

## بهبود خواص سطح چدن خاکستری از طریق آلیاژسازی درجا

مرتضی خویرو<sup>۱\*</sup>، علی مالکی<sup>۲</sup> و بهزاد نیرومند<sup>۱</sup>

۱. دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۲۶ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۷/۱۰)

**چکیده** - برخلاف روش های متداول افزودن عنصر آلیاژی به کل قطعه، در این پژوهش بهبود خواص سطحی چدن خاکستری با استفاده از روش آلیاژسازی درجای سطحی در حین ریخته‌گری بررسی شد. به این منظور سیم‌های مسی به قطر ۰/۴ و ۰/۸ میلی‌متر قبل از ذوب‌ریزی در قالب نصب شد. آنالیز عنصری، حضور مس در سطح و لایه‌های زیر سطح تا عمق یک سانتی‌متر را نشان داد. بررسی‌های ریزساختاری تغییر توزیع گرافیت از A به D و E، کاهش فازگرافیت و افزایش پرلیت در سطح را نشان دادند. نتایج سختی سنجی نشان داد که سختی سطح نمونه‌های حاوی مس افزایش یافت و نتایج آزمون سایش مشخص کرد که مقاومت سایشی نمونه با مس نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: آلیاژسازی درجا، آلیاژسازی سطحی، چدن خاکستری، ریزساختار، سختی، مقاومت به سایش.

## Improving the Surface Properties of Gray Cast Iron through In-Situ Alloying

M. Khoubrou<sup>1\*</sup>, A. Maleki<sup>2</sup> and B. Niroumand<sup>1</sup>

1. Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2. Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

**Abstract:** Conventionally, alloying elements are being added to the whole melt; however, in this research in-situ surface alloying of gray cast iron was employed to improve surface properties of the castings. Wires of pure copper with diameters of 0.4 and 0.8 mm were inserted and fixed at bottom of sand molds before melting. Chemical composition analysis revealed the presence of copper from surface to a depth of 1 cm. Microstructural investigations indicated that graphite type changed from A to D and E. Moreover, the content of graphite phase decreased while that of pearlite increased at the surface. Hardness was higher at surface of copper added samples. Wear resistant of the in-situ surface alloyed samples was better than the no-copper added ones.

**Keywords:** In-situ alloying, Surface alloying, Gray cast iron, Microstructure, Hardness, Wear resistant.

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mortezakhoobroo@yahoo.com

و جوش مناسب برای چدن مذاب و نیز خواصی بود که ایجاد می‌کند. تماس مذاب با مس جامد با شروع ذوب مس از مرزخانه‌ها، به‌علت انرژی بالاتر مرزخانه [۴]، اتفاق می‌افتد و پس از ذوب کامل و انجماد خواص مدنظر ایجاد می‌گردد.

هدف از این تحقیق معرفی روشی جدید و ساده برای آلیاژسازی در قالب به‌صورت درجا با استفاده از افزودن مس در سطح قالب بود. نمونه‌های ساخته شده برای مطالعه تأثیر این فرایند بر ساختار و خواص سطحی چدن خاکستری شامل سختی و مقاومت سایشی بررسی شدند.

## ۲- مواد و روش تحقیق

از شمش چدن خاکستری با ترکیب نشان داده شده در جدول (۱)، به‌عنوان آلیاژ پایه استفاده شد. سیم مسی خالص تجاری به قطرهای ۰/۴ و ۰/۸ میلی‌متر و طول ۳۰۰ میلی‌متر برای آلیاژسازی چدن انتخاب شد. مدل‌های ریخته‌گری به شکل استوانه برای ریخته‌گری نمونه‌هایی با قطر ۵۵ میلی‌متر و ارتفاع ۶۰ میلی‌متر ساخته شدند. این سه مدل در قالبی از جنس ماسه سیلیسی مصنوعی با چسب سیلیکات سدیم و با استفاده از گاز دی اکسید کربن با یک راهگاه مشترک قالب‌گیری شد. سیم به قطر ۰/۴ میلی‌متر و سیم به قطر ۰/۸ میلی‌متر به‌صورت ماریچ در کف دو عدد از محفظه‌های ایجاد شده توسط مدل‌ها تعبیه گردید و محفظه سوم برای نمونه شاهد در نظر گرفته شد. سیم‌ها قبل از استفاده پولیش و سپس برای از بین رفتن آلودگی‌های سطحی با الکل شسته و خشک شدند. نحوه قرار گرفتن مدل‌ها و راهگاه نسبت به هم و قالب تهیه شده در شکل (۱)، نشان داده شده است.

انتخاب پارامترهای ریخته‌گری، معمولاً بر پایه مقدار اثر یک پارامتر بر خواص نهایی مدنظر تعیین می‌گردد. در پژوهش حاضر مقدار مس در سطح، به‌عنوان متغیر و تغییرات ریزساختار و نیز تغییرات خواص مکانیکی و شیمیایی، خواص مورد نظر هستند. شرایط قالب‌ها و ترکیب شیمیایی مذاب پایه ثابت نگه‌داشته شدند. دلیل انتخاب دو نوع قطر مختلف برای آلیاژسازی امکان اختلاط مناسب و تغییر درصد مس بود

