

Research Paper

Effect of Silicon on Microstructure and Wear Resistance of Aluminum-Bearing Gray Cast Iron

Ehsan Sanatizadeh¹, *Hassan Jafari²

1- MSC, Faculty of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Khomeynishahr Branch, Isfahan, Iran

2- Associate Professor, Materials Engineering Department, Faculty of Materials Engineering and Modern Technologies, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

Citation: Sanatizadeh E, Jafari H. Effect of Silicon on Microstructure and Wear Resistance of Aluminum-Bearing Gray Cast Iron. Metallurgical Engineering 2017; 19(4) 285-294 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.53056.1111>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.53056.1111>

ABSTRACT

Gray cast iron is among the most common and important engineering material that plays a significant role and has many applications in various industries, including the automotive and machinery manufacturing. It still attracts researchers' interest to improve its properties and maintain its position among the engineering materials. In this research, the microstructure of plain cast iron as well as those containing 4 wt% aluminum with different amounts of silicon, 1 to 4 wt%, was studied. Pin-on-disc method was used to evaluate the wear resistance of the cast irons. The results showed that the addition of aluminum to gray cast iron brings about the formation of ferrite phase, which accompanies a decrease in hardness value. In addition, the increase in silicon content in aluminum bearing cast iron up to 2wt% intensifies the formation of ferrite phase, while further increase to 3 wt% results in emerging a Fe-Al-Si intermetallic compound. In gray cast iron with constant 4 wt% aluminum, increasing silicon content to 3 wt% and 4 wt% leads to improve the hardness value due to the increased percentage of intermetallic phase. Confirming microstructure evolution as well as hardness values, the results of wear experiment approved lower wear rate in cast irons containing intermetallic phase. In contrast, the lowest wear resistance was observed in aluminum bearing cast iron containing 2 wt% silicon.

Keywords: Gray cast iron, Aluminum, Silicon, Microstructure, Hardness, Wear

■ ■

* **Corresponding Author:**

Hassan Jafari, PhD

Address: Faculty of Materials Engineering and Modern Technologies, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

Tel: +98 (21) 22970022

E-mail: hjafari@srttu.edu

تأثیر سیلیسیم بر ریزساختار و مقاومت به سایش چدن خاکستری آلومینیم‌دار

احسان صنعتی‌زاده^۱، حسن جعفری^۲

۱- دانش‌آموخته مقطع کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد واحد خمینی شهر اصفهان، اصفهان، ایران
 ۲- دانشیار گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی مواد و فناوری‌های نوین، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

چدن خاکستری جزو معمول‌ترین و مهم‌ترین مواد مهندسی هستند که نقش قابل توجه و کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف، از جمله خودروسازی و ساخت ماشین‌آلات دارند و هنوز هم مورد توجه محققین به منظور بهبود خواص و حفظ جایگاه این فلز در میان مواد مهندسی می‌باشد. در این تحقیق، ریزساختار چدن خاکستری غیر آلیاژی و همچنین چدن‌های خاکستری محتوی ۴٪ وزنی آلومینیوم با مقدار متغیر ۱ تا ۴٪ وزنی سیلیسیم مورد بررسی قرار گرفته و مقاومت به سایش آن‌ها به روش پین بر روی دیسک ارزیابی شد. نتایج نشان داد که افزودن آلومینیوم به چدن خاکستری باعث تشکیل فاز فریت می‌گردد که کاهش سختی را به دنبال دارد. همچنین افزودن سیلیسیم تا ۲٪ وزنی به چدن خاکستری آلومینیم‌دار، موجب تشدید در تشکیل فاز فریت شده و افزودن بیش از ۲٪ وزنی، موجب تشکیل ترکیب بین فلزی Fe-Al-Si می‌شود. در چدن خاکستری محتوی ۳٪ و ۴٪ وزنی سیلیسیم، با ثابت بودن درصد آلومینیوم در ۴٪ وزنی، به دلیل افزایش درصد فاز بین فلزی، سختی نیز افزایش می‌آید. نتایج حاصل از آزمون سایش با تأیید نتایج ریزساختار و سختی، مؤید نرخ سایش کمتر در چدن‌های محتوی فاز بین فلزی بودند. در مقابل کمترین مقاومت سایشی در چدن آلومینیم‌دار محتوی ۲٪ سیلیسیم دیده شد.

واژه‌های کلیدی: چدن خاکستری، آلومینیم، سیلیسیم، ریزساختار، سختی، سایش

۱. مقدمه

با پیشرفت علم و نیاز روز افزون به بهبود مواد مورد استفاده در قطعات، استفاده از چدن‌های آلیاژی به منظور حصول به ترکیب ویژگی‌هایی نظیر کاهش وزن، خواص مکانیکی بهبود یافته به همراه مقاومت به سایش، خوردگی، اکسیداسیون و غیره را افزایش داده است. آلومینیوم و سیلیسیم از عناصری می‌باشند که به وفور در طبیعت وجود دارند. آلومینیوم از عناصری است که در سال‌های اخیر در ترکیبات آلیاژی چدن‌ها به وفور دیده می‌شود [۹-۷]. چدن‌های آلومینیوم‌دار در دو نوع خاکستری و نشکن وجود دارند. محققین بر این باورند که آلومینیوم و سیلیسیم، اثر مشابه بر روی سیستم آلیاژی آهن-کربن دارند؛ از این رو، تلاش شده است تا از آلومینیوم به جای سیلیسیم استفاده شود [۱۰]. با این حال، در چدن خاکستری علاوه بر سیلیسیم، آلومینیوم نیز می‌تواند حضور داشته باشد. این چدن‌ها به دلیل مقاومت قابل قبول در برابر حرارت و خزش و همچنین وجود عناصر آلیاژی نسبتاً ارزان در ترکیب شیمیایی، مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۱]. متأسفانه ریخته‌گری چدن‌های آلومینیوم‌دار از مشکلات تکنولوژیکی این فلز است، زیرا آلومینیوم در دمای ذوب‌ریزی

چدن خاکستری به دلیل خواص ویژه‌ای نظیر خواص مکانیکی خوب، مقاومت مناسب در برابر سایش، هدایت حرارتی خوب، خواص اصطکاکی ویژه، قابلیت بالای میرایی ارتعاش، قابلیت ماشین‌کاری خوب و قیمت پایین به طور متنوعی در صنایع، مخصوصاً کاربردهای مختلف در صنعت خودرو، مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیستون، سیلندر، بلوک و سرسیلندر موتورهای بنزینی و دیزلی، و همچنین میل بادامک، چند نمونه از کاربردهای این فلز مهندسی در صنعت خودرو می‌باشد [۱ و ۲]. از مهم‌ترین و قدیمی‌ترین کاربرد این چدن، قطعات ترمز و کلاچ خودرو سال‌هاست که از زمینه کاملاً پرلیتی و نوع گرافیت A، ساخته می‌شود [۳] که به دلیل استحکام خستگی حرارتی فوق‌العاده به همراه دیگر خواص ویژه آن است [۴]. خواص چدن‌های خاکستری به زمینه و اندازه، مقدار و نحوه توزیع گرافیت بستگی دارد [۵]. لذا ریزساختار و خواص چدن می‌تواند با افزودن عناصر آلیاژی که تأثیر قابل توجهی بر نوع گرافیت و زمینه دارد اصلاح شود [۱]. چدن‌های خاکستری می‌توانند از زمینه‌های متنوعی شامل فریت، پرلیت، بینیت و یا مارتزیت و یا ترکیب آن‌ها باشند [۶].

