-۶ ثانیه به وسیله میکروسکوپ نوری مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند. با استفاده از نرم‌افزار MIP میزان کرویت و ندول کانت (تعداد کره‌های گرافیتی) روی تصاویر میکروسکوپی تهیه شده، محاسبه شد.

آزمون سایش با استفاده از دستگاه پین روی دیسک و مطابق استاندارد ASTM G99 روی نمونه‌های دیسکی شکل با قطر ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر، در شرایط خشک انجام شد. پین ساینده از جنس فولاد سخت شده (AISI 52100) با قطر ۵ میلی‌متر و سختی HV 848 بوده است. در دو نیروی ۲۵ و ۷۵ نیوتن و در دمای محیط به مسافت ۱۰۰۰ متر با سرعت خطی ۰/۰۸ متر بر ثانیه آزمایش انجام داده شد. سپس برای بررسی سطوح سایش و براده‌های حاصل، از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM با آشکارساز الکترون‌های ثانویه (SE)، الکترون برگشتی (BE) و مجهز به دستگاه تجزیه عنصری (EDS) استفاده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی چدن نشکن مورد استفاده در تحقیق

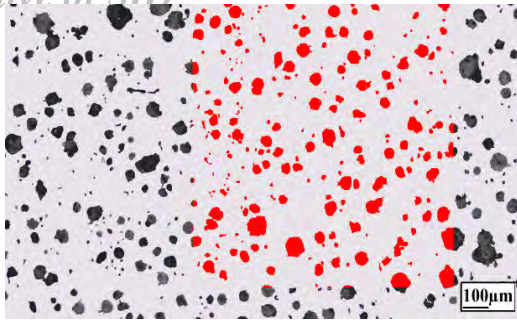
عنصر	C	Si	S	P	Mn	Cu	Mg
درصد وزنی	۳/۶۲	۲/۴۴	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۴	۰/۵۱	۰/۰۵۶

### ۳- نتایج و بحث

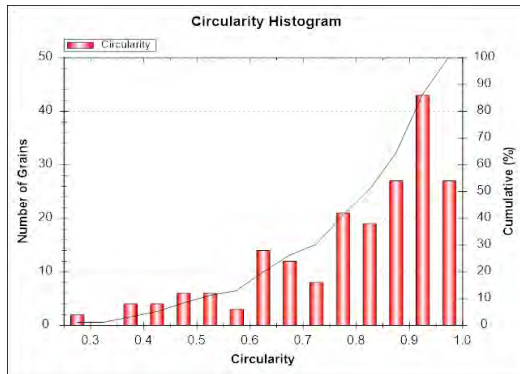
#### ۳-۱- ریزساختار

ریزساختار نمونه‌های ریخته‌گری شده در شکل (۳-الف) آمده است. عدم وجود کاربید در زمینه مبین مقدار قابل ملاحظه سیلیسیم است که به عنوان عامل گرافیت‌زایی عمل کرده است. سختی این نمونه برابر ۲۴۳ HB است.

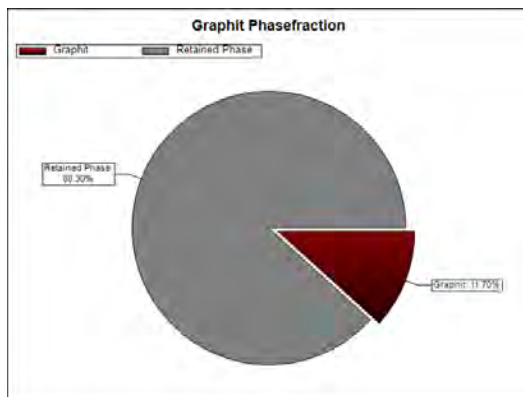
در شکل (۳-الف)، تصویر میکروسکوپی نمونه به صورت ریخته شده مشاهده می‌شود و همان‌گونه که دیده می‌شود، ریزساختار علاوه بر وجود گرافیت‌های کروی از زمینه‌ی پرلیتی با مقدار بسیار کمی فریت تشکیل شده است. پس از انجام عملیات آستمپر کردن، شکل (۳-ب)، آثاری از وجود پرلیت و فریت بوضوح دیده نمی‌شود. این ساختار شامل بینیت پایینی، آستنیت واکنش نکرده و مناطق مارتنزیتی (تیغه‌های کوچک و ظریف در منطقه‌ی سفید رنگ) است [۱۹، ۱۸]. در این ریزساختار مناطق سفید رنگ، آستنیت واکنش نکرده و باقی‌مانده است. سختی نمونه آستمپر شده، 40 HRC بدست آمد. در شکل (۳-ج) تصویر