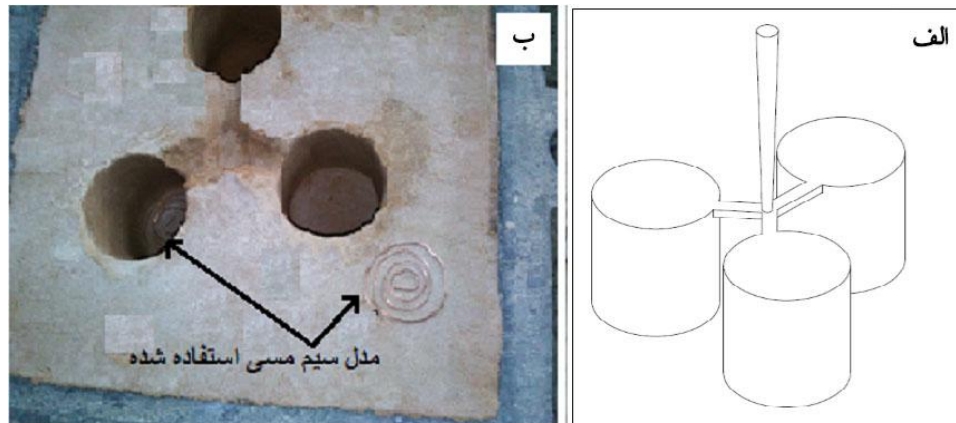
چدن‌های خاکستری پرمصرف‌ترین آلیاژهای مهندسی در دسترس مهندسی هستند. این مسئله به‌دلیل خواص مکانیکی متنوع و مطلوب، دمای ذوب‌ریزی پایین، سیالیت بالای مذاب، قابلیت ریخته‌گری به شکل‌های متنوع، عدم نیاز به عملیات ثانویه برای اکثر کاربردها، قابلیت ماشین‌کاری و خواص سایشی مطلوب و قیمت ارزان آنها است [۱]. خواص مکانیکی چدن خاکستری به ترکیب شیمیایی، سرعت سرد شدن در حین انجماد و پارامترهای دیگر ریخته‌گری نظیر تلقیح وابسته است [۲].

مس یکی از عناصر آلیاژی مورد استفاده برای بهبود خواص چدن‌های خاکستری است. مس پتانسیل گرافیت‌زایی را در حین استحاله یوتکتیک افزایش و در حین استحاله یوتکتوئید کاهش می‌دهد که این کاهش در نمونه‌های حاوی مس افزایش نسبت پرلیت به فریت را در پی دارد. اثر دیگر عنصر مس در چدن‌های خاکستری به تأخیر انداختن نفوذ کربن به‌علت حضور در ساختار آهن به‌صورت محلول می‌باشد که با افزایش مقدار پرلیت، سختی را افزایش می‌دهد [۳]. مس همچنین باعث بهبود مقاومت خوردگی و مقاومت سایش در انواع چدن‌ها می‌شود [۴]. تحقیقات نشان داده است که اثر افزودن مس بر چدن خاکستری تا حدودی مشابه نیکل می‌باشد با این تفاوت که تأثیر مس بر ظرفیت‌سازی و تغییر مورفولوژی گرافیت‌ها از تأثیر آن بر زمینه قوی‌تر است [۵].

آلیاژسازی سطحی یا تغییر ترکیب شیمیایی سطح یکی از فرایندهایی است که در قطعات صنعتی از دیرباز مدنظر بوده است. آلیاژسازی سطحی چدن به‌وسیله افزودن عناصر آلیاژی مناسب از قبیل کروم، تیتانیوم، مولیبدن، وانادیوم، تنگستن، نیکل و مس به سطح، باعث تغییر ترکیب شیمیایی می‌شود. این کار در اکثر موارد با استفاده از فرایندهای ثانویه مانند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز ختشی [۶]، روش پلاسما [۷]، اصلاح‌سازی سطح با کمک پرتو لیزر [۸]، استفاده از روش ریخته‌گری [۹] می‌باشد. در پژوهش‌های صورت گرفته کمتر به اضافه کردن عنصر آلیاژی در قالب و در حین ریخته‌گری پرداخته شده است و همین موضوع لزوم انجام پژوهش حاضر را ایجاد می‌نماید. انتخاب مس به‌علت نقطه ذوب

جدول ۱- ترکیب شیمیایی چدن خاکستری استفاده شده در تحقیق

عنصر آلیاژی	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Fe
درصد وزنی	۲/۸۴	۱/۸۶	۰/۲۳۸	۰/۰۲۱۳	۰/۰۹۶	۰/۰۸۰۸	۰/۰۳۳۶	۰/۲۳۴	۰/۰۴۵۹	۰/۱۱۲	بقیه



شکل ۱- نمای کلی مدل و قالب: الف) نحوه قرارگیری مدل‌ها و سیستم راهگامی و ب) تصویر قالب و موقعیت سیم‌های مسی

زیر سطح، سختی سنجی به روش ویکرز انجام شد. ابتدا در سطح هر کدام از نمونه‌ها متوسط عدد سختی تعیین و سپس برای بررسی سختی در زیر سطح نیز از سطح تا عمق ۲۵ میلی‌متری به فواصل ۵ میلی‌متری، سختی اندازه‌گیری شد. روی هر سطح به‌طور میانگین سه مرتبه سختی اندازه‌گیری شد.