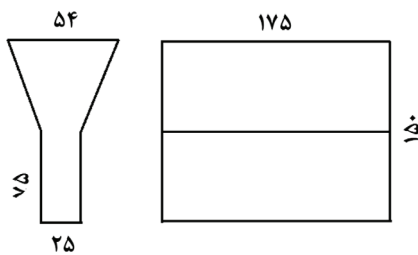
* نویسنده مسئول:

دکتر حسن جعفری

نشانی: تهران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده مهندسی مواد و فناوری‌های نوین

تلفن: ۰۲۲ ۲۲۹۷۰۰۲۲ (۲۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: hjafari@srutu.edu



تصویر ۱. نقشه ساده و ابعاد (بر حسب میلی‌متر) مدل Y بلوک استاندارد مورد استفاده برای تهیه قالب ماسه‌ای

جدول ۱. ترکیب شیمیایی اسمی چدن‌های ریخته شده.

نوع چدن	عناصر آلیاژی (%wt)	
	سیلیسیم	آلومینیوم
غیرآلیاژی (پایه)	۰	۱
آلومینیوم‌دار	۴	۱
آلومینیوم - سیلیسیم‌دار	۴	۲
آلومینیوم - سیلیسیم‌دار	۴	۳
آلومینیوم - سیلیسیم‌دار	۴	۴

جدول ۲. ترکیب شیمیایی (بر حسب درصد وزنی) شمش چدن خام و فروسیلیس مورد استفاده در پژوهش.

عناصر	کربن	سیلیسیم	منگنز	آلومینیوم	فسفر	گوگرد	آهن
شمش چدن خام	۳/۷۳	۱/۴۶	۰/۷۲	-	Max ۰/۱۲	Max ۰/۰۴	بقیه
فروسیلیس	Max ۰/۰۵	۷۵/۷۱	-	۰/۴۸	Max ۰/۰۲	Max ۰/۰۰۴	بقیه

به منظور تنظیم و کاهش مقدار کربن و سیلیسیم در ترکیب چدن‌ها، از قراضه فولاد کم‌کربن استفاده شد. جهت ذوب مواد و کنترل مناسب دمای ذوب، از کوره القایی (ایندوترم^۱، ۱۰۰ کیلوپی با فرکانس متوسط) استفاده شد. با توجه به اینکه دمای ذوب آلومینیوم تقریباً نصف دمای ذوب چدن خاکستری است و با اضافه کردن آلومینیوم به چدن ذوب شده، درصد زیادی از آن اکسید می‌شود، شمش آلومینیوم درون پاتیل جداگانه‌ای ذوب گردید و چدن ذوب شده در پاتیل دیگر به آن اضافه گردید. سپس مذاب تهیه شده توسط یک میله سرامیکی به آرامی هم‌زده شد و درون قالب ماسه‌ای به شکل Y بلوک بر اساس استاندارد ASTM A536 (تصویر ۱) ریخته‌گری شد. آنالیز شیمیایی مذاب‌های تهیه شده به روش شیمی تر انجام گردید.

بررسی ریزساختار

به منظور آماده‌سازی نمونه‌های چدنی ریخته شده جهت انجام متالوگرافی و بررسی ریزساختار آن‌ها، نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۲۰ و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر برش و تراشکاری شد و پس از سمباده‌زنی، پولیش کاری و اچ با محلول نایتال ۲٪، به بررسی ریزساختار پرداخته شد. از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ (SEM) به منظور مشاهده و ارزیابی ریزساختار استفاده گردید. همچنین از آنالیزهای طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۳ (EDS) و الگوی پراش پرتو ایکس^۴ (XRD) برای تشخیص فازهای موجود در ریزساختار بکار گرفته شد.

1. Inductotherm
2. Scanning electron microscope
3. Energy dispersive spectroscopy
4. X-ray diffraction

چدن، بسیار فعال است و لازم است تماس مذاب با هوا و رطوبت به حداقل برسد تا از تشکیل سرباره فلزی، سطح ناصاف و قطعه ناسالم جلوگیری شود [۱۲].

برای افزایش سختی و مقاومت به سایش چدن خاکستری معمولاً از عناصر آلیاژی نظیر وانادیوم، کروم و منگنز استفاده می‌شود ولی قیمت تمام شده بالای چدن‌های آلیاژ شده با این عناصر و مشکلات آلیاژسازی آن‌ها، محدودیت‌های زیادی را ایجاد می‌کند. از طرف دیگر، در حال حاضر در مقایسه با اغلب خصوصیات مکانیکی، اطلاعات محدودی در رابطه با ویژگی‌های سایشی چدن‌ها در دسترس است [۱۳]. لذا هدف از انجام این تحقیق، بررسی امکان دستیابی به یک چدن خاکستری آلیاژی با عناصر آلیاژی ارزان قیمت آلومینیوم و سیلیسیم با ویژگی‌های سایشی مناسب است. در این تحقیق ابتدا ریزساختار و سپس مقاومت به سایش چدن خاکستری آلومینیوم‌دار آلیاژ شده با درصدهای مختلف سیلیسیم پرداخته می‌شود.

۲. روش آزمایش

تولید آلیاژ

به منظور بررسی رفتار مقاومت به سایش چدن خاکستری آلومینیوم‌دار آلیاژ شده با درصدهای مختلف سیلیسیم و دستیابی به ترکیب آلیاژی با مقاومت به سایش مناسب، پنج نمونه چدن خاکستری با آنالیز اسمی ارائه شده در جدول ۱ ریخته‌گری شد. برای تهیه مذاب چدن‌های مورد نظر با ترکیب اسمی ارائه شده در جدول ۱، از ترکیب مناسب شمش چدن خام و فروسیلیس ۷۵٪ با ترکیب‌های شیمیایی ارائه شده در جدول ۲ و شمش آلومینیوم خالص (۹۹/۸٪) استفاده گردید.

جدول ۳. ترکیب شیمیایی (بر حسب درصد وزنی) چدن‌های تولید شده.

