بررسی تأثیر جنس ماسه قالب‌گیری بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد هایپریوتکتوئید هادفیلد

مسعود سبزی*، **رقیه کلانتری‌پور**

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول



مهندس مسعود سبزی،
نویسنده مسئول مقاله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول
mas.metallurg88@gmail.com

چکیده: در این پژوهش به بررسی تأثیر نوع ماسه قالب‌گیری بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد هایپریوتکتوئید هادفیلد پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا سه مدل دیسکی شکل از جنس آلومینیوم تهیه شد. سپس برای قالب‌گیری از ماسه‌های الیوینی، کرومیتی و سیلیسی استفاده گردید. در هنگام ذوب ریزی، دمای ریخته‌گری ۱۴۵۰°C برای هر سه قالب در نظر گرفته و مذاب مورد نظر توسط کوره القایی بدون هسته تهیه شد. سپس برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری، برای بررسی سختی آنها از سختی‌سنجی به روش ویکرز، برای بررسی چقرمگی از آزمایش ضربه شارپی و برای بررسی مقاومت به سایش از آزمایش پین روی دیسک استفاده گردید. نتایج نشان داد که قطعه‌ی ریخته‌گری شده در قالب ماسه کرومیتی نسبت به قطعات ریخته‌گری شده در قالب‌های ماسه سیلیسی و الیوینی از کمترین میزان رسوب کاربیدی، سختی و مقاومت به سایش برخوردار بوده و در عوض از بالاترین چقرمگی برخوردار است. زیرا ماسه کرومیتی از نرخ انتقال حرارت بالاتری برخوردار بوده و همین موضوع احتمال تشکیل فازهای ثانویه را کم کرده بود.

کلمات کلیدی: فولاد هایپریوتکتوئید هادفیلد، خواص مکانیکی، ماسه قالب‌گیری، ریزساختار.

۱- مقدمه

اولین فولاد آستنیتی منگنزدار که دارای حدود ۱/۲ درصد وزنی کربن و ۱۲ درصد وزنی منگنز بود، توسط رابرت هدفیلد[1] در سال ۱۸۸۲ میلادی تهیه شد. فولاد هادفیلد یک آلیاژ غیرمغناطیسی تشکیل شده از آهن، کربن ۱/۴-۱ درصد وزنی و منگنز ۱۴-۱۰ درصد وزنی می‌باشد که از قابلیت کارسختی بالایی برخوردار بوده و دارای مقاومت بسیار خوبی در برابر سایش است. این فولاد با استحکام بالا، انعطاف پذیری خوب و مقاومت عالی در برابر سایش بصورت گسترده در صنایع مختلف نظیر صنایع سیمان، معدن، راه‌سازی و راه‌آهن بکار گرفته می‌شود [۲و۱]. در موارد خاص و بنا به کاربرد آن، عناصر آلیاژی دیگری نیز به این فولاد اضافه می‌شود. یکی از این عناصر تیتانیم می‌باشد. استفاده از عنصر تیتانیم جهت ریزدانه کردن ساختار و افزایش سختی در این فولاد نتایج بسیار مثبتی بجای گذاشته است [۴و۳]. اگرچه عنصر تیتانیم باعث افزایش سختی شده بود، اما مطالعه ریزساختار فولاد هادفیلد نشان می‌دهد که این عنصر با ایجاد ذرات کاربید تیتانیم، باعث کاهش چقرمگی فولاد مذکور می‌شود[۵]. در همین رابطه، اسری واستاوا[2] و همکارانش [۶]، تأثیر ذرات تقویت کننده‌ی کاربید تیتانیم بر رفتار خوردگی کامپوزیت‌های با زمینه فولاد آستنیتی هادفیلد پرداختند. این محققان نشان دادند که با افزایش میزان ذرات تقویت کننده‌ی کاربید تیتانیم، مقاومت خوردگی کامپوزیت مذکور کاهش می یابد.