برای تعیین مقاومت سایشی آزمون سایش رفت و برگشتی<sup>۳</sup> به‌کار گرفته شد. پین‌های مورد استفاده از جنس فولاد ۵۲۱۰ و برای کلیه نمونه‌ها به‌صورت مشابه استفاده شدند. در جدول (۲) شرایط اولیه برای آزمون سایش آورده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

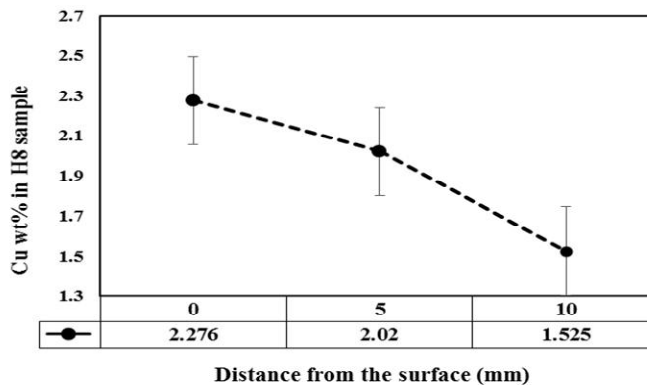
نتایج حاصل از آنالیز عنصری طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس مربوط به نمونه C۸ در فواصل مختلف از سطح در نمودار شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، غلظت مس در سطح نمونه بسیار بالاتر از ترکیب اولیه آلیاژ (حدود ۰/۱ درصد) است و با فاصله گرفتن از سطح، غلظت عنصر مس کاهش می‌یابد به طوری که از غلظت حدود ۲/۳ درصد در سطح، به حدود ۲ درصد در عمق

به‌نحوی که در هر دو حالت سطح اشغال شده توسط سیم مسی حدوداً یکسان و شرایط ترکیب مس در دو حالت مشابه باشد. ابتدا هشت کیلوگرم شمش چدن خاکستری در کوره القایی ذوب شد. دمای شمش چدن پس از ذوب اندازه‌گیری و مذاب در دمای ۱۲۴۰ درجه سانتی‌گراد ریخته‌گری شد. پس از سرد شدن، نمونه‌هایی برای بررسی ریزساختار، سختی سنجی و آنالیز عنصری آماده شدند. نمونه‌های مربوط به سیم مسی به قطر ۰/۸ و ۰/۴ میلی‌متر به ترتیب به نام C۴ و C۸ کد گذاری شدند.

برای بررسی ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری، ابتدا نمونه‌ها پولیش شده، برای بررسی میزان گرافیت موجود و نوع ریزساختارهای زمینه نمونه‌های شاهد و آلیاژسازی سطحی شده، با محلول نایتال حکاکی<sup>۱</sup> شدند. همچنین برای بررسی‌های کمی از نرم‌افزار ImageJ استفاده شد. طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس<sup>۲</sup> (EDS) برای آنالیز عنصری بر نمونه C۸ با استفاده از میکروسکوپ مدل ۲۳۰۰ AIS-Seron مجهز به طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس انجام شد. در حقیقت این روش برای اطمینان از حضور عنصر آلیاژی مس از سطح تا عمق استفاده شد. برای اندازه‌گیری سختی در سطح آلیاژ شده و نیز در لایه‌های

جدول ۲- شرایط اولیه برای انجام آزمون سایش

دمای محیط (درجه سانتی‌گراد)	رطوبت (درصد)	شعاع نوک پین (میلی‌متر)	نیرو عمودی (گرم)
۲۵	۳۰	۶/۶	۶۲۶۰



شکل ۲- تغییر مقدار مس از سطح به عمق نمونه A

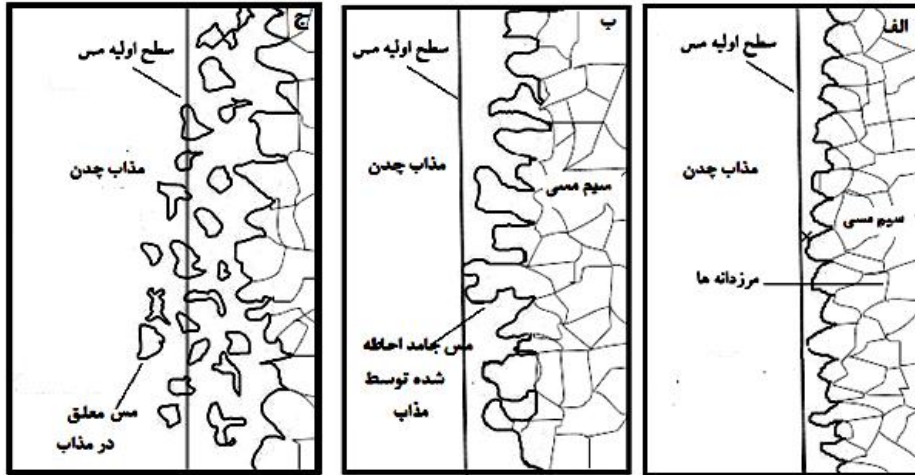
ترکیب شیمیایی جدید ایجاد می‌کند.  
 ۴. در نهایت مذاب آلیاژسازی شده در سطح، همراه با بقیه قطعه منجمد شده، فازهای جدید احتمالی به صورت درجا در سطح و زیر سطح به وجود می‌آید.  
 البته بین مراحل فوق به طور دقیق نمی‌توان مرزی مشخص کرد و فقط از نظر اهمیت، هر کدام در مرحله‌ای جداگانه بیان شده‌اند. شکل (۳) مدل پیشنهادی برای ذوب سیم‌های مسی در تماس با چدن مذاب را نشان می‌دهد. پس از تماس چدن مذاب و سیم‌های مسی، ذوب سطحی سیم‌ها شروع می‌شود. همان گونه که در مقدمه ذکر گردید به دلیل انرژی بالاتر مرز دانه‌ها، به نظر می‌رسد نفوذ مذاب در مرز دانه‌ها یک مکانیزم مهم در ذوب سیم‌ها باشد. در ادامه، علاوه بر ذوب و انحلال سطحی مس در مذاب، با نفوذ بیشتر مذاب در مرز دانه‌ها قطرات یا دانه‌های نیمه‌ذوب شده از سطح جدا و در مذاب حل می‌شود و این کار تا ذوب کامل سیم ادامه می‌یابد.

