

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



Surface alloying of gray iron in mold during casting

Abstract

For composition changing in surface of gray cast iron, copper, as an alloying element, in form of wire and in amount of ۰.۰۱۵ and ۰.۰۶ gr/cm^۲ of surface of samples, inserted in bottom of sand molds. Foundering of molten gray iron has done in temperature of ۱۳۴۰ °C. After cooling to room temperature, samples prepared for microstructure studding, hardness and wear resistance tests. Graphite morphologies and also field structures were studied by optical microscopy. Vickers test for hardness studying and pin on plate test for comparison of surface alloying in different amount on wear resistance has done. The graphite morphology in reference sample (without copper insert) was type A flake graphite which changed in most regions to type D in the specimens containing ۰.۰۱۵ gr/cm^۲ and type D and E in the specimens containing ۰.۰۶ gr/cm^۲ copper in alloyed surface. With increasing of copper inserted in surface, structure changed from ferrite to prarlite. Also hardness and wear resistance went simultaneously up.

Keywords: gray iron, surface alloying, wear resistance.

آلیاژسازی سطحی چدن خاکستری در قالب در حین ریخته‌گری

چکیده

به منظور آلیاژسازی در سطح یک قطعه از جنس چدن خاکستری در حین ریخته‌گری عنصر مس بعنوان عنصر آلیاژی به شکل سیم به مقدار ۰/۰۱۵ و ۰/۰۰۶ گرم بر سانتیمتر مربع کف قالب‌های ماسه‌ای قرار داده شد. ذوب ریزی در دمای ۱۳۴۰ درجه سانتیگراد انجام و نمونه‌ها پس از سرد شدن برای بررسی‌های ساختاری و سختی سنجی آماده گردید. بررسی اثر مس روی شکل گرافیت‌ها و همچنین ساختار زمینه با استفاده از میکروسکوپ نوری انجام گردید. برای مقایسه ارزیابی تأثیر آلیاژسازی سطحی بر مقاومت به سایش، آزمون سایش رفت و برگشتی روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج تغییر ساختار گرافیت‌ها از نوع A به نوع D در نمونه حاوی ۰/۰۱۵ گرم بر سانتیمتر مربع مس و گرافیت ترکیبی نوع D و E در نمونه آلیاژ شده با ۰/۰۰۶ گرم بر سانتیمتر مربع مس را نشان داد. به علاوه کاهش فریت و افزایش همزمان پرلیت زمینه نیز مشاهده شد. همچنین بهبود نسبی سختی از سطح به طرف عمق و افزایش مقاومت سایش در نمونه‌های آلیاژسازی سطحی شده مشاهده شد.

کلمات کلیدی: آلیاژسازی سطحی، چدن خاکستری، مقاومت سایشی.

Conference 2014

مقدمه

چدن خاکستری بعنوان یکی از گروه‌های پرمصرف چدن ها، با دامنه کاربرد زیاد همواره در صنعت مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر کربن و سیلیسیم بعنوان عناصر اصلی، عناصر فلزی و غیر فلزی دیگری برای کنترل و تغییر ویژگی های خاص، مانند بهبود مقاومت به سایش به آن افزوده می‌شود.

ریز ساختار چدن‌های خاکستری معمولی زمینه‌ای از پرلیت، فریت یا مخلوطی از آنها با گرافیت‌های ورقه‌ای می‌باشد که گرافیت‌ها در سراسر زمینه توزیع شده‌اند. خواص نهایی چدن مخصوصا خاصیت مهمی مانند مقاومت به سایش، علاوه بر زمینه به جوانه زنی، رشد و جهت گیری گرافیت‌ها وابسته می‌باشد. سرعت سرد کردن نیز عامل مهمی است که بر نوع چدن و گرافیت‌ها اثرگذار است. بنابراین مقدار، اندازه و توزیع گرافیت‌ها بایستی مورد توجه قرار گیرد. تغییر ترکیب شیمیایی در سطح بعنوان راهکار حفظ خواص مطلوب در لایه های میانی و بهبود خواص موردنظر در سطح می‌باشد (ASM Metal Hand Book, ۱۹۹۲).

مس یکی از عناصر آلیاژی مورد استفاده در چدن‌ها است که بعنوان عنصری گرافیت‌زا در استحاله یوتکتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین پرلیت زایی در حین استحاله یوتکتوئید نیز مشخصه برجسته این عنصر آلیاژی می‌باشد. بنابراین مس با افزایش نسبت پرلیت به فریت باعث افزایش استحکام می‌شود. افزودن مس تا ۲ درصد به چدن باعث افزایش هدایت حرارتی، سختی پذیری، مقاومت به سایش و مقاومت خوردگی می‌گردد. ملینکوف^۱ (۲۰۰۷) در پژوهشی به بررسی اثرات عناصر آلیاژی بر خواص مکانیکی چدن‌های خاکستری پرداخت. او اثرات عنصر مس را عدم تغییر در سختی و بهبود استحکام گزارش نمود. شکل ۱ نمودار تعادلی آهن-مس را نشان می‌دهد (ASM Alloy phase diagram, ۱۹۹۲).