شماره چدن	عناصر							کربن معادل	آهن
	کربن	سیلیسیم	منگنز	فسفر	گوگرد	مس	آلومینیم		
۱	۴/۴۸	۱/۰۳	۰/۲۷	۰/۰۳۱	۰/۰۵۸	۰/۰۲	۰/۰۰۷	۹۴/۳۹	
۲	۴/۴۴	۰/۹۸	۰/۲۷	۰/۰۳۱	۰/۰۵۸	۰/۰۲	۴/۳۱۰	۹۰/۱۷	
۳	۴/۳۵	۲/۰۱	۰/۳۸	۰/۰۱۷	۰/۰۱۳	۰/۰۹	۴/۱۲۰	۸۹/۵۷	
۴	۴/۳۱	۳/۰۷	۰/۳۱	۰/۰۳۰	۰/۰۲۱	۰/۰۸۵	۴/۱۹۰	۸۹/۰۳	
۵	۴/۳۲	۳/۹۱	۰/۲۲	۰/۰۲۷	۰/۰۱۴	۰/۰۹۵	۴/۲۳۰	۸۸/۲۸	

آزمایش سختی و سایش

متوسط سختی چدن‌های ریخته شده با تهیه نمونه‌های دیسکی شکل به قطر ۲۰ mm و ضخامت ۱۰ mm و استفاده از روش ویکرز با اعمال بار ۲۰ kg برای مدت ۱۵ ثانیه بر روی حداقل پنج نقطه از سطح اندازه‌گیری شد. در آزمون سایش، نرخ سایش از کاهش وزن نمونه بدست آمد. برای این منظور از روش پین بر روی دیسک^۵ بر اساس استاندارد ASTM 99G با نمونه‌های چدن به عنوان دیسک با ابعاد یکسان ۵۰ mm و ضخامت ۵ mm و پین از جنس فولاد سخت شده ۴۱۴۰ به قطر ۱۰ mm و ارتفاع ۲۵ mm استفاده گردید. سرعت چرخش پین بر روی دیسک‌های چدنی ۰/۱ m/s در نظر گرفته شد. میزان بار اعمالی بر روی پین بصورت متغیر به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ نیوتن و مسافت طی شده در طی این آزمایش ۱۰۰۰ متر انتخاب گردید.

۳. نتایج و بحث

جدول ۳ ترکیب شیمیایی ۵ چدن ساخته شده را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود ترکیب شیمیایی تمامی چدن‌ها طوری انتخاب شده است که کربن معادل چدن‌ها در محدوده یوتکتیک قرار گیرد. کربن معادل چدن‌ها توسط رابطه (۱) محاسبه گردید [۱۴].

معادله ۱.

$$\%CE = \%C + \%0.33 (Si + P)$$

همچنین مشاهده می‌شود که درصد آلومینیوم در چدن‌های شماره ۲ تا ۵ در محدوده ۴٪ وزنی قرار دارد. در طول مراحل تهیه ذوب، با استفاده از روش کوانتومتری و شیمی تر و همچنین تهیه ذوب‌های مکرر، سعی بر آن بود که درصد عناصر اصلی موجود در ذوب به صورت ثابت و مورد انتظار نگه داشته شود.

تصاویر ریزساختار نمونه‌های چدنی ریخته شده قبل و بعد از اچ کردن به ترتیب در تصاویر شماره ۲ و ۳ نشان داده شده است. با توجه به تصاویر متالوگرافی در تصویر ۲ می‌توان مشاهده نمود که در چدن شماره ۱ که فاقد آلومینیوم می‌باشد

(تصویر a-۲) لایه‌های گرافیت نسبت به سایر چدن‌ها، خشن‌تر و درشت‌تر و فواصل میان آن‌ها نیز بیشتر است. شکل چدن شماره تصویر b-۲ که محتوی ۴٪ وزنی آلومینیوم است بیانگر افزایش تعداد گرافیت‌ها و ظریف‌تر شدن آن‌ها نسبت به چدن شماره ۱ می‌باشد که به دلیل کاهش حلالیت کربن در چدن مذاب در حضور آلومینیوم است و سبب تشکیل بیشتر گرافیت می‌شود [۱۵ و ۱۶]. به عبارت دیگر، آلومینیوم اکتیویته کربن را در مذاب افزایش می‌دهد که برای تشکیل گرافیت در حین استحاله یوتکتیک مناسب است. در این چدن (شماره ۲) مشاهده می‌شود که گرافیت‌ها از نوع B یا روزت^۶ می‌باشد.

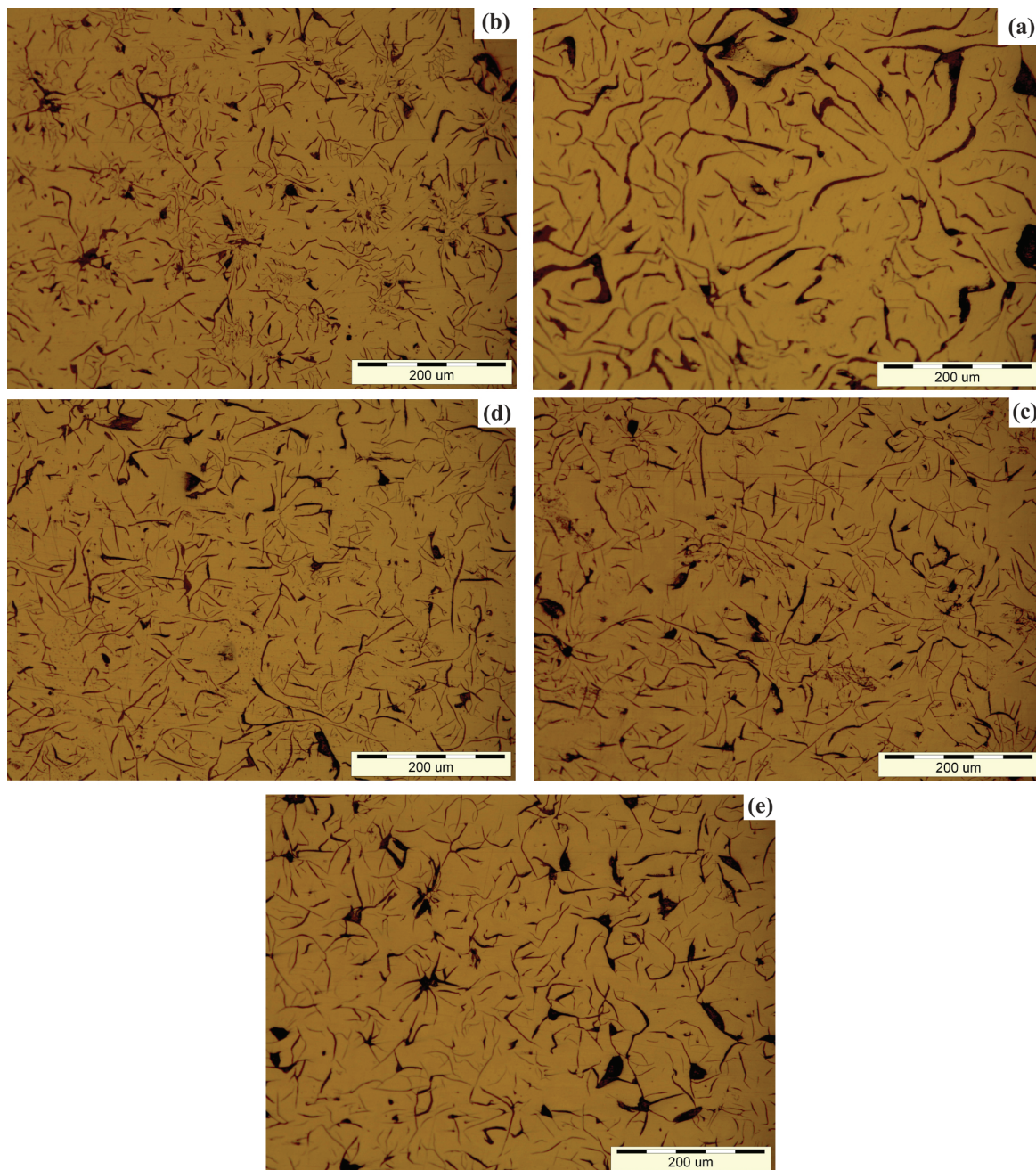
در چدن شماره ۳ که محتوی ۴٪ وزنی آلومینیوم و ۲٪ وزنی سیلیسیم می‌باشد (c-۲) مشاهده می‌شود که اثر عناصر آلیاژی فقط به طور بسیار ناچیزی موجب افزایش ضخامت گرافیت‌ها شده است و به میزان کمی نوع گرافیت‌ها را از نوع B به سمت نوع A سوق داده است. ذکر این نکته ضروری است که یکی از دلایل حضور گرافیت‌های نوع B، ضعف تلقیح^۷ است که افزایش عنصر سیلیسیم، افزایش تمایل گرافیت‌زایی مذاب را به دنبال داشته [۱۷] و موجب تشکیل گرافیت نوع A که به دیگر انواع گرافیت‌ها ترجیح داده می‌شود می‌گردد. افزایش سیلیسیم به ۳٪ وزنی (چدن شماره ۴، تصویر d-۲)، افزایش بیشتر ضخامت لایه‌های گرافیت را نسبت به چدن‌های دیگر به دنبال دارد. همانطور که از این تصویر دیده می‌شود تعداد گرافیت‌ها در واحد سطح نسبت به دو چدن قبلی کمتر می‌باشد.