شکل (۴- الف و ۴- ب) تصاویر میکروسکوپی نوری سطح نمونه شاهد را در دو بزرگ‌نمایی مختلف نشان می‌دهد. در این شکل گرافیت‌ها از نوع لایه‌ای با توزیع A هستند و همچنین

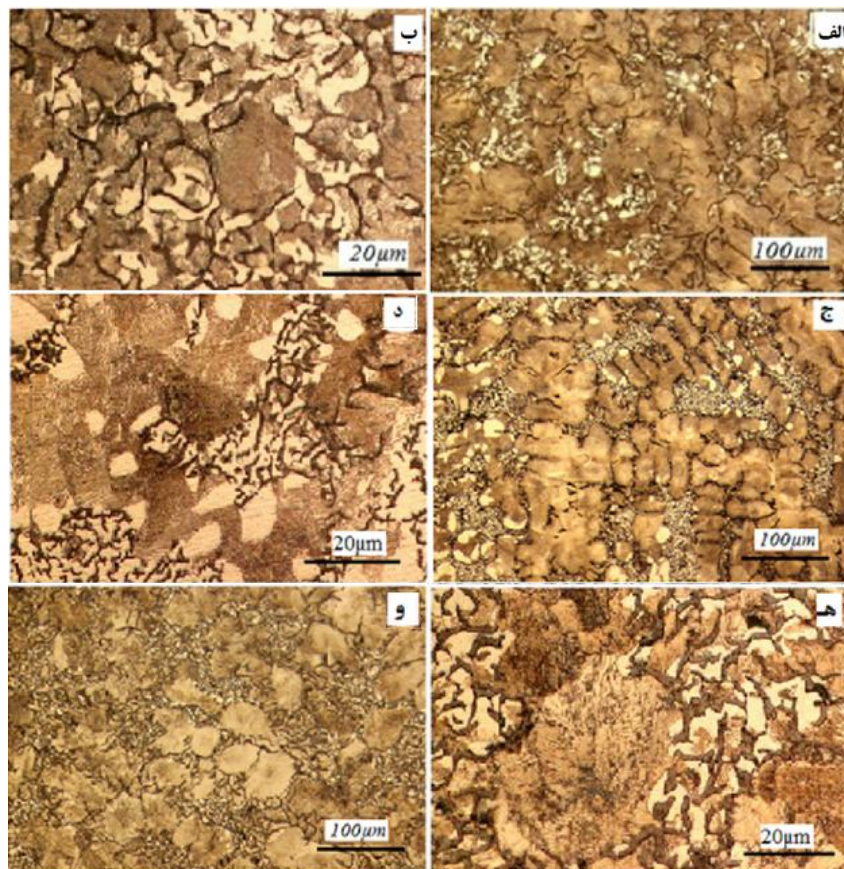
۵ میلی‌متری و حدود ۱/۵ درصد در عمق ۱۰ میلی‌متری می‌رسد. آنالیز عنصری طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس هر چند با خطا در اندازه‌گیری مقادیر کم همراه است [۱۰]، ولی روند کاهشی حضور مس از سطح به طرف عمق را به خوبی نشان می‌دهد و تأییدی بر انجام صحیح آلیاژسازی سطحی است.

با وارد شدن مذاب به درون سه محفظه قالب، سیم‌های مسی نصب شده در کف محفظه‌ها توسط مذاب چدن احاطه می‌شوند. آلیاژ شدن سطح چدن خاکستری به صورت درجا، طی چهار مرحله پیشنهادی اصلی به شرح زیر انجام می‌شود:

۱. مذاب چدن وارد شده به قالب با سیم مسی در تماس قرار می‌گیرد. در این مرحله عاری بودن سطح مس مورد استفاده از هرگونه آلودگی و ناخالصی باعث می‌شود واکنش ناخواسته در سطح تماس رخ ندهد و عیوبی مثل عیوب گازی در آن ایجاد نشود.
۲. در اثر تماس مس با چدن مذاب، گرما از مذاب به سیم‌ها منتقل شده، ذوب سطحی و در نهایت ذوب کامل مس رخ می‌دهد. به نظر می‌رسد مکان ترجیحی برای نفوذ مذاب مرز دانه‌ها باشد.
۳. مس مذاب ایجاد شده به طور موضعی و به صورت تابعی از فاصله از سطح سیم‌ها، در مذاب چدن توزیع شده، مذابی با



شکل ۳- مدل پیشنهادی نشان‌دهنده چگونگی ذوب سیم مسی در مذاب چدن در قالب: الف) لحظات اولیه شروع ذوب سطحی سیم و نفوذ مذاب در مرز دانه‌ها، ب) ادامه ذوب و نفوذ بیشتر مذاب در مرز دانه‌ها و ج) جدا شدن قطرات یا دانه‌های نیمه‌ذوب شده و حل شدن آنها در مذاب چدن و ادامه تا ذوب کامل سیم



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی نوری سطوح آلیاژ شده با سیم‌های مسی در بزرگ‌نمایی‌های مختلف: الف) و ب) نمونه شاهد، ج) و د) نمونه C4، ه) و و) نمونه C8

جدول ۳- درصد تغییرات فازها در نمونه‌ها پس از آلیاژسازی نسبت به نمونه شاهد

درصد تغییرات فازها نسبت به نمونه شاهد		نمونه
گرافیت (درصد)	پرلیت (درصد)	
-۵/۵	+۵/۹	C۴
-۶/۸	+۱۱/۶	C۸