همانگونه که مشاهده می‌شود انحلال مس با کاهش دما کاهش یافته و در دمای اتاق در شرایط تعادلی سرد شدن به مقادیر ناچیز می‌رسد. در شرایط عادی ریخته‌گری، عنصر مس تا حدود ۱ تا ۲ درصد در زمینه آلیاژهای آهنی وجود دارد. شلتون^۲ (۲۰۰۳) دریافت افزودن مس به چدن های پر سیلیسیم باعث بهبود استحکام و تافنس می‌گردد. در بررسی وی مشخص شد مقادیر مازاد بر حد حلالیت به صورت لایه های نازک در اطراف گرافیت ها رسوب نموده است.

آلیاژسازی سطحی بعنوان راهکاری برای تغییر ترکیب شیمیایی در سطح چدن‌ها همواره مورد توجه بوده است. روش های ثانویه آلیاژسازی مانند استفاده از روش های متداول جوشکاری (امیر صادقی، صوهی، ۲۰۰۸)، روش های پلاسمایی (هاو، جو و ژو، ۲۰۰۰) و لیزر (ناگای و همکاران، ۲۰۰۴) از روش‌های متداول تغییر ترکیب شیمیایی در سطح می باشد. همه روش های مذکور برپایه ذوب سطحی نمونه ها، افزودن عناصر آلیاژی و انجماد نمونه، می باشد.

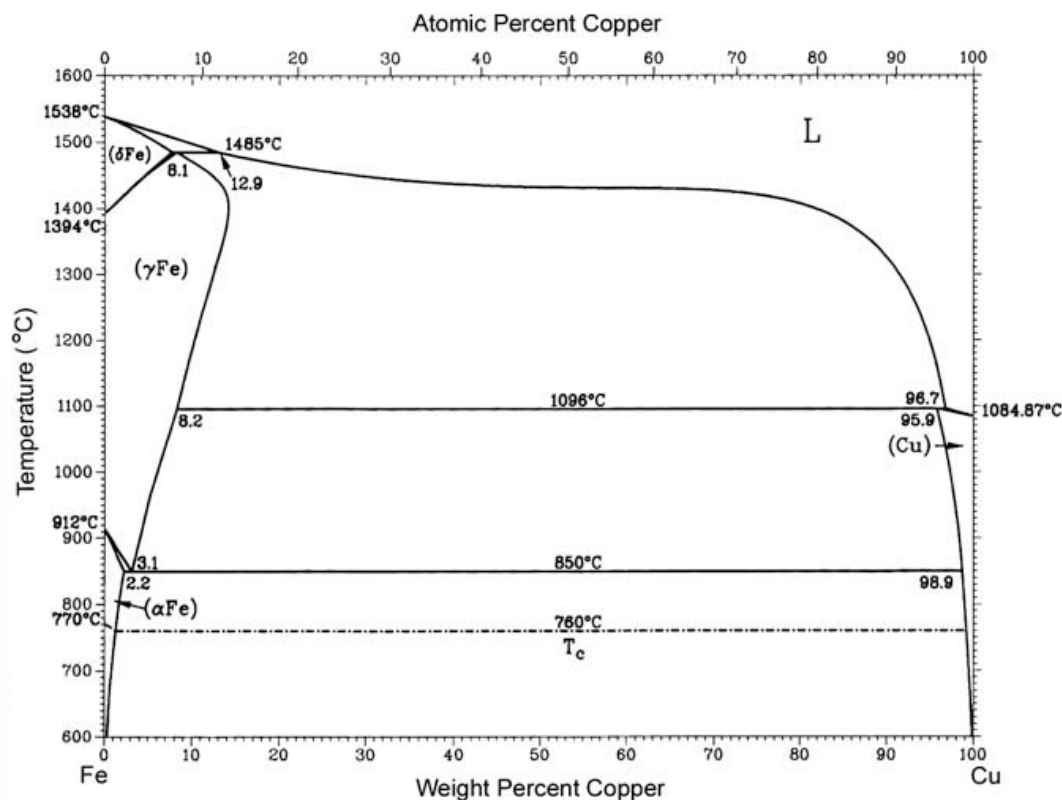
هر چند آلیاژسازی سطحی چدن ها در سال های اخیر توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته ، با این حال لزوم ادامه پژوهش ها در این مورد احساس می شود. از جمله روش‌های انجام شده توسط کیان^۳ (۱۹۹۶) سخت سازی سطح چدن داکتیل در حین ریخته گری

^۱ Melnikov

^۲ Shelton

^۳ Qian

بوده است که در آن لایه ای از فولاد ضد زنگ در سطح یک قالب ماسه‌ای برای ریخته‌گری چدن داکتیل قرار گرفت و مذاب چدن بر روی آن ریخته‌گری شد.



شکل ۱- نمودار تعادلی آهن-مس (ASM Alloy phase diagram, ۱۹۹۲).