الف

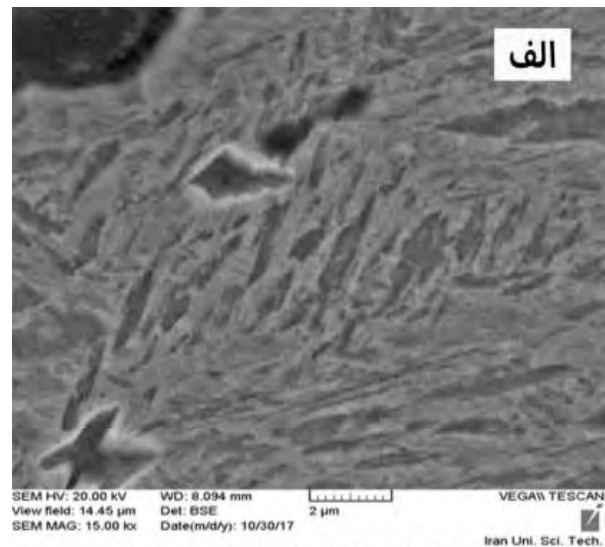


ب

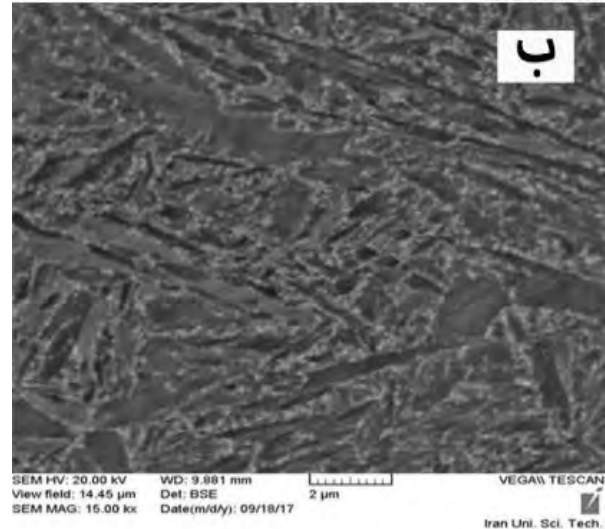


ج

شکل ۵-الف) میزان گرافیت موجود در زمینه چدن نشکن (ب) کرویت گرافیت‌های موجود در زمینه (ج) تصویر از نرم افزار MIP جهت محاسبه تعداد گرافیت‌ها در ۱ میلی‌متر مربع



الف



ب

شکل ۴-الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌ی آستنیت‌سختی شده در دمای ۹۰۰°C به مدت ۱۲۰ دقیقه و سریع سرد شده در روغن، (ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌ی آستنیت‌سختی شده در دمای ۹۰۰°C به مدت ۱۲۰ دقیقه و بازگشت داده شده در دمای ۵۰۵°C به مدت ۷۵ دقیقه، سختی نمونه 40 HRC

(۶)، کاهش جرم نمونه آستمپر شده بیشتر است. این امر نشان می‌دهد که مقاومت به سایش نمونه‌ی سریع سرد شده و برگشت داده شده بیشتر بوده است. دلیل برتری مقاومت به سایش نمونه سریع سرد شده و بازگشت داده شده را می‌توان به حضور کاربیدهای انتقالی با ابعاد نانومتری نسبت داد [۲۰]. این کاربیدها نظیر کاربیدهای ε با ساختار هگزگونال و کاربیدهای η با ساختار اورترومبیک هستند که در صورت بیشتر شدن زمان برگشت دادن و یا برگشت دادن در درجه حرارت بالاتر، به فاز پایدارتری تبدیل می‌شود [۲۰].

بررسی نمودارهای ضریب اصطکاک نیز که در شکل (۷) آمده است، نشان می‌دهد که مقاومت به سایش برای نمونه‌ی سریع

مطابق شکل (۵-الف)، ندول کانت این نمونه ۱۹۶ کره گرافیت در ۱ میلی‌متر مربع محاسبه شده است. میزان توزیع اندازه‌های مختلف کره‌های گرافیت در زمینه نیز در نمودار شکل (۵-ب) مشاهده می‌شود. میزان گرافیت موجود در زمینه نیز با توجه به شکل (۵-ج)، ۱۱/۷ درصد بدست آمد.

