



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

تأثیر افزودن زیرکونیم و عملیات حرارتی بر ریزساختار و سایش فولادهای پر منگنز

نجم‌الدین عرب

استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ساوه، ایران

نویسنده مکاتبه کننده: تلفن: ۰۸۶-۴۲۴۳۳۳۲۲، ساوه، شهرک دانشگاهی خاتم‌الانبیاء، صندوق پستی: ۳۶۶-۳۹۱۸۷۹، E-mail: najmarab@iau-saveh.ac.ir

چکیده:

فولاد پر منگنز یا هادفیلد، آلیاژی غیرمغناطیسی از آهن، منگنز، کربن با ترکیب حدود ۱/۴-۱ درصد کربن و ۱۴-۱۰ درصد منگنز است که نسبت منگنز به کربن در این فولادها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مقاومت سایشی خوب و ساختار میکروسکوپی مناسب به همراه قابلیت بالای کار سختی از مهم‌ترین خواص این نوع از فولادها است. بیشترین محدودیت‌ها در تولید قطعات منگنزی، به تشکیل کاربیدهای منگنز درشت در زمینه، عدم حلالیت کامل این کاربیدها در عملیات حرارتی آنیل محلولی تمایل به ساختار انجمادی درشت‌دانه، در این فولادها است. در این پژوهش، اثرات افزایش عنصر آلیاژی زیرکونیم به مقدار ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ درصد و تأثیر عملیات حرارتی آنیل محلولی بر مقاومت سایشی، و ساختار میکروسکوپی این فولادها مورد بررسی گرفته است. آزمایش سایش در شرایط آزمایشگاهی در مسافت‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متر انجام شده است. نتایج مبین بهبود مقاومت سایشی در نمونه‌های حاوی عنصر زیرکونیم هم در حالت ریختگی و هم در شرایط عملیات حرارتی آنیل شده است. بررسی ساختار میکروسکوپی نشان داد که افزایش عنصر زیرکونیم علاوه بر افزایش حلالیت کاربیدهای منگنز در زمینه در حالت ریختگی و آنیل شده، باعث ریز شدن و بهبود توزیع کاربیدهای منگنز حل‌نشده در ساختار پس از آنیل محلولی در این فولادها شده و این اثرات در فولاد با ۰/۲۵ درصد زیرکونیم نمایان‌تر است.

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۲

واژه‌های کلیدی:

فولاد پر منگنز، زیرکونیم، آنیل محلولی، ساختار میکروسکوپی، مقاومت سایشی

ارجاع به این مقاله:

نجم‌الدین عرب، تأثیر افزودن زیرکونیم و عملیات حرارتی بر ریزساختار و سایش فولادهای پر منگنز، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، پاییز ۱۴۰۰، جلد ۵، شماره ۳، صفحات ۱۸۵-۱۹۲.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2022.319623.1146

۱- مقدمه

این فولادها پس از این عملیات حرارتی نرم می‌شوند، چرا که عملیات حرارتی باعث پایداری ساختار آستنیتی در آنها می‌گردد؛ اما این نرمی مترادف با مقاومت به سایش پائین یا قابلیت ماشین‌کاری بالا نیست، چرا که در حین کار، سطح این قطعات بشدت کار سخت می‌شود و به دلیل انرژی نقص در چیده شدن بالا، سطح این فولاد سخت شده اما مغز آن نرم باقی می‌ماند [۱].

فولاد هادفیلد به دلیل مقاومت در برابر سایش توأم با ضربه پذیری بالا و انعطاف‌پذیری خوب و ساختار آستنیتی بعد از عملیات حرارتی در صنایع فولادسازی شهرت زیادی دارد. در تولید قطعات مرغوب از جنس فولاد هادفیلد دو مرحله مهم وجود دارد، مرحله اول: ذوب و تولید مذاب با آنالیز و کیفیت

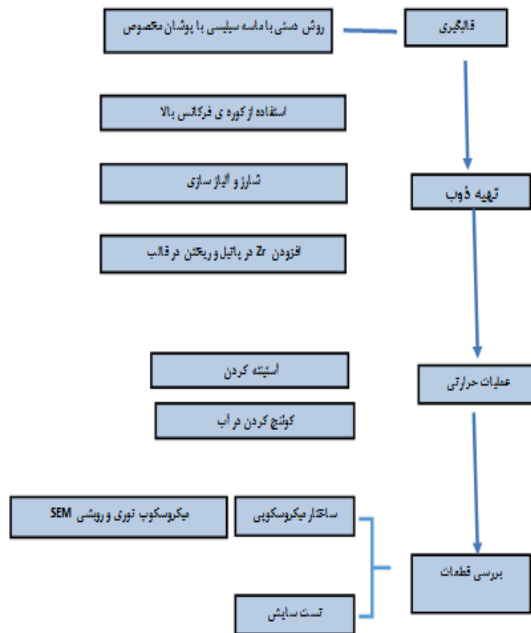
در تولید قطعات مدرن مهندسی صنایع معدنی، طراحی قطعات بر مبنای خواص دو بخش سطح و عمق صورت می‌گیرد [۱]. فولادهای پر منگنز که با نام‌های دیگری نظیر فولادهای هادفیلد یا فولادهای منگنزی یا فولادهای آستنیتی منگنزدار نیز شناخته می‌شوند، مطابق با استاندارد ASTM-A 128 دارای ۱/۳۵-۱/۰۵ درصد کربن و ۱۴-۱۱ درصد منگنز هستند و گاهی مقادیر کمی عناصر سیلیسیم نیکل- کروم- مولیبدن و برخی عناصر دیگر در آنها وجود دارد. این فولاد در درجه حرارت بالا آستنیت شده و سریع سرد می‌شود تا ساختار آستنیتی در دمای محیط در آن پایدار شود. برخلاف اکثر فولادها که بعد از عملیات سریع سرد شدن، سخت می‌شوند،