در چدن شماره ۵ با ۴٪ وزنی آلومینیوم و ۴٪ وزنی سیلیسیم، اثر مشترک این دو عنصر آلیاژی چدن موجب کاهش تعداد گرافیت‌های این چدن نسبت به چدن‌های قبلی شده است (e-۲). ضخامت لایه‌های گرافیت در این نمونه نسبت به نمونه‌های قبلی بیشتر می‌باشد. با توجه به شکل گرافیت‌های تشکیل شده و ضخامت آنها، نوع گرافیت در این آلیاژ نیز از نوع A می‌باشد. از تصاویر ریزساختار چدن‌های ریخته شده پس از اچ شدن (تصویر ۳) می‌توان دریافت که افزودن آلومینیوم و سیلیسیم به چدن پایه، ریزساختار را

6. Rosette

7. Inoculation

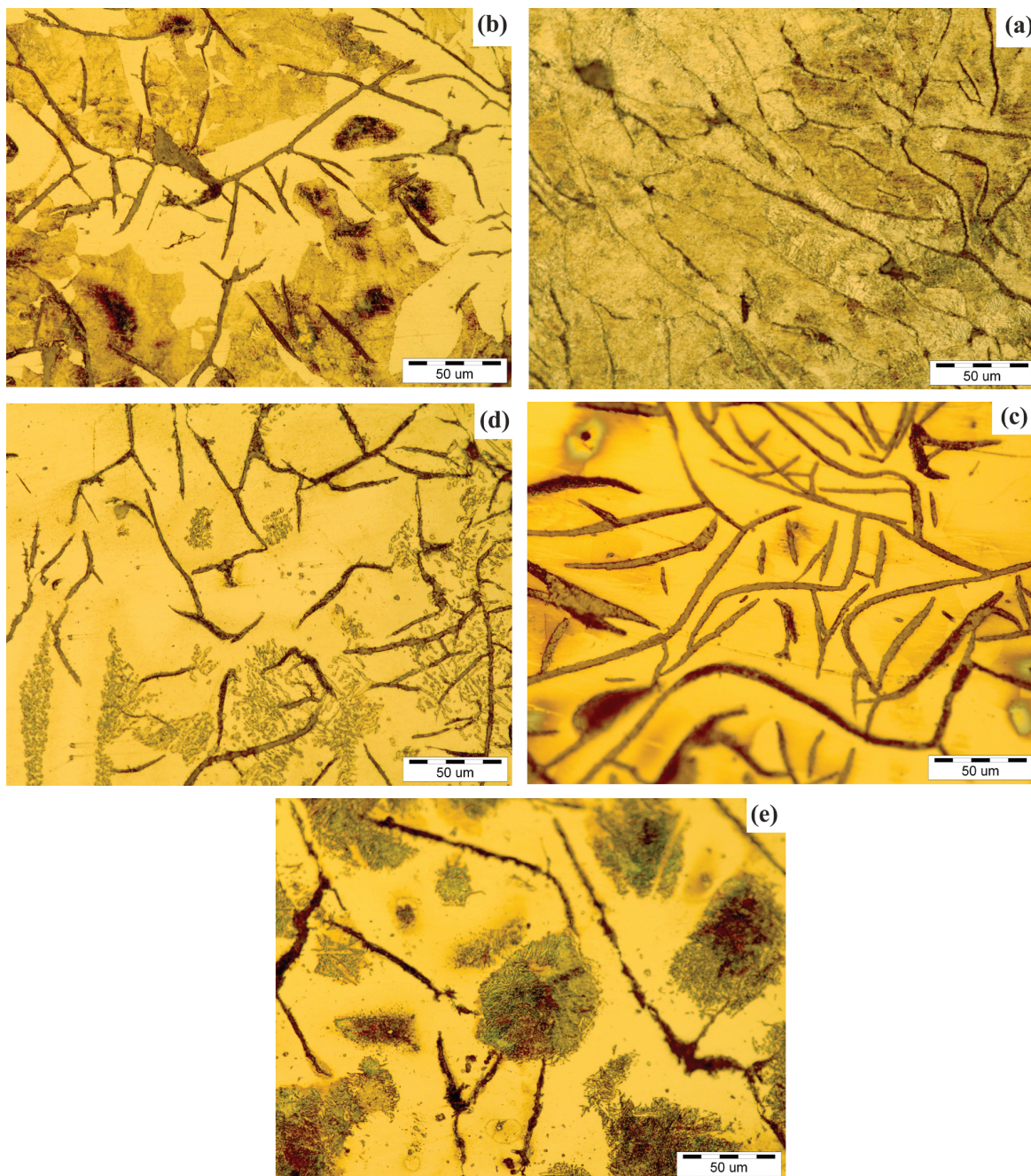
5. Pin-on-disk



تصویر ۲. ریزساختار چدن‌ها قبل از اچ؛ (a) چدن شماره ۱ محتوی ۱٪ وزنی سیلیسیم و بدون آلومینیم، (b) چدن شماره ۲ محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم و ۱٪ وزنی سیلیسیم، (c) چدن شماره ۳ محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم و ۲٪ وزنی سیلیسیم، (d) چدن شماره ۴ محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم و ۳٪ سیلیسیم و (e) چدن شماره ۵ محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم و ۴٪ وزنی سیلیسیم.