### ۳-۲- سایش

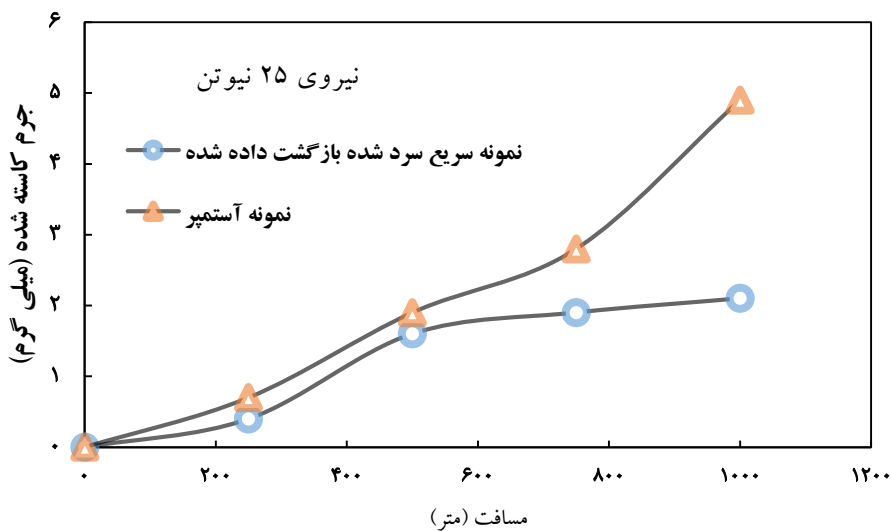
نمودارهای کاهش جرم نمونه‌ها بر حسب مسافت در نیروی ۲۵ نیوتن در شکل (۶) نشان داده شده است. در بررسی نیروی ۲۵ نیوتن برای دو نمونه آستمپر شده و سریع سرد شده و برگشت داده شده، با توجه به نمودارهای کاهش جرم این نمونه‌ها، شکل

Archive of SID

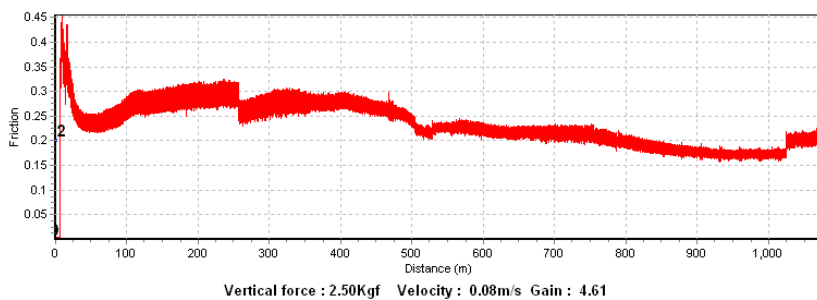
افزایش پهنه‌ی نوسانات نمودار می‌تواند موید این امر باشد. در صورتیکه در مورد نمونه‌ی سریع سرد شده و بازگشت داده شده که حاوی ذرات کاربیدی است، در نیروی یاد شده، ذرات به دلیل افزایش استحکام برشی زمینه قادر به حفظ زمینه از ساییده شدن هستند که این امر نیز با پهنه‌ی باریک‌تر نمودار قابل توجیه است [۲۱].

با مشاهده تصاویر سطح سایش در شکل‌های (۸) و (۹) می‌توان تفاوت در مقدار سایش را که در نمودارهای ضریب اصطکاک مشخص است، به این دلیل بیان کرد که در ابتدا سایش فقط بین دو سطح در تماس، یعنی پین فولادی و برجستگی‌های سطح، محدود می‌شود؛ که موجب مقدار کم ضریب اصطکاک در ابتدای

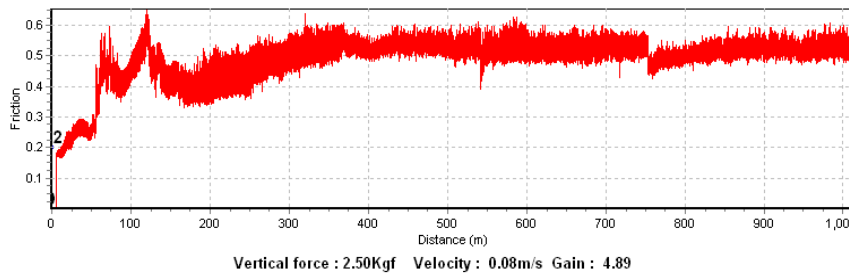
سرد شده و برگشت داده شده در نیروی ۲۵ نیوتن بیشتر است. نوسانات ضریب اصطکاک در نمونه سریع سرد شده و برگشت داده شده تقریباً یکنواخت و باریک‌تر است در حالی که در نمونه آستمپر شده فقط در مسافت‌های ابتدایی احتمالاً به خاطر اثر روان‌کاری گرافیت، ضریب اصطکاک پایین است و در طی مسافت‌های بیشتر روند صعودی ضریب اصطکاک مشاهده می‌شود، با توجه به زمینه‌ی آسفریت با سختی 40 HRC احتمالاً با افزایش مسافت لغزش و ایجاد حرارت موضعی، استحکام برشی ناحیه سطحی برای مقاومت در برابر سایش کافی نبوده است و در نتیجه به دلیل سطح تماس بیشتر پین و دیسک و افزایش عمق تغییر شکل پلاستیکی، براده‌ی بیشتری تولید می‌شود که



شکل ۶- مقایسه کاهش جرم نمونه‌ها در دو حالت آستمپر شده و سریع سرد شده و بازگشت داده شده در نیروی ۲۵ نیوتن



(الف)



(ب)

شکل ۷- (الف) نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت برای نمونه‌ی آستمپر شده، تحت نیروی ۲۵ نیوتن، (ب) نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت برای نمونه‌ی سریع سرد شده و برگشت داده شده، تحت نیروی ۲۵ نیوتن