کاربیدی است. ولی افزودن زیرکونیم باعث ریز شدن و اصلاح اندازه دانه‌های آستنیت و کاهش تشکیل کاربید در زمینه در حالت ریختگی و در نتیجه موجب بهبود چقرمگی در فولاد می‌شود و در عملیات آنیل محلولی، حلالیت کاربیدها در زمینه آستنیتی را بهبود می‌دهد [۸].

نکته مهم دیگر، عملیات حرارتی آنیل محلولی است. فولادهای با منگنز بالا پس از ریخته‌گری تحت عملیات حرارتی آنیل محلولی در دمای حدود ۱۱۰۰-۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد و سپس سریع سرد شدن در آب قرار می‌گیرند تا ساختار آستنیتی با انرژی نقص در چیده شدن کم در دمای محیط در آنها پایدار شده و کارسختی پذیری آنها افزایش یابد. تحقیقات نشان داده که عملیات حرارتی آنیل محلولی می‌تواند با ریز کردن کاربیدها و تشکیل کاربیدهایی با شکل و اندازه یکسان و توزیع یکنواخت در زمینه، پدیده تمرکز تنش را کاهش داده و عمر کاری قطعات را افزایش دهد [۹].

۲- مواد و روش تحقیق

شکل (۱) روند نمای مراحل تحقیق را نمایش می‌دهد. فولاد آستنیتی را می‌توان در قالب‌های ماسه‌ای چسب‌دار ریخته‌گری کرد.



شکل ۱- روند نمای مراحل آزمایش‌ها

در حالت مذاب، فولاد منگنزی با جداره دیرگداز اسیدی کوره به‌شدت واکنش می‌دهد، عمل ذوب این فولادها در کوره‌های با جداره بازی انجام شد. در فرآیند ریخته‌گری نیز مذاب

مناسب و ریخته‌گری و مرحله دوم عملیات حرارتی صحیح روی قطعات ریختگی است [۳]. عنصر منگنز به‌منظور پایدارسازی ساختار آستنیتی و عناصر دیگر نظیر کروم، وانادیم، مولیبدن، تیتانیم یا بور به‌منظور افزایش خواص مکانیکی و بهبود مقاومت به سایش به فولاد آستنیتی منگنزی اضافه می‌شوند. این فولادها معمولاً در دو شرایط سایشی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. محیط‌های دشت مانند یا کوپری مانند و کارخانه‌های تولید ماسه، ناخن لودرهای برای خاک‌برداری از این نوع فولاد ساخته می‌شوند. در این شرایط به دلیل عدم وارد شدن ضربه‌های شدید به قطعات، وجود فازهای کاربیدی ریز در ساختار زمینه آستنیتی، مقاومت سایشی و عمر کاری این قطعات را افزایش می‌دهد. عمده کاربردهای فولادهای منگنزی معمولاً در این شرایط است [۴]. در محیط‌های سنگلاخی و کوهستانی یا در ساخت قطعاتی نظیر چکش‌ها و سنگ‌شکن‌ها، لازم است قطعات مقاومت به ضربه بالایی داشته باشند. وجود فازهای سخت یا کاربیدهایی باقیمانده در زمینه با افزایش سختی و افزایش پایداری کاربیدها، موجب پدیده تمرکز تنش گردیده و مقاومت به ضربه را به کاهش می‌دهند [۵].