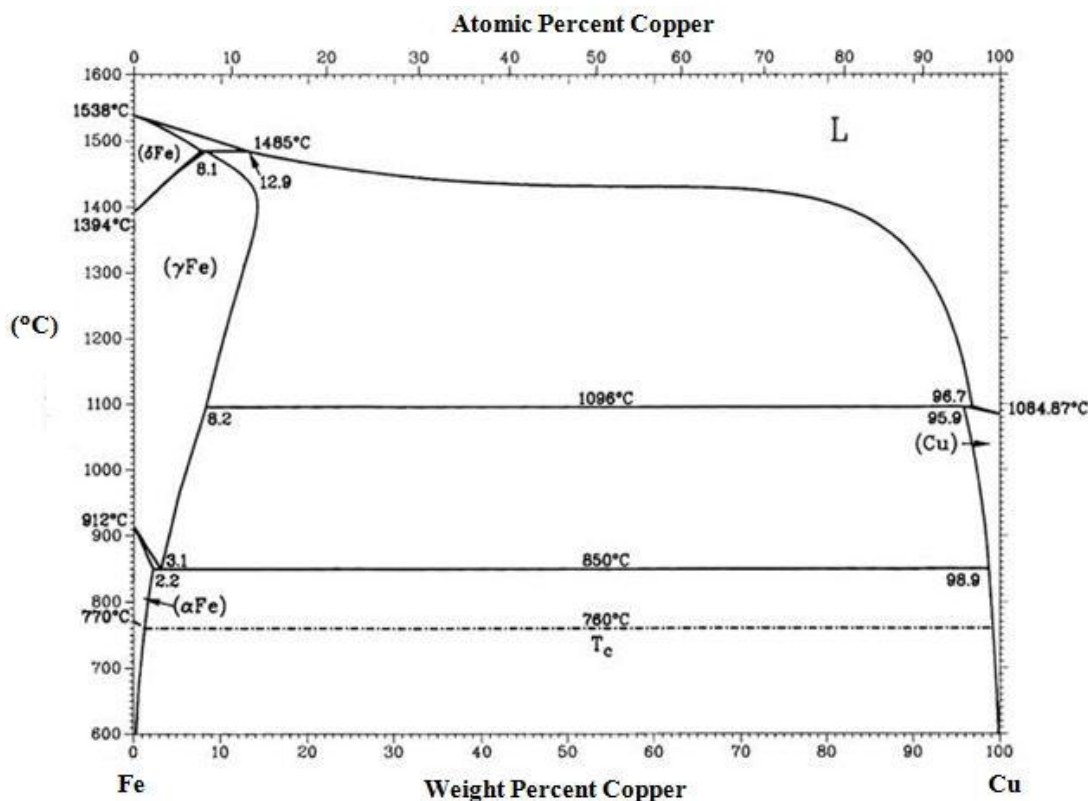
داده است. شکل (۵)، نمودار تعادلی دو تایی آهن-مس را نشان می‌دهد. حلالیت این دو عنصر در یکدیگر، با کاهش دما تا درجه حرارت اتاق در شرایط سرد شدن تعادلی ناچیز می‌باشد. مس تا حدود ۱ تا ۲ درصد وزنی در شرایط معمول ریخته‌گری در زمینه آلیاژهای آهنی حل می‌شود. فازهای موجود در سیستم آهن-مس محلول‌های جامد  $\alpha$ -Fe،  $\gamma$ -Fe،  $\delta$ -Fe و  $\gamma$ -Cu (محلول جامد آهن در مس) می‌باشند. در هنگام برخورد مذاب چدن به سیم مسی موجود، مس جامد دو اثر روی مذاب دارد. در ابتدا باعث تبرید مذاب در تماس با آن شده، در ادامه گرمای لازم برای ذوب را از مذاب تأمین می‌کند. بنابراین سرعت سرد شدن در منطقه تماس افزایش یافته، تحت انجماد حرارتی بیشتری در مذاب به وجود می‌آید. به جز تحت انجماد حرارتی، با شروع انجماد در منطقه متأثر از حضور مس، تحت انجماد ترکیبی نیز بر فرایند تأثیر خواهد داشت. در حین فرایند انجماد به دلیل ضریب توزیع تعادلی کمتر از یک مس در مذاب آهن [۱]، مس ذوب شده توسط جبهه انجماد در حال رشد، به درون مذاب پس زده می‌شود. تغییرات ترکیب شیمیایی با تغییر در دمای ذوب منطقه مذاب مربوطه همراه خواهد بود. در نتیجه تحت انجماد ترکیبی در مذاب به وجود می‌آید که سهم مهمی در تحت انجماد کلی دارد.

مقدار تحت انجماد کلی (مجموع تحت انجماد ترکیبی و حرارتی) ایجاد شده در مناطق سطحی که مس وجود دارد باعث تشکیل گرافیت‌های نوع D و E در این نواحی شده در حالی که در نمونه‌های شاهد این نوع گرافیت وجود ندارد. یکی از ویژگی‌های گرافیت‌های نوع D و E، حضور فاز فریت در اطراف این نوع گرافیت‌ها است. در نمونه‌های آلیاژ شده گرافیت‌های نوع D و E تشکیل شده ولی مقدار گرافیت نسبت به نمونه شاهد، با توجه به اندازه‌گیری‌های کمی، کاهش یافته