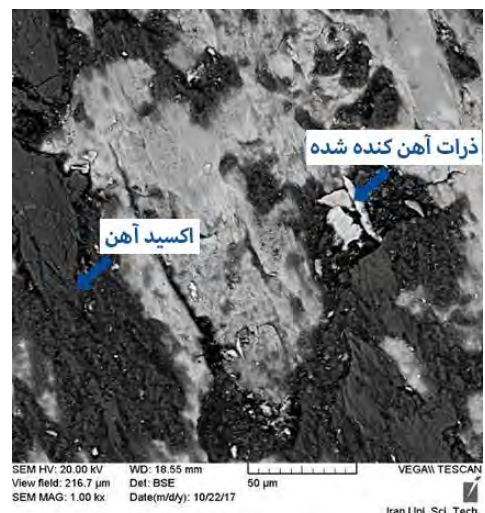
Fe	٪.۷۸
Si	٪.۴
O	٪.۱۷

(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۸- تصاویر سطح سایش نمونه‌ی آستمبر شده تحت نیروی ۲۵ نیوتن (الف) تصویر الکترون برگشتی، (ب) تصویر الکترون ثانویه، (ج) آنالیز عنصری EDS



Fe	۴۷٪
C	۱۱٪
O	٪.۴۱

(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۹- تصاویر سطح سایش نمونه‌ی سریع سرد شده و برگشت داده شده تحت نیروی ۲۵ نیوتن:

(الف) تصویر الکترون برگشتی (ب) تصویر الکترون ثانویه (ج) آنالیز عنصری EDS

لایه‌ی اکسیدی برخوردار نبوده و به دلیل افزایش تغییر شکل در اثر افزایش مسافت، از تشکیل لایه اکسیدی پیوسته در سطح جلوگیری می‌شود، شکل (۸). اما با توجه به شواهد نشان داده شده در شکل (۹) یعنی حضور مناطق اکسیدی وسیع‌تر در سطح سایش (شکل ۹- الف و ج)) می‌توان گفت که در اثر حضور ذرات کاربیدی در نمونه سریع سرد شده و بازگشت داده شده به دلیل اثر بالا بودن درجه حرارت موضعی محل تماس، منجر به تشکیل لایه‌های اکسیدی می‌شود که در نتیجه نقش روان کاری این لایه‌های اکسیدی تماس فلز- فلز از این مناطق قطع شده و در

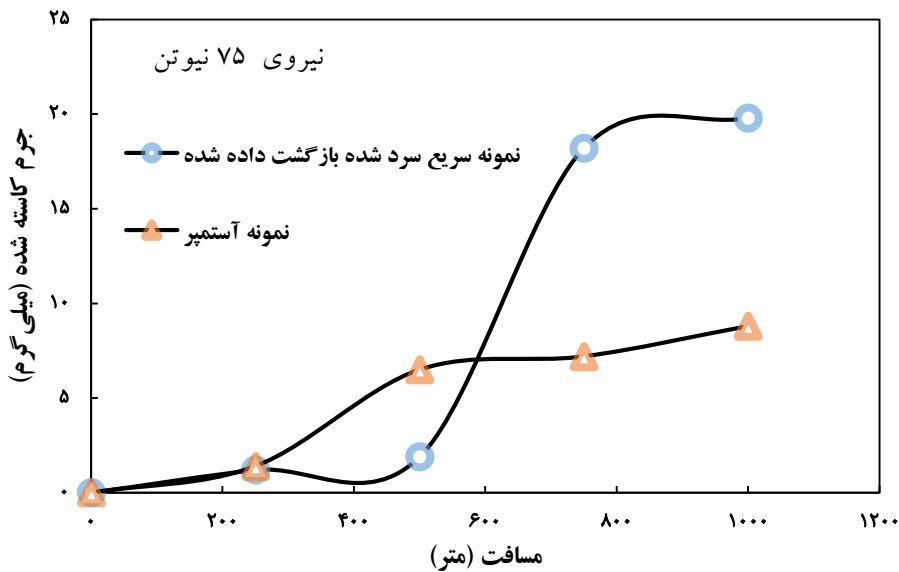
نمودار است. از طرف دیگر گرافیت‌های موجود در سطح به عنوان روان کار جامد عمل می‌نمایند که این امر موجب کاهش ضریب اصطکاک در این مرحله می‌شود. شروع سایش در ابتدا از مکانیزم سایش چسبان تبعیت می‌کند که بین دو سطح فلزی تماس برقرار می‌شود. انجام آزمایش در دمای محیط باعث بالا رفتن دما می‌شود و آنگاه ذرات فلزی تبدیل به ذرات اکسیدی می‌شود، مادامی که این لایه اکسیدی نسبتاً ضخیم باشد سایش ملایم است و زمانی که این لایه کنده می‌شود، سایش سخت و شدید می‌شود. در مورد نمونه‌ی آستمبر شده به نظر می‌رسد سختی سطح (آسفرتی) در نیروی ۲۵ N از استحکام کافی جهت حفظ