در این راستا تحقیقات فراوانی انجام شده است. اغلب تولیدکنندگان قطعات برای محیط کاری نوع اول از فولادهای منگنزی با عناصر کاربیدزای قوی نظیر Cr, B, V, Ti, Mo استفاده می‌کنند؛ اما تولید کنندگان قطعات برای زمین‌ها یا معادن سنگلاخی، عناصری را به ترکیب شیمیایی اضافه می‌کنند که علاوه بر کاهش مقدار کاربیدهایی راسب شده، حلالیت آنها در عملیات حرارتی آنیل محلولی را افزایش داده و باعث ریز شدن و توزیع یکنواخت کاربیدهایی حل‌نشده در زمینه آستنیتی شوند. در بین عناصر مختلف، می‌توان به عنصر زیرکونیم اشاره داشت. گروهی از پژوهش‌گران، مشخص کرده‌اند که با ایجاد کارسختی اولیه، توسط ساچمه‌زنی، نورد و یا اعمال ضربه‌های سطحی، مقاومت سایشی افزایش می‌یابد [۶]. زیرکونیم بسیار واکنش‌پذیر بوده و ترکیبات پایداری را با اکسیژن، گوگرد، نیتروژن و کربن تشکیل می‌دهد. افزودن زیرکونیم باعث جلوگیری از رشد دانه‌ها و جلوگیری از پدیده پیر کرنشی می‌شود. زیرکونیم کنترل‌کننده آخال‌های غیرفلزی نظیر سولفیدها و اکسی‌سولفیدها بوده و تا حدودی تثبیت‌کننده کاربیدها است. هرچند مقدار افزودن آن به نوع فولاد بستگی دارد [۷]. اضافه کردن زیرکونیم می‌تواند باعث بهبود قابل توجه سختی در فولادهای میکروآلیاژی گردد. ساختار میکروسکوپی فولادهای منگنزی در حالت ریختگی و بدون عملیات آنیل محلولی، شامل زمینه آستنیتی و رسوبات

درجه سانتی‌گراد در قالب‌های وای بلوک انجام شد. جدول (۲) شرح نمونه‌های تهیه‌شده و مقدار زیرکونیم موجود در آنها را نشان می‌دهد.

عملیات آنیل محلولی نمونه‌ها در کوره مقاومتی با سرعت گرمایش ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بر ساعت انجام گرفت و پس از رسیدن دما به ۱۱۰۰-۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌ها به مدت ۵ ساعت در این دما نگهداری شدند و سپس سریعاً در آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد سرد شدند. به‌منظور جلوگیری از افزایش دما، آب موجود در مخزن به‌طور مداوم به‌هم‌خورده و دمای آب به‌وسیله دستگاه دماسنج کنترل و آب در دمای محیط به مخزن افزوده شد تا از هرگونه افزایش دما به بالاتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد جلوگیری شود. برای انجام آزمایش‌ها مکانیکی، مطابق با استانداردهای مربوطه از نمونه‌های وای بلوک مطابق با جدول (۲)، نمونه‌های آزمایش استاندارد تهیه و نام‌گذاری شدند و روی نمونه‌ها آزمایش‌های متالوگرافی و سایش انجام گرفت

جدول ۲- شرح نمونه‌ها و عملیات حرارتی روی آنها

نمونه	شرح
A	نمونه بدون افزودن زیرکونیم و بدون عملیات آنیل محلولی
B	نمونه بدون افزودن زیرکونیم و با عملیات آنیل محلولی
C	افزودن ۰/۱۵ درصد زیرکونیم و بدون عملیات آنیل محلولی
D	افزودن ۰/۱۵ درصد زیرکونیم و با عملیات آنیل محلولی
E	افزودن ۰/۲۵ درصد زیرکونیم و بدون عملیات آنیل محلولی
F	افزودن ۰/۲۵ درصد زیرکونیم با عملیات آنیل محلولی

۲-۱- آزمایش سایش

روش‌های متعددی برای بررسی رفتار سایشی و تریبولوژیکی مواد وجود دارد که در بین آنها روش پین روی دیسک روش شناخته شده‌ای است. این روش برای بررسی مقاومت به سایش انواع مواد فلزی، سرامیکی، کامپوزیتی و پوشش‌های سطحی استفاده می‌گردد [۱۰-۱۲]. آزمایش سایش به روش پین روی دیسک و با استفاده از دستگاه مجهز به سیستم کنترل کامپیوتری همراه با کنترل و ثبت دمای پین، ضریب اصطکاک، دور موتور و مسافت طی شده انجام شد. نمونه مورد آزمایش به‌عنوان عضو ساییده شونده و به شکل استوانه به قطر ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰ میلی‌متر تهیه شدند و آزمایش سایش در دمای محیط با رطوبت نسبی بین ۴۰ تا ۶۰ درصد و بدون روان‌کار و به‌صورت خشک انجام شده است. در این آزمایش از سنگ ساینده سنگ ساینده از جنس سیلیکون‌کارباید به‌عنوان عامل ساینده استفاده شد. قطر سنگ ساینده، ۲۰۰ میلی‌متر بود و از هر دو طرف آن و فقط برای یک‌بار در هر مسیر استفاده شد.