زمینه‌ای متشکل از فریت و پرلیت در تصاویر مشخص است. گرافیت‌های نوع A در چدن‌های خاکستری هیپوئوتکتیک و یوتکتیکی که با سرعت سرد شدن کم تا متوسط سرد شده‌اند، مشاهده می‌شود [۳]. تصاویر میکروسکوپی از سطح نمونه‌های آلیاژسازی سطحی شده در همین شکل نشان داده شده‌اند. تصاویر (۴-ج و ۴-د) مربوط به نمونه C۴ و تصاویر (۴-و و ۴-ه) مربوط به نمونه C۸ هستند. با افزودن مس تغییر نوع گرافیت‌ها از A به D و E در شکل‌های (۴-ج و ۴-ه) مشاهده می‌شود. به‌طور غالب در نمونه C۴ گرافیت نوع D و در نمونه C۸ مناطق با توزیع گرافیت‌ها به شکل D و E مشاهده می‌شود. همچنین فاز فریت در هر دو نمونه وجود دارد که در هر دو توزیع یکنواخت دارد. جزیره‌های فریت در این تصاویر نسبت به نمونه شاهد (شکل ۴-الف)، کوچک‌تر و پراکنده‌تر شده‌اند که ناشی از حضور عنصر آلیاژی مس در سطح است.

جدول (۳) تغییر درصد ساختار پرلیت و فاز گرافیت در نمونه‌های آلیاژسازی سطحی شده را نسبت به نمونه شاهد نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده افزایش مقدار پرلیت و کاهش گرافیت با آلیاژسازی سطحی است. در نمونه C۴، مقدار پرلیت ۵/۹ درصد افزایش و گرافیت ۵/۵ درصد کاهش و در نمونه C۸، مقدار پرلیت ۱۱/۶ درصد افزایش و گرافیت ۶/۸ درصد کاهش یافته است. به عبارت دیگر با افزایش مس، تغییر مقدار فازها بیشتر شده که علت آن پرلیت‌زایی بیشتر، در نتیجه حضور مقادیر بیشتر مس با ماهیت پرلیت‌زا در حین استحاله یوتکتوئید، بوده است. این موضوع به‌روش آلیاژسازی استفاده شده مربوط است.

همان‌گونه که در ادامه توضیح داده می‌شود، به نظر می‌رسد آلیاژسازی سطحی موجب افزایش تحت انجماد مذاب شده، علاوه بر تغییر توزیع لایه‌های گرافیت، مقدار آن را نیز کاهش



شکل ۵- نمودار تعادلی آهن- مس [۱۷]

جدول ۴- نتایج حاصل از تست سختی سنجی برای نمونه‌ها قبل و پس از آلیاژسازی

نمونه	میانگین سختی (VHN)	انحراف معیار	درصد تغییرات نسبت به نمونه شاهد
شاهد	۱۹۱	۱/۴	-
C۴	۲۰۸	۹/۳	+۸/۶
C۸	۲۰۹	۷/۳	+۹/۲

است. گرافیت‌های نوع D و E در سرعت‌های بالای سرد شدن و تحت انجمادهای زیادتر تشکیل می‌شوند و در نتیجه با کاهش فواصل نفوذی کربن زمینه برای رسوب روی گرافیت، شرایط تشکیل فریت را فراهم‌تر می‌سازند.

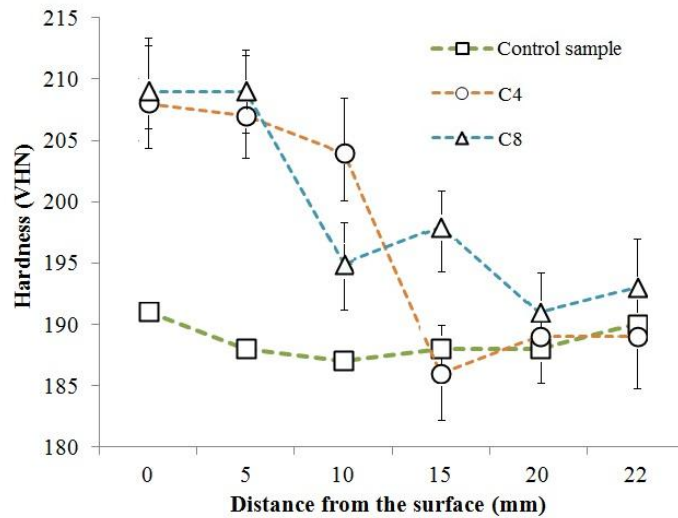
نتایج حاصل از آزمون سختی سنجی سطح برای نمونه‌ها قبل و پس از آلیاژسازی به همراه درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد در جدول (۴) ارائه شده است. نمونه‌های C۸ و C۴ نسبت به نمونه شاهد حدود ۹ درصد افزایش سختی از خود نشان دادند. میانگین عدد سختی ویکرز برای نمونه شاهد،

۱۹۱ VHN است که برای نمونه C۴ این عدد به ۲۰۸ و در نمونه C۸ به ۲۰۹ VHN افزایش یافته است. تغییر ترکیب و افزودن مس باعث می‌شود چدن با دانسیته بالاتری به وجود آید که این چدن دارای سختی بالاتری است. مس با انحلال در آستنیت به‌عنوان سدی در برابر نفوذ کربن در فصل مشترک گرافیت- آستنیت عمل می‌کند.

دمای استحاله آستنیت به فریت توسط مس کاهش یافته، در نتیجه پرلیت سخت‌تری به‌دست می‌آید. ایجاد این پرلیت و افزایش نسبت پرلیت به فریت در نمونه‌های حاوی مس باعث

گرافیت‌های نوع D و E در سرعت‌های بالای سرد شدن و تحت انجمادهای زیادتر تشکیل می‌شوند و در نتیجه با کاهش فواصل نفوذی کربن زمینه برای رسوب روی گرافیت، شرایط تشکیل فریت را فراهم‌تر می‌سازند.