Archive of SID

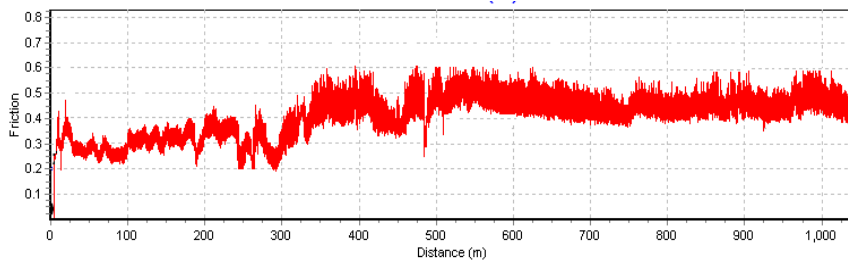
و برگشت داده شده به سبب زمینه مارتنزیتی و حضور کاربیدهای و نمونه‌ی آستمپر شده به سبب روان کاری حالت جامد گرافیت و تغییر در زمینه آسفرتی آن در اثر انجام استحال TRIP دارای مقاومت به سایش خوبی هستند. اما در مسافت‌های بالاتر، نمونه‌ی سریع سرد شده و برگشت داده شده تحت این نیروی بالا، مقاومت به سایش خود را از دست داده و سریعاً کاهش وزن بالا می‌رود. کاهش مقاومت به سایش برای نمونه‌ی سریع سرد شده و برگشت داده، شده در منحنی ضریب اصطکاک در شکل (۱۱) نیز دیده می‌شود.

نتیجه ضریب اصطکاک نیز کاهش پیدا می‌کند، شکل (۷-ب). در نتیجه این امر، نمونه سریع سرد شده و بازگشت داده شده در مقایسه با نمونه آستمپر شده از مقاومت سایشی بالاتری برخوردار است. به عبارت دیگر به دلیل پایین بودن نیروی وارده، اکسید تشکیل شده توسط زیرلایه مارتنزیتی مورد حمایت قرار می‌گیرد [۲۳، ۲۲].

شکل (۱۰)، روند کاهش جرم نمونه‌ها در نیروی ۷۵ نیوتن را نشان می‌دهد. در ابتدای سایش و مسافت‌های اولیه، هر دو نمونه مقاومت سایشی خوبی از خود نشان دادند. نمونه سریع سرد شده

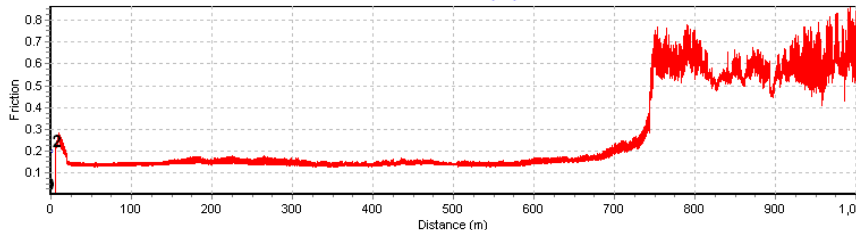


شکل ۱۰- مقایسه کاهش جرم نمونه‌ها در دو حالت آستمپر شده و سریع سرد شده و بازگشت داده شده در نیروی ۷۵ نیوتن



Vertical force : 7.50Kgf Velocity : 0.08m/s Gain : 5.25

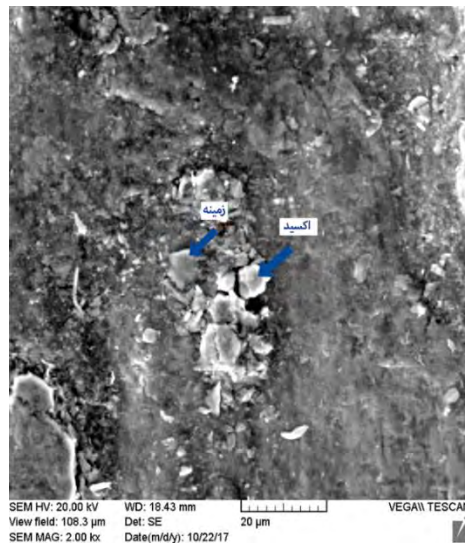
(الف)



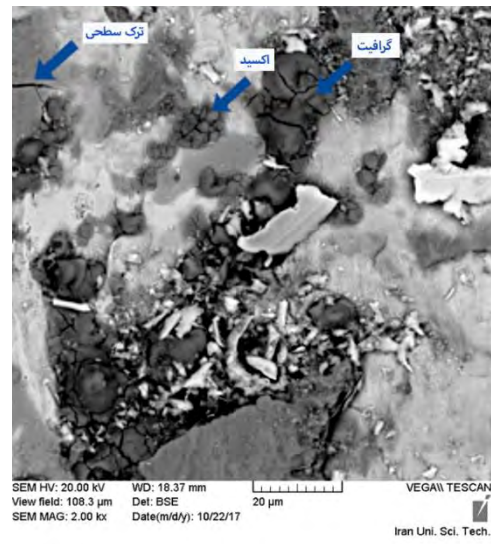
Vertical force : 7.50Kgf Velocity : 0.08m/s Gain : 4.89