فولادهای پر منگنز تمایل بسیاری برای واکنش با ماسه‌های سیلیسی دارد و نیز عیب ماسه‌سوزی شدیدی را در قالب‌های ماسه سیلیسی به وجود می‌آورد. به همین دلیل، قالب‌های تهیه شده با ماسه الیومنی مناسب‌ترین ماسه قالب‌گیری برای قطعات فولاد منگنزی است؛ اما به علت گرانی ماسه‌های الیومنی، معمولاً از قالب‌های ماسه‌ای سیلیسی استفاده شده و سطح قالب را با پوشان‌های پایه زیرکونی پوشش می‌دهند تا از تماس مستقیم مذاب با ماسه جلوگیری کنند. بنابراین در این تحقیق، ابتدا ۶ قالب وای‌بلوک، طبق استاندارد DIN:50125 که در شکل (۲) نشان داده شده است، با ماسه سیلیسی و چسب سیلیکات سدیم و سخت‌کننده گازی CO₂ تهیه شد. سپس جهت جلوگیری از واکنش بین مذاب و ماسه سیلیسی، سطح داخلی قالب‌های وای‌بلوک توسط پوشان زیرکونی پایه الکی مخصوص این فولادها و توسط برس دستی پوشش داده و خشک شد. عمل ذوب در کوره القایی فرکانس بالا با نسوز خشک منیزیتی انجام گرفت. مخلوط قراضه فولاد و قراضه فولاد منگنزی به کوره شارژ شد و سپس کوره با توان پایین راه‌اندازی شد تا عمل ذوب شارژ انجام گیرد. آنالیز مذاب به روش کوانتومتری تعیین شد و با انجام محاسبات، مقدار عناصر آلیاژی مورد نیاز به کوره اضافه شد تا نهایتاً مذاب با آنالیز موردنظر آماده شد. جدول (۱) آنالیز مذاب تهیه‌شده را نشان می‌دهد.

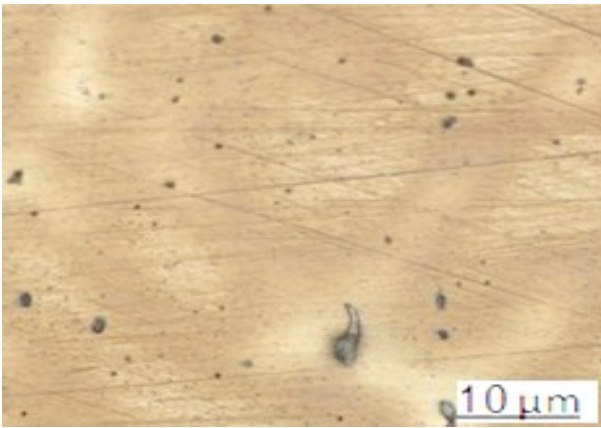


شکل ۲- تصویر وای‌بلوک ریخته شده مطابق با استاندارد DIN: 50125

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مذاب پایه در کوره (درصد وزنی)

C	Si	Mn	Cr	S	P
۱,۴۰	۱,۰۲	۱۳,۰۳	۱,۱۳	۰,۰۱۲	۰,۰۴۵

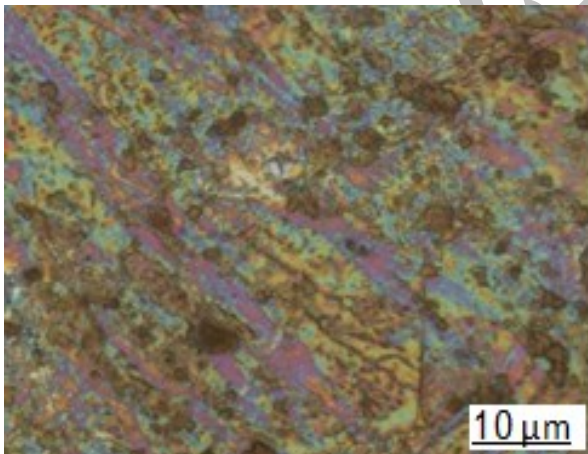
با توجه به ترکیب شیمیایی، آلیاژ تهیه‌شده مطابق با استاندارد آمریکایی ASTM A128 گرید C است. در این مرحله با انجام محاسبات لازم فرو سیلیکوزیرکونیم ۲۵٪ با تلفات ۳۰٪ به مذاب افزوده شد و دو مذاب با مقادیر ۰/۱۵٪ و ۰/۲۵٪ به دست آمد. عمل ذوب‌ریزی به‌وسیله پاتیل دستی و در دمای ۱۴۵۰



شکل ۶- ریزساختار نمونه ریختگی بدون زیرکونیم بعد از عملیات حرارتی آنیل محلولی (نمونه B)

شکل (۶)، تصویر میکروسکوپی از ریزساختار نمونه بدون زیرکونیم و در حالت عملیات آنیل محلولی (نمونه B) نشان می‌دهد که ساختار آستنیتی بوده و کاربیدهای مرزدانه‌ای در ساختار حل شده‌اند. نقاط تیره رنگ آخال‌ها و رسوبات فسفید منگنز می‌باشند.

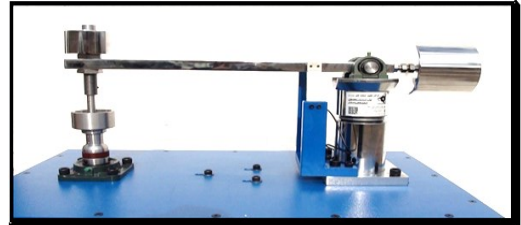
شکل (۷) ریزساختار نمونه حاوی ۰۵/۱۵ درصد زیرکونیم بدون عملیات حرارتی را نشان می‌دهد. در بررسی ریزساختار مشخص می‌شود که وجود زیرکونیم در ترکیب شیمیایی، از تشکیل کاربیدهای منگنز در زمینه جلوگیری کرده و مقدار آن را کاهش داده است.