خیاط و همکارانش [۷] به بررسی تأثیر آلومینیوم بر خواص و ریزساختار فولاد هادفیلد پرداختند و دریافتند که افزودن آلومینیم به فولاد هادفیلد، منجر به کاهش کاربیدهای مرزدانه‌ای در ساختار ریختگی شده و مورفولوژی کاربیدها را از حالت پیوسته خارج کرده و به شکل منقطع تبدیل می‌کند. همچنین بررسی‌ها نشان داده است که افزایش مقدار آلومینیوم در فولادهای منگنزی،

[1] Robert Hadfield
[2] Srivastava

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.2.5]

نیروی محرکه لازم برای انجام استحاله آستنیت به مارتنزیت را در این فولادها افزایش داده و از طرفی دمای تشکیل مارتنزیت را کاهش می‌دهد [۸].

بدون شک، فرآیند عملیات حرارتی اعمال شده بروی فولادها، تأثیر زیادی بر روی خواص مکانیکی و خوردگی آنها دارد. بررسی‌های انجام شده بر روی فولادهای آستنیتی پرمنگنز نشان می دهد که دمای عملیات حرارتی آنیل انحلالی تأثیر بسیاری بر خواص مکانیکی و تشکیل مارتنزیت در این آلیاژها دارد [۹]. فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد به دلیل دارا بودن مقدار کربن بالا، ساختار آن در حالت ریخته‌گری، شامل دانه‌های آستنیت و رسوبهای کاربیدی زیادی است که در این حالت خواص مکانیکی قطعه‌ی ساخته شده از فولاد هادفیلد افت پیدا می‌کند. برای رفع این مشکل رواندوست و همکارانش [۱۰] نشان دادند که اگر پس از ریخته‌گری، این فولاد تحت تندسرمایی مستقیم در آب قرار گیرد، کاربیدهای مرزدانه‌ای حذف می‌شوند و از اثرات نامطلوب کاربیدها بر روی خواص مکانیکی این فولاد جلوگیری می شود. در همین راستا، حسینی و همکارانش [۱۳ – ۱۱] گزارش نمودند که سریع سردی فولاد هادفیلد پس از عملیات حرارتی آستنیته در حمام آب نمک منجر به کاهش ذرات کاربیدی در ریزساختار این فولاد می‌شود. همچنین بررسی‌ها نشان داده است که افزودن بور به میزان ۰/۰۰۴ – ۰/۰۰۳ درصد وزنی به فولاد هادفیلد باعث افزایش انحلال کاربید در طی عملیات حرارتی می‌گردد [۱۴].

از آنجا که یکی از دلایل اصلی کاربرد فولاد هادفیلد به خاطر مقاومت به سایش بالای آن می‌باشد، تعدادی از محققین در تحقیقات جداگانه‌ای به بررسی خواص سایشی فولاد هادفیلد پرداختند. مقدم و همکارانش [۱۵]، گزارش دادند که افزودن وانادیوم به فولادهای منگنزی، باعث افزایش مقاومت به سایش آنها نسبت به فولاد منگنزدار هادفیلد می‌شود که دلیل این رخداد، تشکیل ذرات کاربید وانادیوم گزارش شده است. تعدادی دیگر از محققین [۱۸ – ۱۶] به مقایسه خواص و ساختار فولاد هادفیلد و آلیاژهای آهن– کروم پرداختند و نتایج آنها نشان می‌دهد که فولاد هادفیلد نسبت به آلیاژهای آهن– کروم از سختی پایین تری برخوردار می‌باشد.

گزارش‌های زیادی وجود دارد که ماسه‌های الیوین و کرومیت برای تهیه قالب در ریخته‌گری فولاد هادفیلد، مناسب‌ترین مواد هستند. اتفاق نظر بر این است که ماسه الیوین برای قالب‌گیری قطعات هادفیلد سبک و با ضخامت کم و همچنین ماسه کرومیت برای قطعات سنگین و با ضخامت زیاد مناسب است. درصورتی‌که فولاد هادفیلد با قالب سیلیسی تولید شود در ناحیه فصل مشترک مذاب – قالب ترکیب زود ذوبی به صورت $2MnO.SiO_2$ تشکیل می‌شود که این ترکیب بدون هیچ وابستگی محکمی روی سطح قالب باقی می‌ماند و باعث بروز عیب ماسه سوزی شدید می‌شود. از طرفی بدلیل انتقال حرارت پایین ماسه سیلیسی، اندازه دانه‌ها در این حالت ریز و تشکیل کاربیدهای مخرب در مرزدانه‌های ریزساختار قطعات ریختگی به حداکثر مقدار خود می‌رسد و متعاقباً خواص مکانیکی قطعه ریختگی افت پیدا می‌کند [۲۱ – ۱۹].