نتایج حاصل از آزمون سختی سنجی سطح برای نمونه‌ها قبل و پس از آلیاژسازی به همراه درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد در جدول (۴) ارائه شده است. نمونه‌های C۸ و C۴ نسبت به نمونه شاهد حدود ۹ درصد افزایش سختی از خود نشان دادند. میانگین عدد سختی ویکرز برای نمونه شاهد،



شکل ۶- تغییرات سختی از سطح آلیاژ شده تا عمق ۲۲ میلی متری از سطح نمونه‌ها

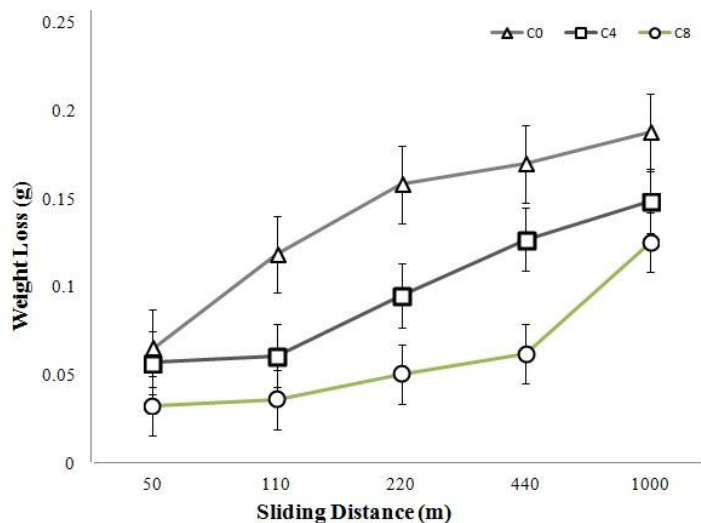
مس در چدن خاکستری دمای یوتکتیک افزایش و دمای یوتکتوئید کاهش می‌یابد. همچنین افزایش درصد مس در چدن سبب کاهش درصد گرافیت، افزایش درصد پرلیت و تغییر توزیع گرافیت شده و تعداد سلول‌های یوتکتیک بر واحد سطح را افزایش می‌دهد [۱۵]. مس در حین واکنش یوتکتیک گرافیت‌زا و در یوتکتوئید پرلیت‌زاست. تغییر ترکیب و افزودن مس به ترکیب باعث می‌شود چدن با دانسیته بالاتری ایجاد گردد که این چدن چگال‌تر (به علت کاهش مقادیر گرافیت) سختی بالاتری از خود نشان می‌دهد [۱۶]. نتایج آزمون سایش رفت و برگشتی به صورت جرم کاسته شده پس از طی مسافت لغزش در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که دیده می‌شود آلیاژسازی سطحی باعث بهبود مقاومت به سایش شده است. با تغییر شرایط آلیاژسازی نمونه‌ها، مقاومت به سایش و در نتیجه میزان جرم کاسته شده تغییر پیدا کرده است. پس از طی ۵۰ متر از مسافت لغزش ۰/۰۶۴۷ گرم از جرم نمونه شاهد کاسته شد. این مقدار پس از افزودن مس در مورد نمونه C۴، ۰/۰۵۶۹ گرم و برای نمونه C۸ معادل ۰/۰۳۲۴ گرم است.

در هر دو مورد بهبود مقاومت سایشی با توجه به کاهش جرم اندازه‌گیری شده، مشاهده شد. پس از طی مسافت ۱۱۰ متر، ۰/۱۱۸۳ گرم از جرم نمونه شاهد کم شد. این در حالی

بهبود سختی شده است. همچنین ایجاد محلول جامد فریت در پرلیت نیز باعث سختی بیشتر این نوع پرلیت می‌گردد [۴]. شکل (۶) تغییرات سختی از سطح تا عمق نمونه‌های ریخته شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمونه شاهد دارای سختی تقریباً یکنواخت از سطح تا عمق است. در مقابل، برای نمونه‌های آلیاژ شده با فاصله گرفتن از سطح به سمت داخل نمونه‌ها، سختی کاهش می‌یابد و در فاصله حدود ۲۰ میلی متری از سطح به سختی نمونه شاهد می‌رسد. به طور مثال برای نمونه C۴ سختی از ۲۰۸ در سطح به حدود ۱۸۹ VHN در عمق ۲۲ میلی متری کاهش یافت. کاهش سختی تا عمق حدود ۱۰ میلی متری از سطح شدیدتر و از عمق ۱۰ تا ۲۲ میلی متری کاهش تدریجی‌تر است. به عبارت دیگر با فاصله گرفتن از سطح اثر آلیاژسازی کم شده است. با توجه به اینکه توزیع مس پس از انحلال با مکانیزم جابه‌جایی طبیعی در مذاب و همچنین نفوذ می‌باشد این نتیجه مورد انتظار می‌باشد.