شکل ۷- ریزساختار نمونه ریختگی با ۰/۱۵ درصد زیرکونیم بدون عملیات حرارتی (نمونه C)

شکل (۸) ریزساختار نمونه ریختگی با ۰/۱۵ درصد زیرکونیم با عملیات حرارتی (نمونه D) را نشان می‌دهد. افزودن زیرکونیم باعث می‌تواند سبب کاهش مقدار کربن محلول و همچنین ضریب نفوذ کربن شده و در نتیجه کاربید منگنز نسبت به شرایط پس از ریختگی کاهش یافته است [۱۶-۱۷].

استفاده از سنگ ساینده در آزمون پین روی دیسک را می‌توان روشی مناسب برای ارزیابی رفتار تریبولوژیکی مواد مقاوم به سایش از جمله فولاد هادفیلد قلمداد نمود. اما سختی اولیه فلز را نمی‌توان معیاری برای تعیین مقاومت به سایش تلقی نمود. بلکه باید به رفتار کارسختی فلز ساییده شونده در اثر نیروهای سایشی توجه نمود [۱۴-۱۳].



شکل ۳- دستگاه آزمایش سایش پین روی دیسک [۱۵]

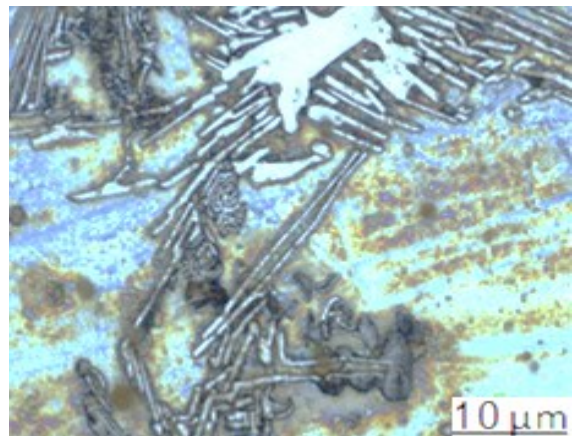


شکل ۴- نمونه‌های آزمایش سایش طبق استاندارد ASTM G99

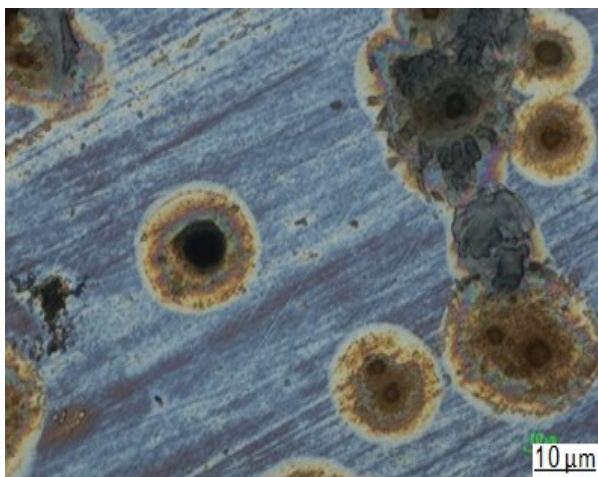
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ساختاری

شکل (۵) تصویر ساختار متالوگرافی قبل از عملیات حرارتی برای فولاد هادفیلد A را نشان می‌دهد. در این تصویر کاربیدهای مرزدانه‌ای علاوه بر مرز دانه‌ها، به درون دانه‌ها نیز رشد کرده‌اند. علاوه بر کاربیدها، به دلیل وجود کربن، کلونی‌های پرلیت نیز دیده می‌شوند.

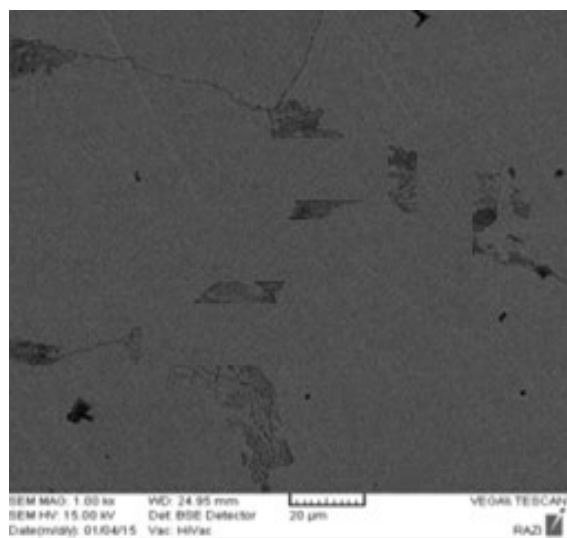


شکل ۵- تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار ریختگی. نمونه A (محلول اچ نیپال ۳ درصد)