باتوجه به اینکه قطعات ساخته شده از جنس فولاد هادفیلد در کاربردهای استراتژیکی نظیر خطوط ریلی، مته حفاری، چکش سنگ‌شکن، ناخنک بیل مکانیکی و ... بکار برده می‌شوند و تخریب آن در شرایط سرویس‌دهی بسیار پرهزینه است، لذا در این پژوهش لازم دیده شده که به بررسی تأثیر نوع ماسه قالب‌گیری بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد هایپریوتکتوئید هادفیلد پرداخته شود که در پژوهش‌های پیشین به آن پرداخته نشده بود.

۲- مواد و روش تحقیق

فولاد مورد استفاده در این تحقیق، فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد ASTM A-۱۲۸ [۲۲] بود. برای تهیه‌ی این آلیاژ، ابتدا سه مدل دیسکی شکل از جنس آلومینیوم تهیه شد. سپس برای قالب‌گیری از ماسه‌های الیوینی، کرومیتی و سیلیسی استفاده شد. لازم به ذکر است که قالب‌هایی که از ماسه سیلیسی تهیه شدند با چسب بنتونیت و آب (به صورت ماسه تر) و قالب‌های تهیه شده از ماسه الیوین و ماسه کرومیت با چسب سیلیکات سدیم و گاز CO_2 قالب‌گیری شدند. در قالب‌هایی که از ماسه الیوین و ماسه کرومیت استفاده شد، از ماسه الیوین و کرومیت در سطح و از ماسه سیلیسی با چسب سیلیکات سدیم بصورت ماسه پشت بند جهت صرفه‌جویی در مصرف ماسه الیوین و ماسه کرومیت استفاده گشت. شرایط قالب‌گیری، مقدار چسب و رطوبت و زمان گازگیری برای تمام درجات قالب‌گیری شده در تمام مراحل ذوب برای تمام درجات یکسان در نظر گرفته شد. همچنین ضخامت هر سه قالب ماسه‌ای حدود ۳cm بود.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.2.5]

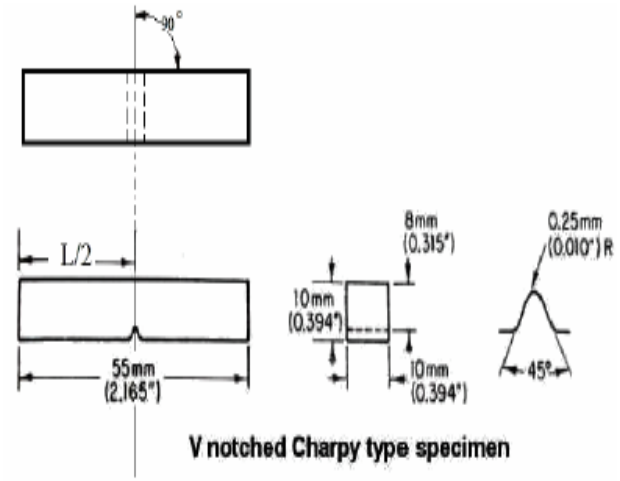
در هنگام ذوب‌ریزی، دمای ریخته‌گری ۱۴۵۰°C برای هر سه قالب در نظر گرفته و مذاب مورد نظر توسط کوره القایی بدون هسته تهیه گردید. پس از ریخته‌گری بلوک‌ها، ترکیب شیمیایی آنها توسط دستگاه طیف سنجی نشری جرقه‌ای ساخت کشور آلمان بررسی شد و در جدول ۱ گزارش داده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده برحسب درصد وزنی.