چدن کاملاً پرلیتی می‌باشد (تصویر a-۳). در چدن شماره ۲، حضور آلومینیم به میزان ۴٪ وزنی موجب خروج کربن از زمینه شده و عامل گرافیت‌زایی آلومینیم [۱۵ و ۲۰] علاوه بر افزایش و ضخیم‌تر شدن گرافیت‌ها، تشکیل مقداری از فاز فریت در زمینه را موجب شده است (تصویر b-۳). در چدن شماره ۳ همانطور که از تصویر c-۳ مشاهده می‌شود افزودن سیلیسیم و حضور آلومینیم به طور هم‌زمان عامل گرافیت‌زایی را تشدید کرده و موجب خروج بیشتر کربن

مستعد به تشکیل فاز فریت در زمینه نموده است. در واقع، آلومینیم باعث پایداری فریت در استحالته یوتکتوئید می‌شود و در نتیجه میزان فریت را افزایش می‌دهد [۱۸]. ذکر این نکته جالب است که گزارشات کاملاً متناقضی در خصوص تمایل به ایجاد فریت و یا پرلیت در اثر افزایش آلومینیم در چدن خاکستری به چاپ رسیده است [۱۹] که نتیجه تحقیق حاضر موافق با تمایل به ایجاد فریت است. در چدن شماره ۱ به دلیل عدم حضور آلومینیم و میزان کم سیلیسیم، زمینه

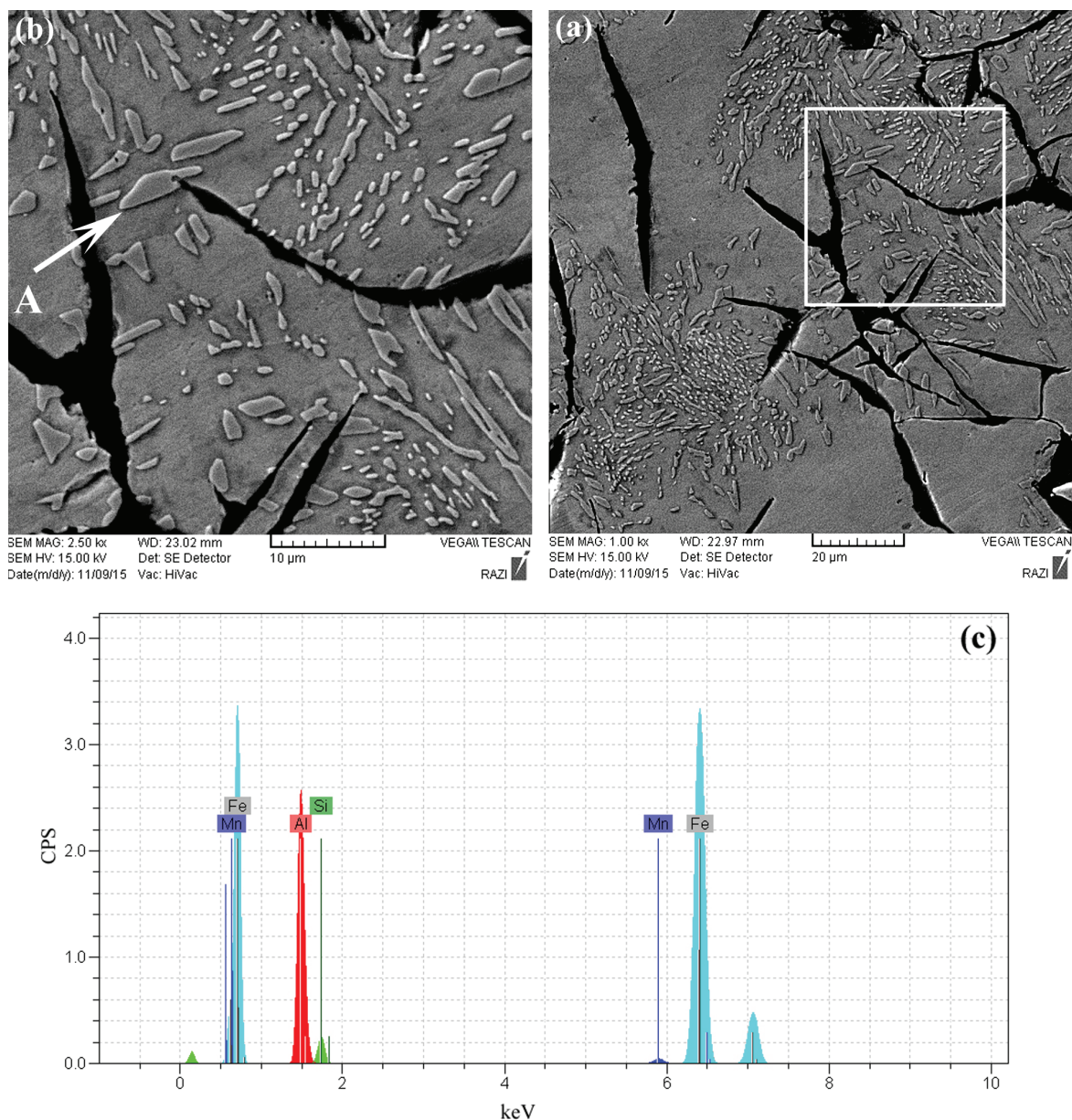


تصویر ۳. ریز ساختار چدن‌ها بعد از اچ؛ (a) چدن شماره ۱ محتوی ۱٪ سیلیسیم و بدون آلومینیم، (b) چدن شماره ۲ محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم و ۱٪ وزنی سیلیسیم، (c) چدن شماره ۳ محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم و ۲٪ وزنی سیلیسیم، (d) چدن شماره ۴ محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم و ۳٪ سیلیسیم و (e) چدن شماره ۵ محتوی ۴۴٪ وزنی آلومینیم و ۴٪ وزنی سیلیسیم.

از تصویر میکروسکوپی ۳-e قابل مشاهده است با حضور آلومینیم و سیلیسیم هر یک به میزان ۴٪ وزنی، فاز تجمع یافته و توده‌ای مذکور حجم بیشتری از زمینه را اشغال کرده است.