(ب)

شکل ۱۱- الف) نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت نمونه‌ی آستمپر شده، تحت نیروی ۷۵ نیوتن  
ب) نمودار تغییر ضریب اصطکاک بر حسب مسافت نمونه‌ی برگشت داده شده، تحت نیروی ۷۵ نیوتن



(ب)



(الف)

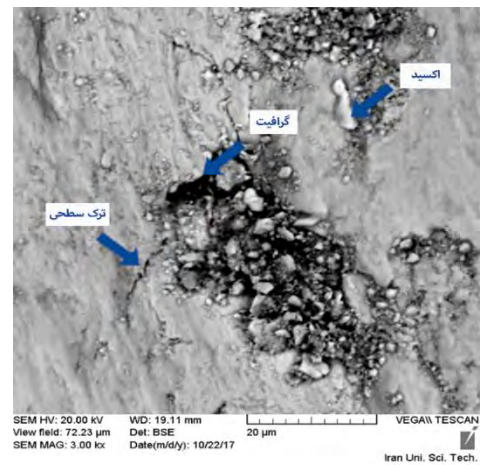
C	٪۱۳
O	٪۹
Fe	٪۷۵
Si	٪۳

(ج)

شکل ۱۲- تصاویر سطح سایش نمونه‌ی آستمپر شده تحت نیروی ۷۵ نیوتن (الف) تصویر الکترون برگشتی، (ب) تصویر الکترون ثانویه، (ج) آنالیز عنصری EDS



(ب)



(الف)

O	٪۳۴
Si	٪۳
Fe	٪۶۳

(ج)

شکل ۱۳- تصاویر سطح سایش نمونه‌ی سریع سرد شده برگشت داده شده تحت نیروی ۷۵ نیوتن:

(الف) تصویر الکترون برگشتی (ب) تصویر الکترون ثانویه (ج) آنالیز عنصری EDS

و در نهایت مقاومت به سایش برای نمونه سریع سرد شده و برگشت داده شده به طور قابل توجهی افت پیدا می‌کند. اما در نمونه آستمپر شده مقاومت به سایش بهتری مشاهده می‌شود. اعمال تغییر شکل بیشتر در نیروی ۷۵ N در این نمونه منجر به افزایش مقدار مارتنزیت در اثر تبدیل  $\gamma \rightarrow \text{Mar}$  می‌شود. به این صورت که آستنیت در نمونه‌ی آستمپر شده در اثر تنش‌های مکانیکی در اعمال نیروی سایشی به مارتنزیت تبدیل شده است و باعث بهبود خواص سایشی می‌شود. اثر روان‌کاری گرافیت در این جا نسبت به نیروی پایین تغییر می‌کند و خود از عوامل سایش می‌شود زیرا محل اصلی جوانه زنی و رشد ترک‌ها، همین کره‌های گرافیت هستند. لو و همکاران [۱۵] معتقدند که هنگامی که مواد ساینده در نیروهای زیاد به کره‌های گرافیت می‌رسند، به علت کم بودن استحکام و نداشتن حالت الاستیک

ضریب اصطکاک سریعاً افزایش می‌یابد. در تصاویر سطح سایش این نمونه هم مشخص است (شکل ۱۲) و (شکل ۱۳))، که میزان اکسیژن موجود در سطح نمونه سریع سرد شده و برگشت داده شده، از نمونه آستمپر شده بیشتر است. مکانیزم غالب احتمالی، از نوع سایش اکسیدی است که به دلیل تشکیل لایه‌های اکسیدی، شکل (۱۳-ج)، که توسط زمینه مارتنزیتی سخت حفظ می‌شود، ضریب اصطکاک به طور قابل توجهی تا مسافتی نزدیک به ۷۰۰ متر ابتدایی به حداقل رسیده است (و پس از آن تغییر قابل ملاحظه‌ای در نمودار مشاهده می‌شود)، شکل (۱۱-ب). اما در ادامه لغزش سطوح با ایجاد حرارت موضعی بیشتر در تماس واقعی پین و دیسک، مارتنزیت بیشتری برگشت داده می‌شود و سختی زمینه کاهش پیدا می‌کند که قادر به حفظ ذرات کاربیدی و همین‌طور اکسیدهای تشکیل شده نخواهد بود