در پژوهش‌های انجام شده کمتر به خواص ریخته‌گری عالی چدن‌ها و دامنه دمایی مطلوب آنها جهت افزودن عناصر آلیاژی در سطح در حین ریخته‌گری توجه شده است. از جمله مزایای روش آلیاژسازی در قالب می‌توان حذف مشکلات آلیاژسازی در پاتیل ناشی از اتلاف عنصر آلیاژی را برشمرد. همچنین در مورد اینکه سطح یا نواحی مورد نیاز در قطعه به طور جداگانه آلیاژ شوند، می‌تواند از نقطه نظر حضور خواص مختلف و گاهی متضاد در کنار هم و نیز صرفه اقتصادی در تولید جذاب باشد. محدودیت‌های آلیاژسازی سطحی در حین ریخته‌گری شامل اطمینان از ترکیب شدن عناصر و ایجاد خواص مورد نظر و همچنین عدم کنترل فرآیند در روش‌های متداول ریخته‌گری هستند که به عنوان چالش در پژوهش مطرح گردیده‌اند.

با توجه به خواص ویژه عنصر مس و انطباق نسبی محدوده دمایی ریخته‌گری و ذوب مس و چدن خاکستری هدف پژوهش حاضر بررسی اثر استفاده از عنصر آلیاژی مس بر ریز ساختار و خواص چدن خاکستری است. به این منظور با انجام آزمون سایش و سختی سنجی اثرات تغییر ریزساختار بر خواص سطحی مورد ارزیابی قرار گرفت.

روش پژوهش

در این پژوهش چدن خاکستری با ترکیب نشان داده شده در جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفته است. قالب ریخته‌گری به شکل استوانه‌ای به قطر ۵۵ و ارتفاع ۶۰ میلیمتر از جنس ماسه سیلیسی که با استفاده از چسب سیلیکات سدیم و تزریق گاز CO₂ به درون آن مستحکم شده بود ساخته شد. سیم‌های مس خالص الکتریکی با خلوص ۹۹/۹۹ درصد با قطرهای ۰/۴ و ۰/۸ میلیمتر با طول ۳۰۰ میلیمتر به ترتیب به وزن ۰/۳۴ و ۱/۳۴ گرم در کف قالب مونتاژ گردید. سیم‌های مسی قبل از استفاده پولیش کاری و با الکل شستشو شدند و آلودگی‌ها از سطح آنها پاک شد.

شمش چدن در کوره القایی ذوب و تا رسیدن به دمای ۱۵۰۰ °C حرارت داده شد و سپس در دمای ۱۳۴۰ °C ذوب ریزی انجام گردید. هر قالب شامل سه حفره، دو نمونه با میزان مس متفاوت ۰/۱۵ و ۰/۰۶ گرم بر سانتی متر مربع و یک نمونه شاهد بود. پس از ریخته‌گری نمونه‌ها در ابعاد ۲۰×۲۰×۲۰ میلیمتر از سطح برای بررسی‌های میکروسکوپی و سختی سنجی برش داده شدند. همچنین نمونه‌های مربوط به تست سایش در ابعاد ۵۰×۲۰ و ارتفاع ۲۰ میلیمتر جهت تست سایش رفت و برگشتی^۴ آماده سازی گردیدند. آزمون سایش انجام شده، براساس میزان جرم کاسته برحسب مسافت پیموده گزارش شد. آزمون سختی از سطح به طرف مرکز نمونه‌ها توسط سختی سنجی به روش ویکرز با نیروی ۳۰ کیلوگرم بر روی نمونه‌ها انجام گردید.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی چدن خاکستری به کار رفته در این پژوهش

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

نتایج

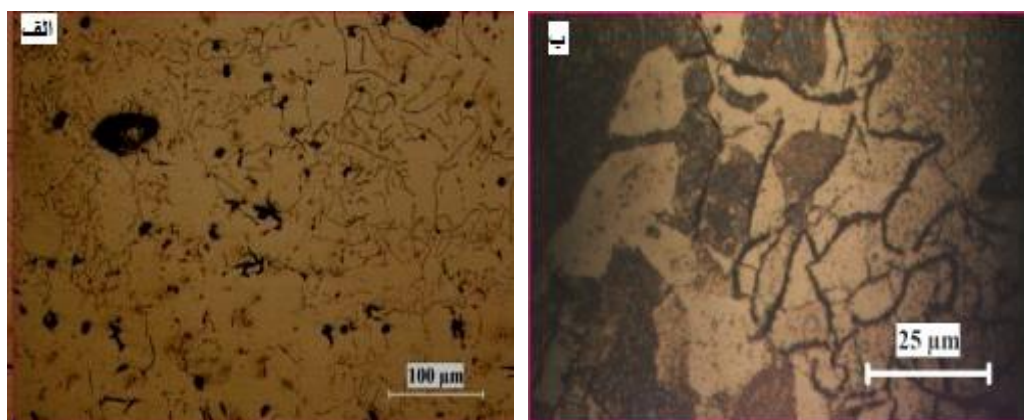
۱- بررسی اثرات ساختاری افزودن مس

شکل ۲ ریزساختار نمونه شاهد را نشان می‌دهد. در شکل ۲-الف شکل گرافیت‌ها بدون اچ و در شکل ۲-ب ساختار همان نمونه پس از اچ شدن مشاهده می‌گردند. همانگونه که در شکل دیده می‌شود گرافیت‌ها نوع A هستند. ساختار زمینه نیز فریتی-پرلیتی دیده شد.