تصویر ۴-a از ریزساختار چدن شماره ۵ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ریزساختار این چدن از فازهای فریت زمینه و گرافیت به همراه فازهای ثانویه که به شکل توده‌ای و تجمع یافته کنار یکدیگر قرار دارند تشکیل

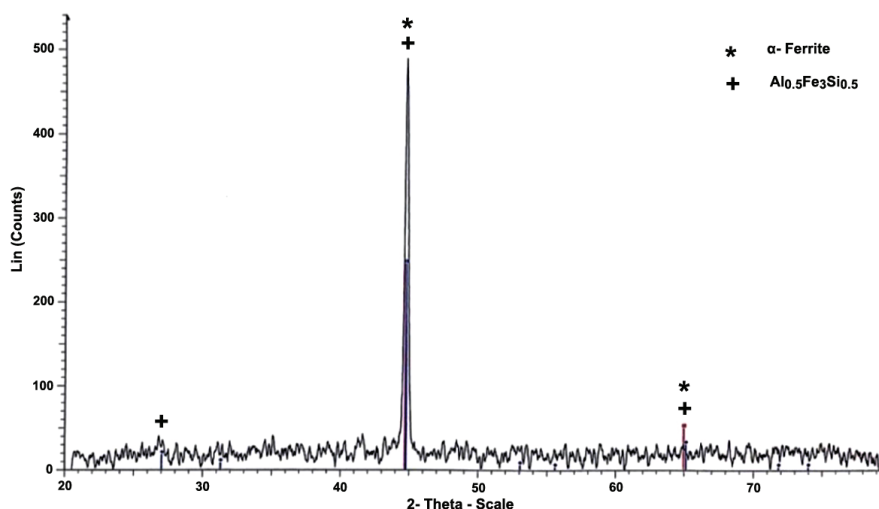
از زمینه و فریتی شدن کامل آن شده است. در چدن‌های شماره ۴ و ۵، با افزایش بیشتر سیلیسیم به ترتیب به ۳٪ و ۴٪ وزنی، آنچه که از تصاویر ۳-d و ۳-e قابل مشاهده است زمینه، کاملاً فریتی می‌باشد ولی فاز جدیدی در زمینه رسوب کرده است. تشکیل این فاز قطعاً در نتیجه افزودن بیشتر سیلیسیم و حضور ۴٪ وزنی آلومینیم می‌باشد که موجب کاهش ضخامت لایه‌های گرافیت نسبت به چدن شماره ۳ (تصویر ۳-c) گردیده است. در چدن شماره ۵ همانطور که



تصویر ۴. تصاویر SEM؛ (a) آلیاژ شماره ۵ محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم و ۴٪ وزنی سیلیسیم، (b) بزرگنمایی شده قسمت مشخص شده، و (c) طیف آنالیز نقطه‌ای EDS فاز توده‌ای شکل مشخص شده با حرف A بر روی تصویر b-۴.

تصویر ۶ مقادیر سختی چدن‌های ریخته شده را با هم مقایسه می‌نماید. همانطور که به وضوح دیده می‌شود چدن شماره ۵ دارای بیشترین سختی و نمونه ۳ دارای کمترین سختی در مقایسه با سایر چدن‌های ریخته شده می‌باشند. سختی در چدن شماره ۲ با افزودن ۴٪ وزنی آلومینیوم به چدن پایه (چدن شماره ۱) به دلیل فریت‌زایی از ۲۲۵ به ۲۰۱ ویکرز کاهش یافته است. با ثابت ماندن درصد آلومینیوم و افزودن ۱٪ وزنی سیلیسیم در چدن بعدی (چدن شماره ۳) به دلیل مشابه، کاهش سختی ادامه پیدا کرده و به ۱۸۶ ویکرز رسیده است. این مقدار کمترین سختی اندازه‌گیری شده در بین چدن‌ها می‌باشد. با افزایش بیشتر سیلیسیم به

شده است. تصویر b-۴ مورفولوژی این فاز را به وضوح نشان می‌دهد. اندازه این فاز از ذرات ریز کمتر از ۱ μm تا ذرات نازک کشیده شده به طول ۱۰ μm متغیر می‌باشند. تصویر c-۴ تصویر آنالیز EDS این فاز توده‌ای شکل (نقطه A در تصویر SEM در تصویر b-۴) را نشان می‌دهد. با توجه به طیف‌های حاصل از این آنالیز می‌توان دریافت که عناصر اصلی این فاز آهن، آلومینیوم و سیلیسیم می‌باشد. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که این فاز توده‌ای یک فاز بین فلزی سه‌تایی می‌باشد. الگوی XRD در تصویر ۵ بیانگر وجود دو فاز کریستالی فریت و بین فلز توده‌ای شکل با ترکیب شیمیایی $\text{Al}_{0.5}\text{Fe}_3\text{Si}_{0.5}$ می‌باشد.



تصویر ۵. الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به چدن شماره نمونه ۵.

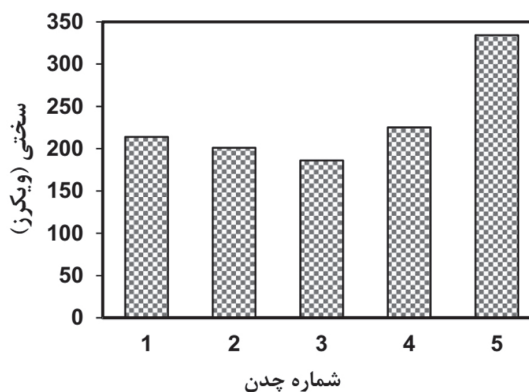
۳) به دلیل مشابه، کاهش سختی ادامه پیدا کرده و به ۱۸۶ ویکرز رسیده است. این مقدار کمترین سختی اندازه‌گیری شده در بین چدن‌ها می‌باشد. با افزایش بیشتر سیلیسیم به ۳٪ و ۴٪ وزنی، به دلیل تشکیل فاز سخت بین‌فلز، سختی چدن‌های مربوطه (به ترتیب چدن‌های شماره ۴ و ۵) در حد بالاتری نسبت به بقیه چدن‌ها قرار گرفتند به طوری که این افزایش به میزان حدود ۵۶٪ و ۸۰٪ به ترتیب در مقایسه با چدن پایه و چدن محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم و ۲٪ وزنی سیلیسیم می‌باشد. همچنین افزایش سیلیسیم از ۳٪ وزنی (چدن شماره ۴) به ۴٪ وزنی (چدن شماره ۵)، موجب افزایش سختی از ۲۲۶ به ۳۳۸ ویکرز، به دلیل حجم بیشتر فاز بین‌فلز $Al_{0.5}Fe_3Si_{0.5}$ در زمینه فریت، شده است

تصاویر a-۷، b-۷ و c-۷ نمودارهای کاهش وزن چدن‌های مورد آزمایش را تحت بارهای به ترتیب ۲۰، ۴۰ و ۶۰ نیوتن پس از طی مسافت ۱۰۰۰ متر تحت آزمایش سایش نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود رفتار کاهش وزن هر یک از چدن‌ها برای تمامی بارها یکسان بوده و رفتار مشاهده شده در چدن‌ها با نتایج سختی آن‌ها نیز مطابقت دارد.