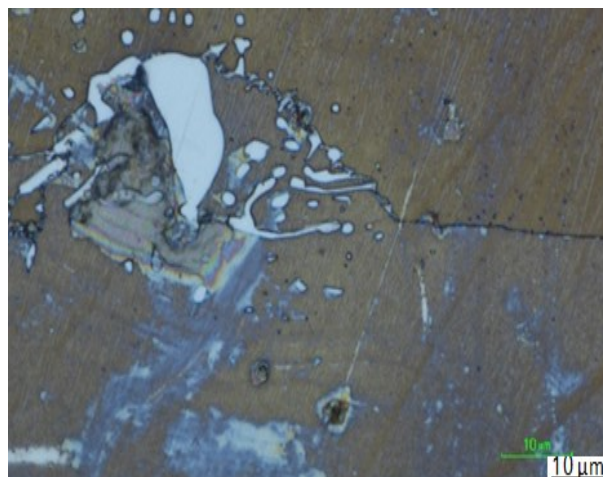
شکل ۱۰- ریزساختار نمونه حاوی ۰,۲۵ درصد زیرکونیم با عملیات حرارتی (نمونه F)

شکل (۱۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه ریختگی با ۰/۲۵ درصد زیرکونیم بدون عملیات حرارتی (نمونه E) را نشان می‌دهد. مطابق شکل وجود زیرکونیم موجب کاهش فراوان کاربیدهای موجود در زمینه شده است.



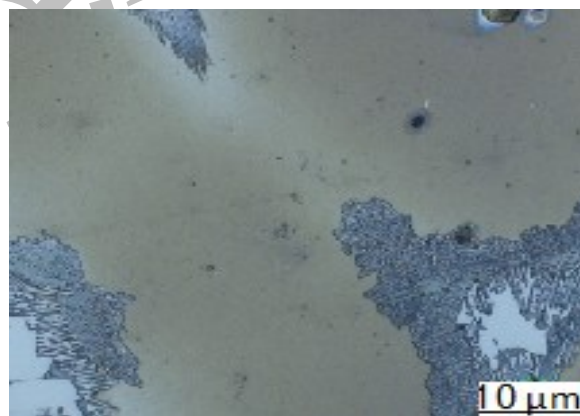
شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه ریختگی با ۰,۲۵ درصد زیرکونیم بدون عملیات حرارتی (نمونه E)

شکل (۱۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه ریختگی با ۰/۲۵ درصد زیرکونیم با انجام عملیات حرارتی آنیل محلولی (نمونه F) را نشان می‌دهد. مطابق شکل، انجام عملیات آنیل محلولی مقدار کاربید باقی‌مانده در ساختار آستنیتی را بسیار کاهش داده و در مقایسه با نمونه E، این کاربیدها ریزتر بوده و توزیع یکنواخت‌تری دارند. علت آن به کاهش ضریب نفوذ کربن در اثر وجود زیرکونیم و تأثیر زیرکونیم بر حلالیت بیشتر کاربیدها در زمینه آستنیتی در اثر عملیات حرارتی آنیل محلولی است.



شکل ۸- ریزساختار نمونه ریختگی با ۰,۱۵ درصد زیرکونیم با عملیات حرارتی (نمونه D)

شکل (۹) ریزساختار نمونه حاوی ۰,۲۵ درصد زیرکونیم بدون عملیات حرارتی را نشان می‌دهد که شامل کاربیدهای مرزدانه‌ای و بین‌دانه‌ای است. لازم به ذکر است که کاربیدها در مرز دانه‌ها به صورت ناپیوسته هستند که نشان‌دهنده تأثیر زیرکونیم روی کاربیدها است. به‌علاوه در ریزساختار، کلونی‌های پرلیت نیز مشاهده می‌گردند.



شکل ۹- ریزساختار نمونه ریختگی با ۰/۲۵ درصد زیرکونیم بدون عملیات حرارتی (نمونه E)

شکل (۱۰) ریزساختار نمونه حاوی ۰/۲۵ درصد زیرکونیم با عملیات حرارتی را نشان می‌دهد که پدیده شکسته شدن کاربیدها و رسوب آنها به شکل کروی قابل مشاهده است. در مقایسه با سایر نمونه‌ها، افزودن بیشتر زیرکونیم باعث کاهش نفوذ کربن شده و کاربید منگنز نسبت به سایر نمونه‌ها کاهش بیشتری یافته است. عملیات آنیل محلولی نیز با حل کردن کاربید منگنزی، نسبت منگنز به کربن زمینه آستنیتی را می‌تواند بیشتر کند [۱۸].