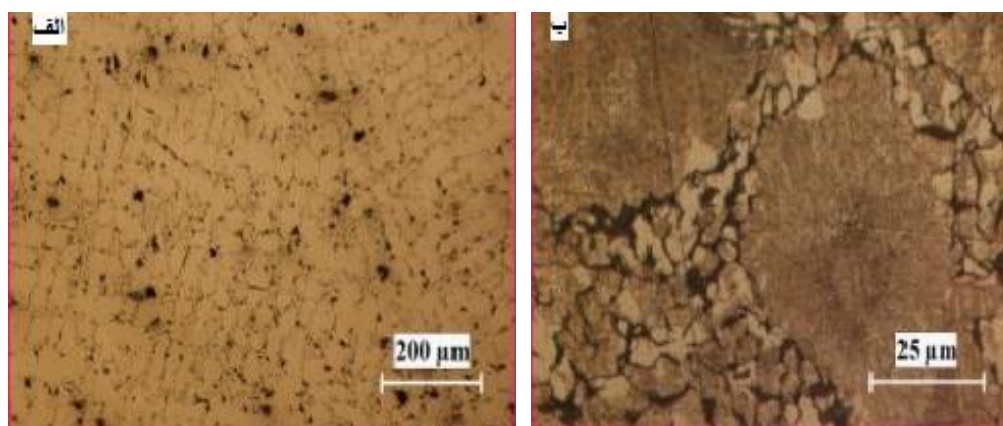
در شکل ۳ ریزساختار سطح نمونه‌ی آلیاژ سطحی شده با ۰/۱۵ گرم بر سانتیمتر مربع مس نشان داده شده است. در شکل ۳-الف شکل گرافیت‌ها بدون اچ مشاهده می‌گردد و شکل ۳-ب همان نمونه را پس از اچ شدن نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود شکل گرافیت‌ها از نوع A به نوع D تبدیل شده است. همچنین یکنواختی بیشتر گرافیت‌های موجود می‌تواند باعث یکنواختی بهتر

^۴Pin-on-Plate

خواص در سطح در حین سرویس دهی قطعه آلیاژ شده باشد. همانطور که از ساختار مشاهده می شود تمامی مس تعبیه شده در قالب ذوب گردیده و هیچگونه تجمع مس در اطراف گرافیت‌ها، ناشی از تجمع مس حل نشده، مشاهده نشد.

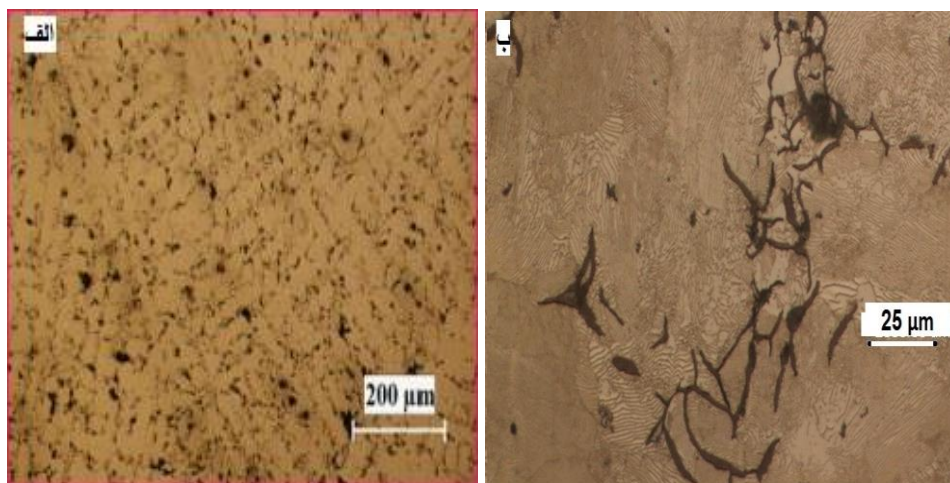


شکل ۲- تصاویر ریزساختار نمونه شاهد (الف) شکل و توزیع گرافیت ها و (ب) نمونه اچ شده توسط محلول نایتال ۲ درصد.



شکل ۳- ریزساختار نمونه آلیاژ سطحی شده با ۰/۰۱۵ گرم بر سانتیمتر مربع مس (الف) شکل و توزیع گرافیت‌ها و (ب) ریزساختار نمونه اچ شده توسط محلول نایتال ۲ درصد.

در شکل ۴ ریز ساختار سطح نمونه آلیاژ سطحی شده با ۰/۰۶ گرم بر سانتیمتر مربع مس، نشان داده شده است. در شکل ۴-الف شکل گرافیت‌ها زیر میکروسکوپ بدون اچ مشاهده می گردد و شکل ۴-ب همان نمونه را پس از اچ شدن نشان می دهد. در شکل گرافیت های نوع E مشاهده می شود. همچنین گرافیت های نوع D در مقادیر کم در کنار گرافیت های E دیده می شوند.