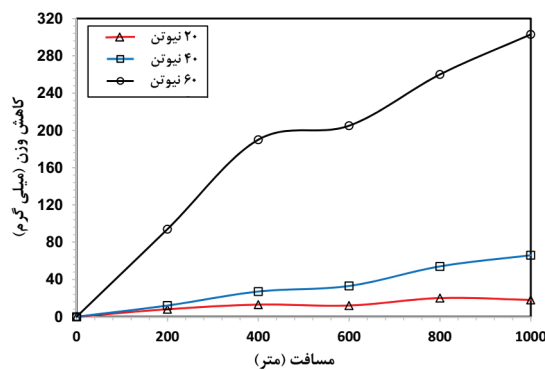
با این حال کاهش وزن در تمامی بارهای اعمالی برای چدن شماره ۳ (محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم و ۲٪ وزنی سیلیسیم) بیشترین میزان را به خود اختصاص داده‌اند که این ویژگی به ساختار کاملاً فریتی آن که کمترین سختی را در بین چدن‌های مورد آزمایش نیز داشت نسبت داده می‌شود. ولی، چدن شماره ۴ (محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم و ۳٪ وزنی سیلیسیم) و مخصوصاً چدن شماره ۵ (محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم و ۴٪ وزنی سیلیسیم)، کمترین میزان کاهش وزن را داشته‌اند. به عبارت دیگر، علیرغم فریتی بودن زمینه آن‌ها و سختی پایین، وجود فاز بین‌فلز و سخت $Al_{0.5}Fe_3Si_{0.5}$ عامل اصلی این رفتار بوده است. به طور مشابه، به دلیل سختی بیشتر پرلیت نسبت به فریت، چدن شماره ۱ (چدن پایه) که

۳٪ و ۴٪ وزنی، به دلیل تشکیل فاز سخت بین‌فلز، سختی چدن‌های مربوطه (به ترتیب چدن‌های شماره ۴ و ۵) در حد بالاتری نسبت به بقیه چدن‌ها قرار گرفتند به طوری که این افزایش به میزان حدود ۵۶٪ و ۸۰٪ به ترتیب در مقایسه با چدن پایه و چدن محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم و ۲٪ وزنی سیلیسیم می‌باشد. همچنین افزایش سیلیسیم از ۳٪ وزنی (چدن شماره ۴) به ۴٪ وزنی (چدن شماره ۵)، موجب افزایش سختی از ۲۲۶ به ۳۳۸ ویکرز، به دلیل حجم بیشتر فاز بین‌فلز $Al_{0.5}Fe_3Si_{0.5}$ در زمینه فریت، شده است

تصویر ۶ مقادیر سختی چدن‌های ریخته شده را با هم مقایسه می‌نماید. همانطور که به وضوح دیده می‌شود چدن شماره ۵ دارای بیشترین سختی و نمونه ۳ دارای کمترین سختی در مقایسه با سایر چدن‌های ریخته شده می‌باشند. سختی در چدن شماره ۲ با افزودن ۴٪ وزنی آلومینیم به چدن پایه (چدن شماره ۱) به دلیل فریت‌زایی از ۲۲۵ به ۲۰۱ ویکرز کاهش یافته است. با ثابت ماندن درصد آلومینیم و افزودن ۱٪ وزنی سیلیسیم در چدن بعدی (چدن شماره



تصویر ۶. نمودار سختی چدن‌های مورد آزمایش.



تصویر ۸. نمودار کاهش وزن چدن محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم و ۳٪ وزنی سیلیسیم در سایش تحت بارهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ نیوتن.

مقایسه با بارهای پایین تر، اثر خود را کمتر به همراه داشته اند [۱۲].

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، ریزساختار، سختی و کاهش وزن ناشی از آزمایش سایش بر روی چدن خاکستری ساده و آلیاژ شده با آلومینیم و همزمان با آلومینیم و سیلیسیم، مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس ارزیابی های صورت گرفته می توان نتیجه گرفت:

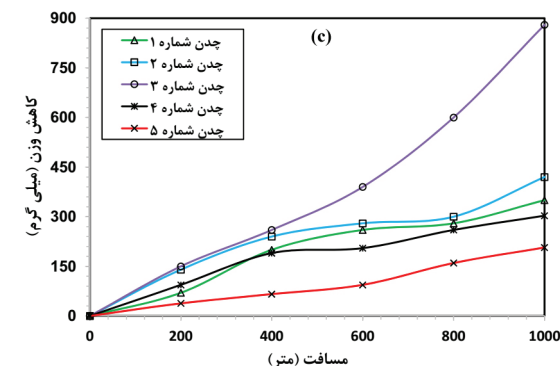
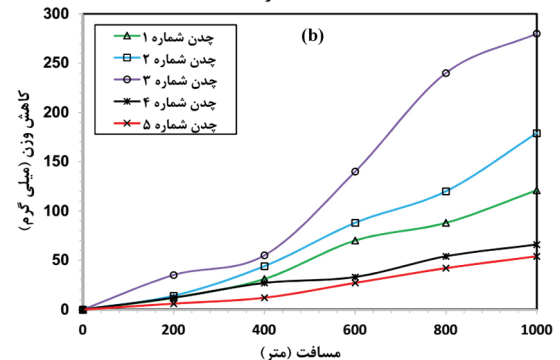
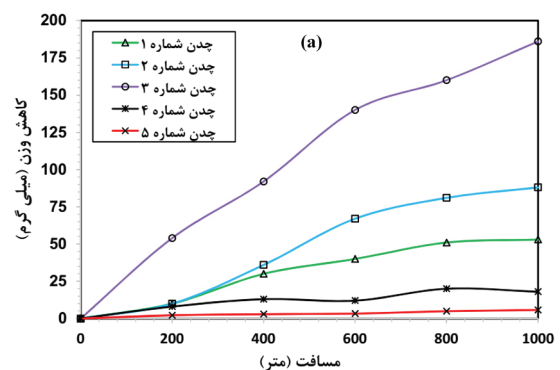
۱. افزودن آلومینیم به میزان ۴٪ وزنی به چدن خاکستری، باعث تشکیل فاز فریت که کاهش سختی آلیاژ را به دنبال دارد، می شود.