## مراجع

- [1] Rundman K.B., Moore D.J., Hayrynen K.L., Dubensky W.J., Rouns T.N., The microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron, *Journal of Heat Treatment*, 1988, 79-95.
- [2] Keough J. R., An ADI market primer, *Foundry Management*, 1999, 27-31.
- [3] Sellamuthu P., Samuel D.G., Harris D.D., Premkumar V., Li Z., Seetharaman S., Austempered Ductile Iron (ADI): Influence of austempering temperature on microstructure, mechanical and wear properties and energy consumption, *Metals*, 2018, 8, 53.
- [4] منتظری س.م.، کزازی آ.، بوتراپی س.م.ع.، سینتیک آستمپرینگ چدن با گرافیت فشرده حاوی ۵٪ آلومینیم، ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی مواد و متالورژی، ۱۳۹۶.
- [5] شاکری ب.، بوتراپی س.م.ع.، بررسی ریزساختار و سختی چدن نشکن آلومینیمی آستمپر شده (Fe-3.4C-4.3Al-Mg) در محدوده بینایت بالایی، پژوهشنامه ریخته‌گری، تابستان ۱۳۸۹، جلد ۳، شماره ۲، صفحات ۷۵-۹۰.
- [6] Rouns, T.N., Rundman, K. B., Constitution of Austempered ductile iron and kinetics of austempering, *AFS Trans*, 1987, 399-409.
- [7] Sohi M.H., Nili Ahmadabadi M., Bahrami Vahdat A., The role of austempering parameters on the structure and mechanical properties of heavy section ADI, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 153-154, 203-208.
- [8] Harding R.A., The production, properties and automotive applications of austempered ductile iron, *Kovove Materialy*, 2007, 1-16.
- [9] ASM handbook Volume 04 Heat Treating, 2008.
- [10] Hayrynen K.L., Brandenberg K. R., Keough J.R., Application of Austempered Ductile Irons, *AFS Transactions*, 2002, 1-10.
- [11] Suh N.P., Tribophysics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, USA, 1986.
- [12] Totten G.E. ASM Handbook, Volume 18: Friction, Lubrication and Wear Technology. ASM international, Cleveland, 1992.
- [13] Palak A., Tanusz C., The mechanism of chages in the Surface layer of gray cast iron automotive brake disc, *Materials Research*, 2005, 435-479.
- [14] اصل رحیمی م.ع.، بررسی خواص مکانیکی، رفتار سایشی و سختی‌پذیری چدن نشکن آستمپر حاوی عناصر آلیاژی Mo-Ni-Cu، پنجمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید، تهران، انجمن مهندسی ساخت و تولید، ۱۳۸۱.
- [15] Luo Q, Xie J, Song Y., Effects of microstructures on the abrasive wear behaviour of spheroidal cast iron, *Wear*, 1995, 184(1)1-10.
- [16] Fordyce E P, Allen C., The dry sliding wear behaviour of an austempered spheroidal cast iron, *Wear*, 1990, 135(2) 265-278.
- [17] Haseeb A.S.M.A., Islam M.A., Bepari M.M.A., Tribological behaviour of quenched and tempered, and austempered ductile iron at the same hardness level, *Wear*, 2000, 244(1-2) 15-19.
- [18] Wang B., Barber G., He M., Sun X., et al., Study of Ausferrite Transformation Kinetics for Austempered Ductile Irons with and without Ni, *SAE Tech*, 2016.
- [19] Rundman K.B., Moore D.J., Hayrynen K.L., Dubensky J., Rouns T.N., The microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron, *Journal of Heat Treatment*, 1988, 79-95.
- [20] George, E. T., Steel Heat Treatments: metallurgy and Technologies, Steel treatment hand book, 2007.

در برابر فشار یا تنش، گرافیت در جهت تنش‌های اعمالی در مرز مشترک گرافیت و زمینه زبانه‌دار می‌شود. با ادامه سایش در اثر تماس با ذرات ساینده، قسمتی از گرافیت کنده شده و به جای آن حفره ایجاد می‌شود. در واقع جای خالی، گرافیت‌ها بهترین محل برای جوانه‌زنی ترک‌ها است پس هرچه لایه‌های آسفرتی دور گرافیت بیشتر باشد، میزان سایش کمتر است. ژانگ و زیلو [۲۴] پی بردند که سطح نمونه آستمپر شده، اکسید شده و روی  $Fe_3O_4$  سطح ایجاد می‌شود. مخلوط لایه‌های اکسیدی و گرافیت باعث جلوگیری از اتصال سطوح تحت سایش می‌شود و چسبندگی بین قله‌های تماس ساینده نمونه کمتر می‌شود. پس مقاومت سایشی بهتر نمونه‌ی آستمپر شده در نیروی ۷۵ N در مقایسه با نمونه سریع سرد شده و برگشت داده شده به دلیل انجام استحاله TRIP است. علت افزایش بیشتر سایش نسبت به نیروی کمتر را می‌توان به از بین رفتن خاصیت روانکاری گرافیت نسبت داد. در تحقیقات وانگ و همکارانش [۲۵] نشان داده شده است که در نیروهای بالا و در مسافت‌های زیاد با توجه به دلایل ذکر شده، چدن آستمپر شده بر نوع سریع سرد شده و بازگشت داده شده برتری دارد [۲۶].