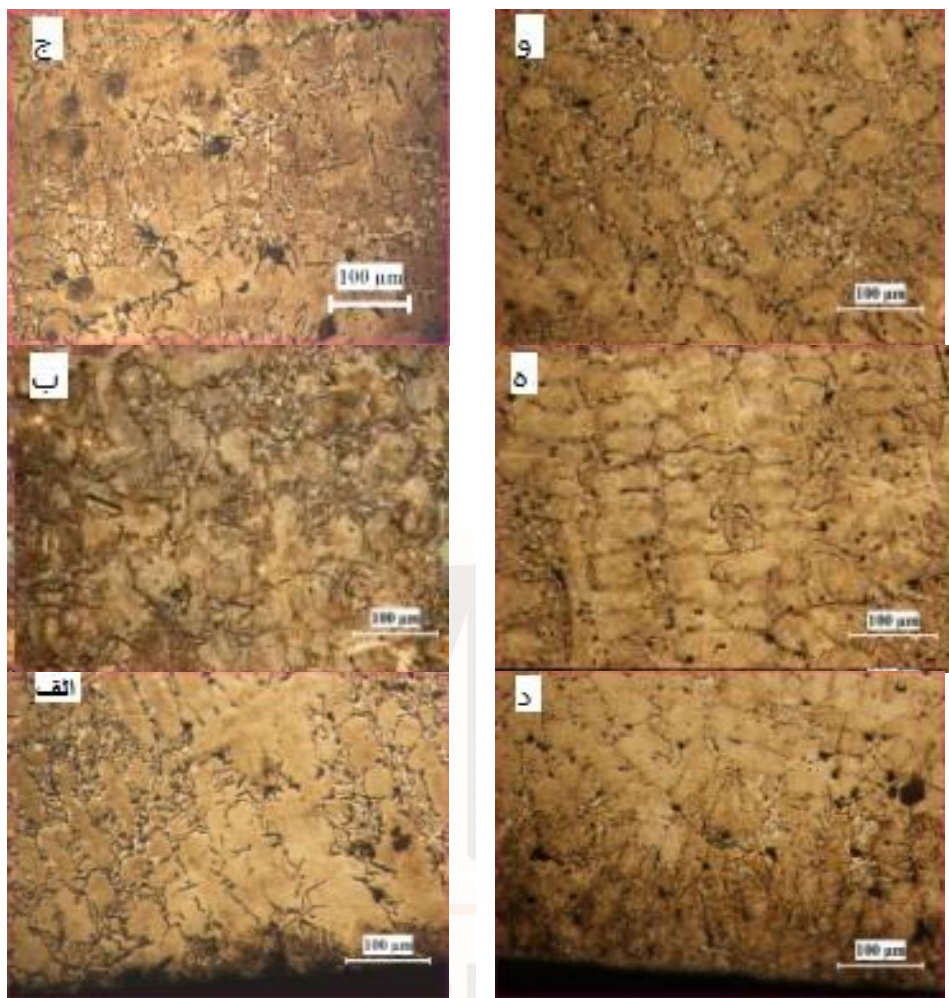
شکل ۴: ریزساختار نمونه آلیاژ سطحی شده با ۰/۰۶ گرم بر سانتیمتر مربع مس (الف) شکل و توزیع گرافیت‌ها و (ب) ریزساختار نمونه اچ شده توسط محلول نایتال ۲ درصد.

مانند حالت قبل هیچ مسی به صورت فیلم در اطراف گرافیت‌ها دیده نمی‌شود. تغییر ریز ساختار از فریت به پرلیت برای هر دو نمونه دیده شد. شکل ۵ ساختار بررسی شده از سطح به طرف مرکز برای هر دو نمونه می‌باشد. برای نمونه های آلیاژ سطحی شده با ۰/۰۱۵ گرم بر سانتیمتر مربع مس (شکل ۵-الف، ب و ج) با فاصله گرفتن از سطح تغییر شکل گرافیت ها دیده می‌شود. تبدیل ساختار از گرافیت های نوع D در سطح به نوع A در لایه های زیر سطح مشهود می باشد. همچنین برای نمونه های آلیاژ سطحی شده با ۰/۰۶ گرم بر سانتیمتر مربع مس (شکل ۵-د، ه و و) با بررسی لایه های زیر سطح به ترتیب لایه های گرافیتی نوع E و ترکیبی از D و E دیده می شود. با دور تر شدن از سطح در مناطقی فقط گرافیت نوع D دیده می شود. در فواصل دور از سطح نیز گرافیت A به همراه D وجود دارد.