Sample	C	Mn	Cr	Si	P	Fe
ASTM A-۱۲۸	۱/۰۵ – ۱/۳۵	۱۱/۵ – ۱۴/۵	۱/۵ – ۲/۵	۱max	۰/۰۷max	بقیه
Disc Block	۱/۲۱	۱۲/۲۲	۱/۷۳	۰/۴۲۵	۰/۰۲۵	بقیه

جهت بررسی ریزساختار نمونه‌ها، نمونه‌ها با استفاده از سمباده‌های مختلف به روش تر آماده‌سازی شده و برای اچ کردن آنها از محلول نایتال ۲ درصد استفاده شد و در نهایت ریزساختارهای حاصل توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی میزان کاربیدهای هر سه نمونه‌ی ریخته‌گری شده از نرم افزار J Image استفاده شد. برای بررسی سختی، از هر سه نمونه‌ی مورد آزمایش بعد از پایان انجماد، براساس استاندارد ASTM E۹۲–۸۲ [۲۳]، آزمون سختی‌سنجی با استفاده از دستگاه INSTRON انجام شد. همچنین بعد از پایان انجماد، نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش ضربه شارپی مطابق با استاندارد ASTM A۳۷۰ [۲۴] توسط دستگاه تراش CNC تهیه گردیدند (شکل ۱).

لازم به ذکر است که آزمایش ضربه شارپی توسط دستگاه SANTAM با ظرفیت ۲۰۰ ژول و در دمای محیط انجام شد.



شکل ۱- ابعاد نمونه‌ی آزمایش ضربه شارپی بر اساس استاندارد ASTM A۳۷۰.

آزمایش سایش با استفاده از روش پین بر روی دیسک در دمای محیط، بدون روانکار و در شرایط سایش آرام با نیروی عمودی ۳۵ نیوتن و سرعت خطی ۰/۴۵ متر بر ثانیه انجام شد. در این آزمون، پین از جنس فولاد بلبیرینگ[1] با سختی ۷۰ راکول C، بصورت استوانه‌ای و با قطر ۱۰mm و ارتفاع ۴cm بود. همچنین دیسک از جنس فولاد هادفیلد ریخته‌گری شده در قالب‌های ماسه‌ای سیلیسی، الیوینی و کرومیتی با قطر ۱۵cm و ضخامت ۲cm بود. دستگاه مورد استفاده برای آزمایش سایش مجهز به سیستم ثبت تعداد دورموتور و نیروی سایش بود. همچنین برای اندازه‌گیری میزان کاهش وزن دیسک مورد آزمایش در مسافت‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰m، از ترازوی آزمایشگاهی با دقت ۰/۱mg استفاده گردید.

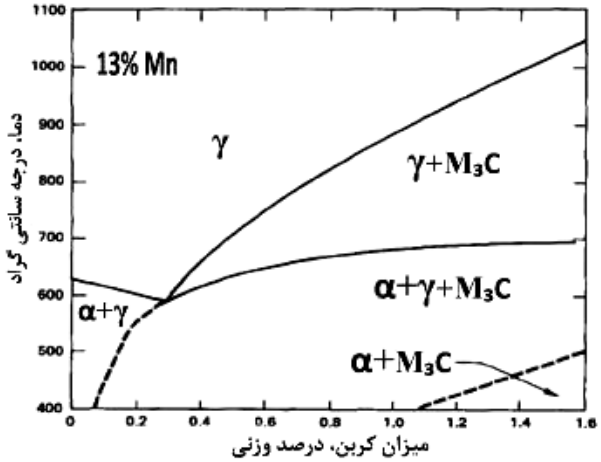
۳- نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد تولید شده در جدول ۱ مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، کربن در حدود ۱/۲ درصد

[1] Ball Bearings

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.2.5]