۴- نتیجه‌گیری

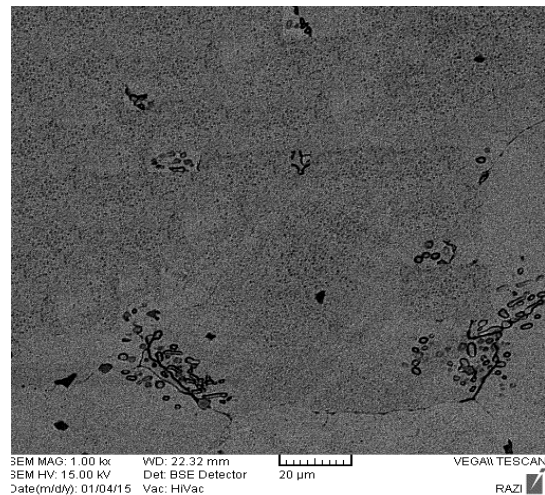
- ۱- افزودن زیرکونیم باعث کاهش تشکیل کاربید منگنز در ریزساختار می‌شود. عملیات آنیل محلولی با حل کردن مقادیر بیشتری از کاربید منگنز در زمینه آستنیتی، مقاومت سایشی را بهبود بیشتری می‌دهد.
- ۲- افزودن زیرکونیم باعث ریز شدن و توزیع یکنواخت کاربیدهای منگنز باقیمانده در ساختار می‌شود و مقاومت سایشی را بهبود می‌دهد.
- ۳- در تمامی نمونه‌ها، عملیات حرارتی آنیل محلولی با ایجاد ساختار آستنیتی و حل کردن مقادیر بیشتری از کاربیدهای منگنز در زمینه آستنیتی، باعث بهبود مقاومت به سایش می‌گردد.
- ۴- بالاترین مقاومت به سایش در نمونه با ۰/۲۵ درصد زیرکونیم و عملیات حرارتی آنیل محلولی به دست می‌آید که در مقایسه با سایر نمونه‌ها، دارای کاربید منگنز کمتری است.

تقدیر و تشکر

از مدیریت و کارکنان شرکت استعمار صنعت که با همکاری خوب و تأمین امکانات لازم جهت انجام این پژوهش، نویسنده را یاری نمودند، تقدیر و تشکر می‌گردد.

مراجع

- [۱] ترابی ا، اهینی ک، ناصری م، بررسی تأثیر کارسختی اولیه بر رفتار سایشی فولاد منگنزی آستنیتی، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، ۱۳۹۵، ۳(۱۰) ۹۳-۱۰۲.
- [۲] عباسی، م، خیراندیش ش، حجازی ج، خرازی ی، ارتباط بین کرنش دوقلوئی و پدیده‌ی چروکیدگی سطحی در تغییر شکل مومسان فولاد آستنیتی منگنزی، نشریه مهندسی متالوژی مواد، ۱۳۹۳، ۲۵(۲) ۱-۱۲.
- [3] Subhi A.D., Abdulrazaq O.A., Phase transformations of hadfield manganese steels, J. Eng. & Technology, 2007, 25 (6) 808-814.
- [4] Srivastava A.K., Das K., Microstructural characterization of hadfield austenitic manganese steel, J. Mater. Sci., 2008, 43 5654-5658.
- [5] Bouaziz O., Allain S., Scott C., Cugy P., Barbier D., High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: a review of the microstructure properties relationships, Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2011, 15 141-168.
- [6] Haakonsen F., Optimizing of strømhård austenitic manganese steel, Thesis for the Degree of Philosophie Doctor, Norwegian University of Science and Technology, 2009, May.
- [7] Hull D., Deformation twinning, Proceedings of a Metallurgical Society Conference, Gainesville, Florida, Gordon and Breach Science, New-York, 1964.
- [8] Agunsoye J.O., Balogun S.A., Esezobor D.E., Nganbe M., Wear of Hadfield austenitic manganese steel casting, Scripta Mater., 2000, 42 1107-1112.



شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه ریختگی با ۰/۲۵ درصد زیرکونیم با انجام عملیات حرارتی آنیل محلولی (نمونه F)

۲-۳- بررسی نتایج آزمایش سایش

جدول (۳) نتیجه کاهش وزن نمونه‌های عملیات حرارتی شده نسبت به مسافت طی شده در آزمایش سایش را نشان می‌دهد. نتایج مشخص می‌سازند که عملیات حرارتی و افزودن زیرکونیم تأثیر قابل توجهی در بهبود مقاومت به سایش دارند. در بین نمونه‌های آزمایش شده بالاترین مقاومت به سایش را نمونه‌های با ۰,۲۵ درصد زیرکونیم و با عملیات حرارتی آنیل محلولی دارند.

علت بالاتر بودن مقاومت سایشی در نمونه F، نیز وجود زیرکونیم بالاتر در مقایسه با سایر نمونه‌ها بوده با کاهش ضریب نفوذ کربن، مقدار کاربید منگنز را کاهش می‌دهد. به‌علاوه انجام عملیات حرارتی آنیل محلولی، با حل کردن مقادیر بیشتری از کاربیدهای منگنز در زمینه آستنیتی، مقاومت سایشی را بهبود می‌بخشد. کاهش نفوذ کربن شده و کاربید منگنز نسبت به شرایط پس از ریختگی کاهش می‌یابد [۲۰-۱۹].