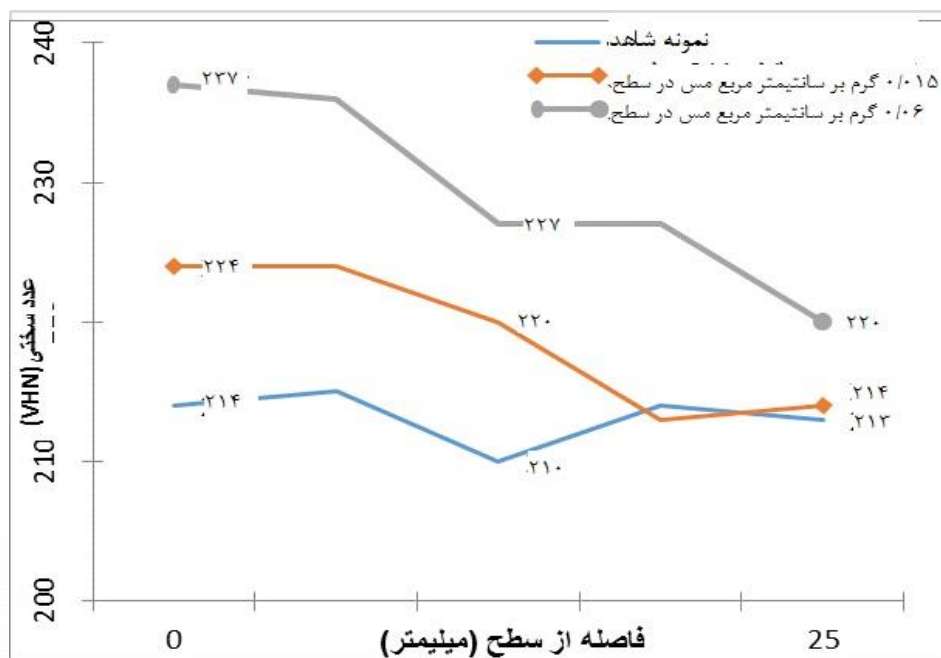
۲- سختی سنجی

نتایج حاصل از سختی سنجی نمونه های ریخته شده با درصد های مختلف مس در سطح و همچنین نمونه های شاهد در شکل ۶ آورده شده است.

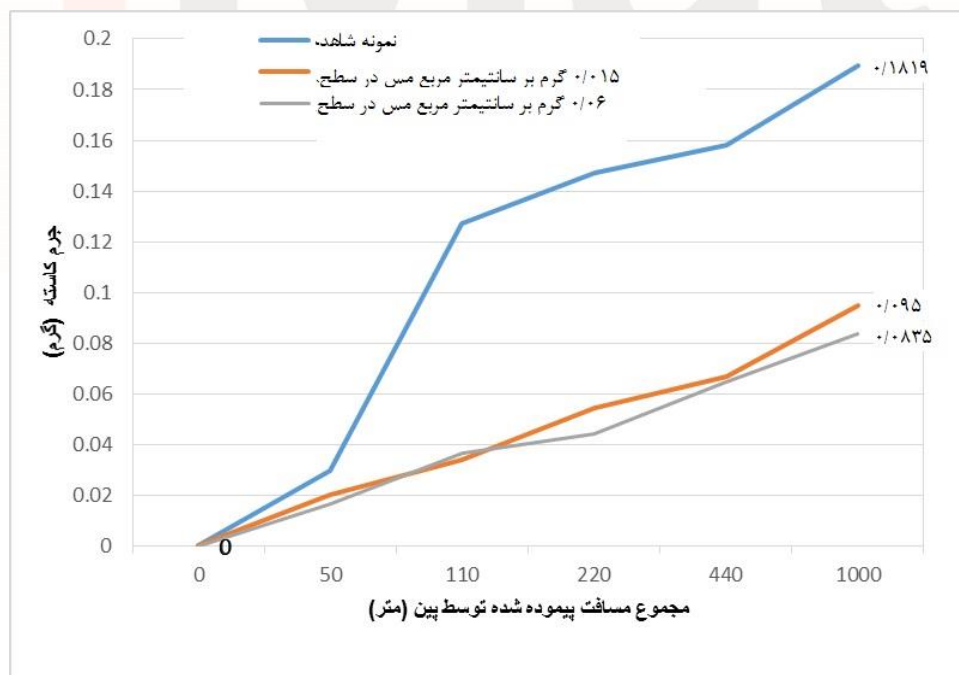
بیشترین سختی مربوط به نمونه با مس بالاتر و کمترین سختی مربوط به نمونه شاهد می‌باشد. نمونه های با ۰/۰۱۵ گرم بر سانتیمتر مربع مس سختی متوسط را دارا هستند. سختی این نمونه‌ها در لایه های زیر سطح به نمونه شاهد نزدیک تر شد و سختی مشابهی از خود نشان دادند. در مجموع با فاصله گرفتن از سطح تحت تاثیر مس سختی کاهش پیدا کرد. در مورد نمونه شاهد سختی تقریباً یکنواخت دیده شد.



شکل ۵: تاثیر مس بر ریزساختار نمونه‌ها (الف، ب و ج) به ترتیب از سطح به عمق آلیاژ سطحی شده با ۰/۱۵ گرم بر سانتیمتر مربع مس و (د، ه و و) به ترتیب از سطح به عمق آلیاژ شده با ۰/۰۶ گرم بر سانتیمتر مربع مس.



شکل ۶- نتایج سختی سنجی نمونه‌ها از سطح آلیاژشده تا عمق (اعداد بر حسب VHN).



شکل ۷- نتایج حاصل از انجام آزمون سایش رفت و برگشتی بر روی نمونه‌ها.