## ۴- نتیجه‌گیری

- ۱- در نمونه‌ی سریع سرد شده و برگشت داده شده، با افزایش نیرو و در مسافت زیاد، میزان کاهش جرم و تخریب افزایش می‌یابد. دلیل این اتفاق احتمالاً می‌تواند به کاهش سختی نمونه در اثر برگشت داده شدن مارتنزیت‌های بیشتر، با افزایش درجه حرارت در سطح تماس، نسبت داده شود.
- ۲- در نیروی پایین، چدن سریع سرد شده و بازگشت داده مقاومت سایشی بالاتری در مقایسه با حالت آستمپر شده از خود نشان می‌دهد. علت این امر را می‌توان به نقش حضور ذرات بسیار ریز کاربرد انتقالی نسبت داد.
- ۳- در نیروی بالا، نمونه‌های آستمپر شده نسبت به آن‌هایی که سریع سرد شده و برگشت داده شده‌اند از مقاومت به سایش بالاتری برخوردارند. دلایل بهبود مقاومت به سایشی در این نمونه‌ها را می‌توان به انجام تحول TRIP در اثر تغییر شکل زیاد سطح نمونه در این نیرو نسبت داد.
- ۴- در نیروی ۲۵ N، مکانیزم غالب احتمالی سایش، در چدن آستمپر شده از نوع چسبان همراه با تشکیل لایه‌ی تریبولوژیکی و در نمونه‌ی سریع سرد شده و بازگشت داده شده از نوع اکسیدی بوده است. درحالی که در نیروی بالا، ۷۵ N تقریباً عکس چنین مکانیزمی اتفاق افتاده است.

- [25] Wang B., et al., Tribological performance of austempered and tempered ductile iron, Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49, 2261-2269.
- [26] Pourasiabi H., Saghafian H., Pourasiabi H., Effect of Austempering Process on Microstructure and Wear Behavior of Ductile Iron Containing Mn-Ni-Cu-Mo, Metals and Materials International, 2013, 67-76.
- [21] Hutchings I., Shipway, P., Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Butterworth-Heinemann, Second Edition, 2017.
- [22] Balachandran G., Vadiraj A., Kamaraj, Kazuya E., Mechanical and wear behavior of alloyed gray cast iron in the quenched and tempered and austempered condition, Materials Design, 2011, 4042-4049.
- [23] Davis J.R., Cast irons ASM specialty handbook, 1st ed. ASM International, 1996.
- [24] Lu G.X. Zhange H., Sliding wear characteristics of austempered ductile iron with and without laser hardening, Wear, 1990, 138(1-2) 1-12.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

## Founding Research Journal

### Research Paper:

### Comparison of Wear Behavior of a Ductile Iron in Austempered and Quenched- Tempered Conditions

Hassan Saghafian Larijani<sup>1\*</sup>, Soheil Navaie<sup>2</sup>, Ali Sharifi<sup>2</sup>

1. Associate Professor, 2. Graduated Student,

School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Technology, Tehran, Iran

\* **Corresponding Author:** P.O. Box 16846-13114, Narmak, Tehran, Iran. Tel/Fax: +98 21 77240371, saghafian@iust.ac.ir

#### Paper history:

Received: 19 April 2019

Accepted: 12 August 2019

#### Abstract:

In this study, wear behavior of the pearlitic ductile cast iron samples with the same hardness achieved by applying two different heat treatment cycles have been studied. A number of these samples after austenitizing at 900°C were quenched into a molten salt bath of 290°C for holding time of 120 minutes followed by cooling in air. The rest of the samples after being austenitized under the same conditions were quenched in oil and then were tempered in 505°C for 75 minutes. To compare wear behavior of the aforementioned cast irons, the “pin on the disk” method based on the ASTM-G99 standard was used. In this method, the samples were prepared in the form of disks and were worn by 52100 steel pins for a constant distance of 1000 meters and the sliding speed of 0.08 m/s at the applied loads of 25 N and 75 N. Based on the results obtained from the wear surface observations, mass reduction and friction coefficient measurements of the worn samples, it was revealed that at the lower applied load, the quenched and then tempered samples exhibited a higher wear resistance comparing to the austempered samples. Whereas at the higher applied load (75 N) the inverse result was achieved.

#### Keywords:

Ductile cast iron,  
Austempering,  
Quench and temper,  
Heat treatment,  
Wear.

#### Please cite this article using:

Hassan Saghafian Larijani; Soheil Navaei; Ali Sharifi, Comparison of Wear Behavior of a Ductile Iron in Austempered and Quenched- Tempered Conditions, in Persian, Founding Research Journal, 2019, 3(3) 141-150.

DOI: 10.22034/frj.2019.179001.1079

Journal homepage: [www.foundingjournal.ir](http://www.foundingjournal.ir)