جدول ۳- نتیجه کاهش وزن نمونه‌های عملیات حرارتی شده نسبت به مسافت طی شده در آزمایش سایش

مسافت طی شده (متر)	کاهش وزن نمونه A (گرم)	کاهش وزن نمونه B (گرم)	کاهش وزن نمونه C (گرم)	کاهش وزن نمونه D (گرم)	کاهش وزن نمونه E (گرم)	کاهش وزن نمونه F (گرم)
۵۰۰	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲۰
۱۰۰۰	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۲۰
۱۵۰۰	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۲۳

- Technology, An International Journal, 2020, 23(5) 1208-1213.
- [15] Fernández J.E., Vijande R., Tucho R. Rodríguez J., Martín B.A., Materials selection to excavator teeth in mining industry, *Wear*, 2001, 250 11–18.
- [16] Isheim D., Hunter A.H., Zhang X.J., Seidman D.N., Nanoscale analyses of high-nickel concentration martensitic high-strength steels, *Metallurgical And Materials Transactions A*, 2013, 44 3046–3059.
- [17] Show B.K., Veerababu R., Balamur R., Krishnan A., Malakondaiah G., Effect of vanadium and titanium modification on the microstructure and mechanical properties of a microalloyed HSLA steel, *materials Science And Engineering: A*, 2010, 527 (6) 1595-1604.
- [18] Ghosh P., Ray R.K., Ghosh C., Bhattacharjee D., Comparative study of precipitation behavior and texture formation in continuously annealed Ti and Ti + Nb added interstitial-free high-strength steels, *Scripta Materialia*, 2008, 58 (11) 939-942.
- [19] Sathishkumar K., Kalaivanan P., Karthick R., Kersone C., Design and analysis of hardness improvement on excavator bucket teeth, *IJARIE*, 2017, 3(2).
- [20] Zhou Y.J., Kan W., Modeling and simulation of hydraulic excavator based on virtual prototype, *Advanced Materials Research*, 2013, 785 1147-1150.
- [9] Azadi M., Pazuki A., Olya M., M.J., The effect of new double solution heat treatment on the high manganese hadfield steel properties, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2018, 7 618–626.
- [۱۰] عباسی م.، خیراندیش ش.، خرازی ی.، حجازی ج.، استفاده از سنگ ساینده جهت ارزیابی رفتار سایشی فولادها، مهندسی متالورژی و مواد، ۱۳۸۹، ۲۱(۲) ۷۰-۵۷.
- [۱۱] عباسی م.، خیراندیش ش.، خرازی ی.، حجازی ج.، بررسی تأثیر برخی عوامل اصلی بر رفتار سایشی فولاد هادفیلد، فصلنامه علوم و مهندسی سطح، ۱۳۸۸، ۷، ۸۰-۶۹.
- [۱۲] نعمتی نجف‌آبادی و.، مناجاتی‌زاده ح.، امینی ک.، بررسی تأثیر تیتانیوم بر بهبود خواص فولاد هادفیلد ASTM A128-C، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، بهار ۱۳۹۲، ۷، (۱ پیاپی ۲۴) ۴۵-۵۴.
- [13] Hadi S., Suryo A., Bayuseno P., Jamari J., Analysis of AISI material power of AISI 4140 bucket teeth excavator using influence of abrasive wear, *AIP Conference Proceedings*, 2018.
- [14] Keleş A., Yildirim M., Improvement of mechanical properties by means of titanium alloying to steel teeth used in the excavator, *Engineering Science and*

IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

Effect of Zirconium and Heat Treatment on Microstructure and Wear Properties of High Manganese Steels

Najmeddin Arab

Assistant Professor, Department of Materials Science, Saveh Branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran.

Corresponding Author: P.O. Box 366-39187, KhatmAnbia City Uni. Saveh, Iran. Tel: +988642433342 / Fax: +98 8642433008.

Paper history:

Received: 13 Dec. 2021

Accepted: 22 April 2022

Abstract:

Standard manganese steel or Hadfield steel is a non-magnetic alloy of iron, manganese, carbon with a composition of 1.0-1.4% carbon and 10-14% manganese. It is important to maintain the ratio of manganese to carbon in this steel. The good abrasion resistance, microstructure and hardenability are the main properties of these steels. The important limitations in the production of high manganese steel parts, are formation of coarse manganese-carbides during the solidification process, and partially solution of carbides in microstructure during solution annealing heat treatment. In this research, the effects of increasing zirconium alloy element and the effect of solution annealing heat treatment on microstructure and abrasion resistance of manganese steels is investigated by analyzing microstructure and wear conditions. Wear test was carried out at 500, 1000 and 1500 meters distance. The wear test results showed that Zr can modify wear resistant in as cast and solution treatment conditions. The microstructure assessment results shows that increasing of Zirconium element increase solution tendency of carbides in as cast and heat treated condition, and modify remained carbide sizes and distribution in Zr content steels especially in 0.25% Zr.

Keywords:

Manganese steels,
Zirconium,
Solution annealing,
Microstructure,
Wear resistance.

[Please cite this article using:](#)

Najmeddin Arab, Effect of Zirconium and Heat Treatment on Microstructure and Wear of High Manganese Steels, in Persian, Founding Research Journal, 2021, 5(3) 185-192.

DOI: 10.22034/FRJ.2022.319623.1146

Journal homepage: www.foundingjournal.ir