نتیجه گیری

با توجه به نتایج بررسی ساختاری، نمونه شاهد (بدون عنصر مس) دارای توزیع نسبتاً همگن از گرافیت های نوع A می باشد که این گرافیت ها با اضافه شدن عنصر مس تغییر نموده است. در نمونه های با ۰/۱۵ گرم بر سانتیمتر مربع مس، تبدیل گرافیت های نوع A به D به علت حضور مس محلول در آن دیده شد. چدن خاکستری با ورقه های کوچک و با شکل بین دندریتی دارای جهت گیری تصادفی نوع D امکان ماشین کاری محدود به منظور پرداخت سطح را با تقلیل حفره دار شدن فراهم می سازد ولی به دست آوردن یک زمینه پرلیتی با این نوع گرافیت، مشکل می باشد (ASM Metal Hand Book, ۱۹۹۲).

حضور همزمان مناطق فریت در زمینه در کنار پرلیت تفاوت نمونه شاهد با آلیاژ شده می باشد. از آنجاییکه گرافیت های نوع D ممکن است نزدیک سطوح خنک شده یا در قطعات نازک با سرعت سرد شدن نسبتاً بالا شکل گرفته باشد (ASM Metal Hand Book, ۱۹۹۲)، مجاورت چدن مذاب در قالب با سطح جامد مس می تواند زمینه ساز ایجاد آن در این مناطق گردد. همانگونه که ذکر گردید سرعت سرد شدن نسبتاً بالا بایستی فراهم گردد تا این نوع گرافیت ایجاد شود، اما سرعت سرد شدن بایستی در حدی باشد که مانع از ایجاد شدن گرافیت و تشکیل کاربید شود (ASM Metal Hand Book, ۱۹۹۲). حضور گرافیت نوع D در مناطق سطحی آلیاژ شده علاوه بر حضور عنصر مس می تواند ناشی از خاصیت خنک کنندگی سیم های مسی در حین گرم شدن و انحلال باشد. حضور سیم در این ناحیه سرعت سرد شدن را در سطح افزایش داده و فوق تبرید لازم را جهت ایجاد گرافیت D در سطح فراهم می آورد. فراهم آوردن تبرید کافی برای ایجاد نوع خاصی از گرافیت تنها اثر حضور عنصر مس در سطح نیست. مس همچنین باعث تشکیل پرلیت در زمینه و ظریف سازی پرلیت می شود. از مقایسه این نمونه با نمونه شاهد مشخص گردید که میزان فریت در مقایسه با وضعیت عدم حضور مس کاهش یافته است و همچنین به همین نسبت ظریف تر شدن لایه های پرلیت مشاهده گردید. در صورتیکه با حضور گرافیت های نوع D باید زمینه فریتی ایجاد شود در حالیکه شاهد زمینه پرلیتی در مناطقی در کنار گرافیت های نوع D هستیم. با توجه به بررسی ریز ساختاری، این پدیده توسط انحلال مس در زمینه و حضور مس در این نواحی توجیه شد. همچنین تشکیل گرافیت های نوع D در مناطق تحت تاثیر مس از بررسی مقطع عرضی نیز استنتاج گردید. بدین صورت که، با فاصله گرفتن از سطح نمونه کاهش گرافیت های نوع D و جایگزین شدن آنها با گرافیت های نوع A دیده شد (شکل ۵-الف، ب و ج).

مشاهده ساختار نمونه های آلیاژ شده با ۰/۰۶ گرم بر سانتیمتر مربع مس، علاوه بر گرافیت های نوع D نشان دهنده گرافیت های نوع E، می باشد. گرافیت نوع E شکل بین دندریتی است که به جای جهت گیری پراکنده دارای جهت گیری مرجح است. به طور کلی گرافیت های نوع D و E زمانی که تحت انجماد زیاد باشد (در محدوده پایین تر از تشکیل کاربید)، در نواحی بین دندریتی شکل می گیرند. هر دو نوع آنها شامل گرافیت های ریز لایه ای بین شاخه ای هستند، با این تفاوت که در گرافیت های نوع D جهات گرافیت ها اتفاقی و در نوع E جهات مرجح می باشد. گرافیت نوع E برخلاف نوع D امکان تشکیل در زمینه پرلیتی را داشته و از این نظر می تواند در کاربرد های سایشی با زمینه پرلیتی به کار رود (ASM Metal Hand Book, ۱۹۹۲). در مورد این نمونه نیز با توجه به اثر خنک کنندگی مس به علت مقادیر بیشتر مس، ایجاد مناطق با این نوع آرایش از گرافیت ها توجیه می گردد. همچنین بررسی ریز ساختار توسط میکروسکوپ نوری حضور ساختار پرلیتی را مشخص می نماید. پرلیت های ایجاد شده در مورد نمونه های با درصد مس بیشتر، ظرافت

بیشتری نسبت به نمونه‌های با درصد مس کمتر دارا می‌باشند. همچنین حضور فریت در مناطقی از نمونه‌های با میزان مس کمتر دیده می‌شود، در حالیکه که در نمونه‌های با میزان مس بالاتر مناطق فریتی بصورت پراکنده و بصورت جزیره‌های بسیار کوچک در مقایسه با نمونه شاهد دیده شد و عمده ریز ساختار به پرلیت تبدیل شده است.