پرلیت‌زایی و افزایش مقدار پرلیت در چدن باعث بهبود سختی و مقاومت سایشی چدن می‌شود. نتایج پژوهش انجام شده برای بررسی تأثیر درصد‌های مختلف مس از ۰/۰۴ تا ۱/۹۵ درصد روی سختی چدن خاکستری [۱۵] نشان می‌دهد که با افزایش درصد





شکل ۷- تغییر جرم برحسب مسافت در آزمون سایش نمونه‌ها

C۴ بهبود پیدا کرده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش آلیاژسازی سطحی درجای چدن خاکستری در حین ریخته‌گری در قالب توسط عنصر آلیاژی مس انجام شد. نتایج به دست آمده از این پژوهش به صورت خلاصه به این شرح است:

- ۱) امکان آلیاژسازی در سطح یک قطعه چدنی در قالب در حین ریخته‌گری با استفاده از نصب سیم مسی در سطح پایینی قالب‌های ریخته‌گری، به عنوان یک روش جدید بررسی و با موفقیت انجام شد.
- ۲) در نتیجه آلیاژسازی با مس، توزیع گرافیت‌ها در چدن خاکستری به ترکیبی از گرافیت‌های نوع D و E تغییر پیدا کرد. همچنین مقدار پرلیت افزایش و گرافیت و فریت کاهش یافت.
- ۳) سختی نمونه‌ها بعد از فرایند آلیاژسازی در قالب تا حدود ۹ درصد افزایش یافت.
- ۴) مقاومت به سایش رفت و برگشتی نمونه‌ها با افزودن عنصر مس تا ۲۷ درصد بهبود پیدا کرد.

است که این مقدار برای نمونه‌های C۴ و C۸ به ترتیب ۰/۰۶۰۷ و ۰/۰۳۶۱ گرم است که برای این مسافت نیز جرم کمتری از نمونه‌های آلیاژ شده کاسته شده است. در نهایت پس از طی مسافت ۱۰۰۰ متر لغزش، نمونه شاهد مقدار ۰/۱۸۷۴ گرم، نمونه C۴، ۰/۱۴۸۵ گرم و نمونه C۸، ۰/۱۲۵۴ گرم کاهش جرم داشتند. به طور خلاصه با افزایش مسافت لغزش جرم بیشتری از نمونه‌ها در اثر سایش کاسته شده است، اما میزان سایش با افزایش مقدار مس کاهش یافته است. بنابراین تغییرات ساختار چدن در سطح به علت حضور مس، در جهت افزایش مقاومت به سایش بوده است. مس علاوه بر خاصیت گرافیت‌زایی که بر ساختار دارد، با حل شدن در فریت و پرلیت باعث سخت شدن آنها می‌شود. با سخت شدن فریت و پرلیت، مقاومت سایشی و سختی افزایش می‌یابد [۴]. کاهش مقادیر فریت و گرافیت و افزایش هم‌زمان پرلیت پس از آلیاژسازی نیز باعث بهبود مقاومت سایشی نمونه‌ها شده است. حضور کاربیدهای آزاد نظیر Fe<sub>3</sub>C در نمونه‌ها، می‌تواند باعث مقاومت بیشتر در آزمون سایش شود. اما همین مقادیر مقاومت نیز، در اثر حضور مس بهبود پیدا کرده است. نتایج نشان داد مقاومت سایشی نسبت به نمونه شاهد حدود ۳۳ درصد برای نمونه C۸ و ۲۰ درصد برای

1. etch
2. energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS)
3. pin-on-plate

## مراجع

1. Angus, H. T., *Cast Iron: Physical and Engineering Properties*, p. 554, Elsevier, 2013.
2. Walton, C. F., *Iron Casting Handbook*, Iron Casting Society Inc, p. 607, New York, 1981.
3. ASM Handbook, Vol.1: *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*, ASM international, pp. 140-194, 1990.
4. Silman, G., Kamynin, V., and Tarasov, A., "Effect of Copper on Structure Formation in Cast Iron", *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 45, No. 7-8, pp. 254-258, 2003.
5. Xu, W., Ferry, M., and Wang, Y., "Influence of Alloying Elements on As-Cast Microstructure and Strength of Gray Iron", *Materials Science and Engineering*, Vol. 390, No. 1, pp. 326-333, 2005.
6. Amirsadeghi, A., and Sohi, M. H., "Comparison of the Influence of Molybdenum and Chromium TIG Surface Alloying on the Microstructure, Hardness and Wear Resistance of ADI", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, pp. 673-677, 2008.
7. Heu, Z., and Xu, Z., "Plasma Surface Alloying of Spheroidal Graphite Iron", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 131, pp. 574-578, 2000.
8. Zhong, M., and Zhang, H., "Corrosion and Wear Resistance Characteristics of NiCr Coating by Laser Alloying with Powder Feeding on Gray Iron Liner", *Wear*, Vol. 260, pp. 1349-1355, 2006.
9. Qian, M., Kuroshima, Y., and Nagayoshi, H., "Surface Hardening of Ductile Cast Iron using Stainless Steel", *Materials Science and Engineering*, Vol. 197, pp. 88-92, 1996.
10. ASM Handbook, Vol. 10: *Materials Characterization*, p. 761, ASM International, 1986.
11. Kurz, W., and Fisher, D. J., *Fundamentals of Solidification*, p. 305, Trans Tech, Zuerich, 1998.
12. ASM Handbook, Vol. 15: *Casting*, p. 1256, ASM International, Ohio, 1992.
13. Melnikov, V. P., "Effect of Chemical Composition on the Strength of Large Castings from Gray Iron", *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 49, pp. 394-398, 2007.
14. ASM Handbook, Vol. 1: *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, p. 1063, ASM International, Ohio, 1990.
۱۵. احمدآبادی، ک. و قربانی، ج.، "تاثیر مس بر منحنی‌های سرد شدن، ریزساختار و خواص چدن خاکستری"، ششمین کنگره سالانه انجمن مهندسين متالورژی ايران، تهران، دانشگاه علم و صنعت ايران، ۱۳۸۱
16. Moonesan, M., and Madah, F., "Effect of Alloying Elements on Thermal Shock Resistance of Gray Cast Iron", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 520, pp. 226-231, 2012.
17. ASM Handbook, Vol. 3: *Alloy phase diagram*, ASM International, p. 800, Ohio, 1992.