۲. افزودن سیلیسیم تا ۲٪ وزنی در چدن خاکستری محتوی آلومینیم تغییر قابل توجهی در نوع گرافیت ننموده ولی موجب تشدید تشکیل فاز فریت می شود. افزودن بیشتر سیلیسیم موجب تشکیل فاز بین فلز $Al_{0.5}Fe_3Si_{0.5}$ که سخت تر شدن این چدن را به همراه دارد می شود.

۳. بیشترین و کمترین مقاومت به سایش در چدن خاکستری محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم با به ترتیب ۴٪ و ۲٪ وزنی سیلیسیم به دست آمد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت های دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی و همچنین دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر در راستای انجام این مطالعه سپاسگزاری می نمایند.



تصویر ۷. تصویر ۷. نمودارهای کاهش وزن چدن ها در آزمایش سایش تحت بارهای (a) ۲۰، (b) ۴۰ و (c) ۶۰ نیوتن.

دارای زمینه کاملاً پرلیتی (تصویر ۳-a) بود مقاومت به سایش بیشتری نسبت به چدن شماره ۲ (چدن محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم و ۱٪ وزنی سیلیسیم) که از زمینه پرلیتی-فریتی (تصویر ۳-b) برخوردار بود نشان داد.

نمودار تصویر ۸ به طور نمونه تأثیر افزایش بار در آزمایش سایش را بر رفتار کاهش وزن چدن شماره ۴ محتوی ۴٪ وزنی آلومینیم و ۳٪ وزنی سیلیسیم نشان می دهد. کاملاً واضح است که افزایش بار موجب کاهش وزن بیشتری در چدن شده است و این کاهش وزن در چدن تحت آزمایش سایش با بار ۶۰ نیوتن بسیار بیشتر از کاهش وزن مربوط به ۲۰ و ۴۰ نیوتن است. همین رفتار در تمام چدن های دیگر نیز به طور کاملاً مشابه دیده شد. دلیل این رفتار را احتمالاً می توان به تأثیر بیشتر ماهیت خود-روغن کار بودن گرافیت ها در بارهای اعمالی کم نسبت داد که در بار ۶۰ نیوتن در

References

- [1] Y. E. Mangulkar, S. C. Borse, Effect of addition of inoculants on mechanical properties & wear behaviour of grey cast iron, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 5, pp. 1131-1139, 2016.
- [2] A. Sadeghi, A. Moloodi, M. Golestanipour, M. Mahdavi Shahri, An investigation of abrasive wear and corrosion behavior of surface repair of gray cast iron by SMAW, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 6, pp. 90-95, 2016.
- [3] J. Yamabea, M. Takagia, T. Matsua, T. Kimurab, M. Sasaki, Development of disc brake rotors for trucks with high thermal fatigue strength, *JSAE Review*, Vol. 23, pp. 105-112, 2002.
- [4] A. Vadiraj, S. Tiwari, Effect of silicon on mechanical and wear properties of aluminium-alloyed gray cast iron, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, pp. 3001-3006, 2014.
- [5] G. Cueva, A. Sinatora, W. L. Guesser, A. P. Tschiptschin, Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors, *Wear*, Vol. 255, pp. 1256-1260, 2003.
- [6] ا. اسدی، م. عباسی، م. شامقلی، ارزیابی غیرمخرب ریزساختار چدن مقاوم به سایش ناپهارد ۴ با استفاده از آزمون جریان گردابی، مهندسی متالورژی، دوره ۸۱، شماره ۹۵، صفحه ۴۳-۴۴، ۴۹۳۱.
- [7] A. R. Kiani-Rashid, D. V. Edmonds, Phase transformation study of aluminium-containing ductile cast irons by dilatometry, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 481-482, pp. 752-756, 2008.
- [8] S. M. Mostafavi Kashani, S. M. A. Boutorabi, As-cast acicular ductile aluminum cast iron, *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 16, pp. 23-28, 2009.
- [9] A. Malakizadi, I. Sadik, L. Nyborg, Wear mechanism of CBN inserts during machining of bimetal aluminum-grey cast iron engine block, *Procedia CIRP*, Vol. 8, pp. 88-193, 2013.
- [10] N. Haghdadi, B. Bazaz, H. R. Erfanian-Naziftoosi, A. R. Kiani-Rashid, Microstructural and mechanical characteristics of Al-alloyed ductile iron upon casting and annealing, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 19, pp. 812-820, 2012.
- [11] M. Jasim Kadhim, A. Naama Abood, H. Zainalabidin, Microstructure and high temperature oxidation behavior of aluminum alloyed cast irons, *Modern Applied Science*, Vol. 4, pp. 130-135, 2010.
- [12] A. I. García-Diez, C. Camba-Fabal, Á. Varela-Lafuente, V. Blázquez-Martínez, J. Luís Mier-Buenhombre, B. Del Río-López, Influence of silicon on wear behaviour of "Sisal" cast irons, *DYNA*, Vol. 81, pp. 216-221, 2014.
- [13] I. Milosan, The manufacturing of a special wear-resistant cast iron used in automotive industry, 2nd World Conference On Business, Economics And Management- WCBEM 2013, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 109, pp. 610-613, 2014.
- [14] N. Marumoto, H. Kashimura, K. Yoshida, T. Toyoda, T. Okane, M. Yoshida, Dynamic measurements of the load on gray cast iron castings and contraction of castings during cooling in furan sand molds, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 237, pp. 48-54, 2016.
- [15] A. Shayesteh-Zeraati, H. Naser-Zoshki, A. R. Kiani-Rashid, M. R. Yousef-Sani, The effect of aluminium content on morphology, size, volume fraction, and number of graphite nodules in ductile cast iron, in: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 224, pp. 117-122, 2010.
- [16] M. S. Sołński, A. Jakubus, P. Kordas, K. Skurka, The effect of aluminium on graphitization of cast iron treated with cerium mixture", *Archives of Foundry Engineering*, Vol. 14, pp. 95-100, 2014.
- [17] K. Ankamma, Effect of trace elements (boron and lead) on the properties of gray cast iron, *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, Vol. 95, pp. 19-26, 2014.
- [18] A. Shayesteh-Zeraati, H. Naser-Zoshki, A. R. Kiani-Rashid, Microstructural and mechanical properties (hardness) investigations of Al-alloyed ductile cast iron, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 500, pp. 129-133, 2010.
- [19] A. R. Kiani-Rashid, D. V. Edmonds, Carbide precipitation in microstructure of austempered ductile irons containing 0.48% and 4.88% Al, *International Journal of ISSI*, Vol. 2, pp. 1-8, 2005.
- [20] M. Sheikholeslami, S. M. A. Boutorabi, A research on the calculation of graphitization ability of gray cast iron, *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, Vol. 9, pp. 28-33, 2012.
- [21] I. Ozdemir, T. Ueno, Y. Tsunekawa, M. Okumiya, Cast iron coatings containing graphite structure by atmospheric plasma spraying, *Thermal Spray 2004: Advances in Technology and Application: Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, Osaka, Japan, pp. 298-303, 2004.