آزمون‌های ماکروسختی و سایش انجام شده برای بررسی اثرات افزودن عنصر مس بصورت جامد به مذاب در قالب، انتخاب شدند. نتایج حاصل از تست سختی که در شکل ۶ نشان داده شد، بیشترین سختی را مربوط به نمونه‌های با میزان مس بالاتر در سطح نشان می‌دهد. با افزایش میزان مس سختی بالاتر به دست آمد. وجود زمینه فریتی در نمونه‌های با درصد مس پایین تر با سختی کمتر، نسبت به پرلیت، باعث شده نمونه‌های با درصد مس کمتر سختی کمتری از خود نشان دهند. کمترین سختی نیز مربوط به نمونه شاهد می‌باشد. بالاچندران و همکارانش (۲۰۱۱) در پژوهشی کاهش میزان سختی نمونه‌ها را در اثر افزایش میزان مس از ۰/۴۶ درصد تا حدود ۱ درصد گزارش کرده‌اند. آنها در تحلیل این نتایج گرافیت زایی نسبتاً قوی مس را دلیلی بر کاهش سختی می‌دانند. اما در این پژوهش بالاتر رفتن میزان سختی نمونه‌ها ناشی از حضور مس و اثر خنک کنندگی سیم‌های مسی بر لایه‌های سطحی و همچنین تغییرات فازهای زمینه است، در حالیکه اختلاف نه چندان زیاد بین عدد سختی نمونه‌ها تا حدودی ناشی از گرافیت زایی می‌باشد.

آزمون‌های سایش رفت و برگشتی انجام شده و مقایسه‌ی نتایج میزان کاهش جرم بر حسب مسافت پیموده شده توسط پین، بهبود خواص سایشی را نشان می‌دهد. بهبود شرایط سایشی نمونه‌ها پس از آلیاژسازی را نیز می‌توان با اثر عنصر مس روی ساختار زمینه و نیز تغییر مورفولوژی و ظریف تر شدن گرافیت‌ها توجیه نمود. ظریف شدن گرافیت‌ها باعث تقویت خاصیت روانکاری چدن و در مراحل ابتدایی باعث کاهش میزان سایش شده است اما در مراحل پایانی میزان سایش را افزایش می‌دهد (عابدی، فارقی، ثقفیان، خیراندیش، ۲۰۱۰).

به طور کلی نتایج حاصل از پژوهش حاضر به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

- ۱- امکان افزودن موفقیت آمیز عنصر مس بصورت جامد به چدن و آلیاژسازی سطحی در حین ریخته‌گری وجود دارد.
- ۲- انحلال مس در مذاب چدن با توجه به محدوده دمایی نزدیک، رخ داده است.
- ۳- تغییر مورفولوژی گرافیت‌ها از نوع A به D و E با افزایش مقدار مس رخ داده است.
- ۴- با افزایش میزان مس تغییرات ریزساختار بصورت تغییر فاز زمینه از فریت و تبدیل به پرلیت مشهود است.
- ۵- مقاومت به سایش و سختی با افزایش مقدار مس افزوده شده در قالب افزایش یافته است.

منابع

- ASM Metals Handbook (۱۹۹۲), "Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys", Ohio, ASM International, vol. ۱.
- Melnikov. V.P. (۲۰۰۷), "Effect of Chemical Composition On The Strength Of Large Castings From Gray Iron", *Metal Science and Heat Treatment*, Pp. ۳۹۴-۳۹۸.
- ASM metals handbook (۱۹۹۲), "Alloy phase diagram", Ohio: ASM International, vol. ۳.

Shelton P.W., Bonner A.A. (۲۰۰۳), "The Effect of Copper Additions to the Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron", *Journal of Material Process Technology*, Pp.۱۷۳-۲۶۹.

Amirsadeghi. A., Sohi. M.H. (۲۰۰۸), "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*, Pp. ۶۷۳-۶۷۷.

HeU Z., Zhao J., Xu Z. (۲۰۰۰), "Plasma surface alloying of spheroidal graphite iron", *Surface and Coatings Technology*, Pp.۵۷۴-۵۷۸.

Nagai M., Toru T., Fujioka Y., Junzo G. (۲۰۰۴), "Iron Casting With Mo-Alloyed And W-Alloyed for Wear Resistance And Laser Surface Modification Of Cast Iron Aimed At Refining The Wear Wesistance", *Japan Welding Society*, Pp.۱۳۲-۱۴۷.

Qian M., Harada S., Kuroshima. Y. (۱۹۹۶), "Surface Hardening of Ductile Cast Iron Using Stainless Steel", *Materials Science and Engineering*, Pp.۸۸-۹۲.

Balachandran G., Vadiraj A., Kamara M., Kazuya E. (۲۰۱۱), "Mechanical and Wear Behavior of Aloyed Gray Cast Iron in the Quenched and Tempered and Austempered Conditions", *Materials and Design*, Pp. ۴۰۴۲-۴۰۴۹.

Abedi H.R., Fareghi A., Saghafian H., Kheirandish S.H (۲۰۱۰), "Sliding Wear Behavior Of A Ferritic-Pearlitic Ductile Cast Iron With Different Nodule Count", *Wear Journal*, Pp.۶۲۲-۶۲۸.