وزنی در ترکیب وجود دارد. از طرفی هم عناصر کاربیدزایی نظیر آهن، کروم و منگنز در ترکیب وجود دارند. بنابراین شرایط برای تشکیل میزان زیادی از ذرات کاربیدی در فولاد مورد بررسی پس از ریخته‌گری نیز وجود دارد. با توجه به دیاگرام تعادلی Fe-Mn-C که در شکل ۲ [۲] نشان داده شده است، ذرات کاربیدی برای آلیاژ Fe-Mn-C با ۱/۲٪C تقریباً از دمای ۹۰۰°C شروع به تشکیل کرده و تا دمای ۴۰۰°C ادامه دارد. لذا قطعه‌ی ریخته‌گری شده هرچقدر این بازه‌ی دمایی را با سرعت بیشتری طی کند، فرصت کمتری به کربن و عناصر کاربیدزا برای تشکیل کاربید می‌دهد [۲۰].



شکل ۲- نمودار تعادلی Fe-C-Mn در ۱۳ درصد وزنی Mn.

در شکل ۲ همچنین مشاهده می‌گردد که فاز فریت (α) در دماهای پایین تشکیل شود. این امر زمانی تحقق می‌یابد که سرعت سرد کردن بسیار تعادلی باشد (سرد کردن در کوره).

۳-۱- مشاهدات ریزساختاری

شکل ۳، تصاویر متالوگرافی تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری از فولاد هادفیلد مورد استفاده در این پژوهش را پس از ریخته‌گری نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در تمام نمونه‌های مورد آزمایش، ریزساختار متشکل از یک زمینه‌ی آستنیتی و مقادیر مختلفی از کاربید می‌باشد. حضور کاربید به دلیل حضور کربن زیاد و عناصر کاربیدزا می‌باشد. وجود زمینه‌ی آستنیتی هم بدلیل حضور کربن و منگنز زیاد در ترکیب است. اگر چه لی و چوی[1] [۲۵]، گزارش دادند که با افزایش منگنز در آلیاژهای Fe-Mn، دمای شروع مارتنزیت به میزان بسیار زیادی کاهش می‌یابد، بطوریکه در آلیاژهای پرمنگنز یک زمینه کاملاً آستنیتی را می‌توان مشاهده نمود. اما در فولاد منگنزدار هادفیلد، چه در شرایط ریخته‌گری و چه در شرایط عملیات حرارتی، انتظار تشکیل مارتنزیت را نداریم. از تصاویر تهیه شده مشاهده می‌گردد که در بین نمونه‌های ریخته‌گری شده، نمونه‌ای که در قالب ماسه کرومیتی ریخته‌گری شده است، دارای میزان ذرات کاربیدی کمتری است. ماسه کرومیتی نسبت به ماسه سیلیسی و الیوینی دارای نرخ انتقال حرارتی بالاتری می‌باشد [۲۱]. لذا مذاب ریخته شده در قالب ماسه کرومیتی با سرعت بیشتری بازه‌ی دمای تشکیل کاربید (با توجه به دیاگرام فازی موجود در شکل ۱ محدوده دمایی ۹۰۰°C - ۴۰۰) را طی می‌کند. لذا در قالب ماسه کرومیتی زمان کمتری به کربن برای واکنش با عناصر کاربیدزا داده شده است. در نتیجه با مقایسه‌ی ریزساختار قطعات ریخته‌گری شده در قالب‌های ماسه کرومیتی و سیلیسی ملاحظه می‌گردد که در قطعه‌ی ریخته‌گری شده در قالب ماسه کرومیتی برخلاف قالب سیلیسی، مورفولوژی کاربیدها از حالت پیوسته، خوشه‌ای شکل و تجمع یافته در مرزدانه‌ها خارج شده و بصورت پراکنده و کروی شکل در زمینه‌ی آستنیت تبدیل شده‌اند. اما بدلیل پایین بودن نرخ انتقال حرارت ماسه سیلیسی نسبت به ماسه کرومیتی، مذاب ریخته شده در این قالب، با سرعت پایین‌تری بازه دمایی تشکیل کاربید (۹۰۰°C - ۴۰۰) را طی نموده و لذا دارای میزان ذرات کاربیدی بیشتر و دانه‌های آستنیت کوچک‌تری می‌باشند. چون

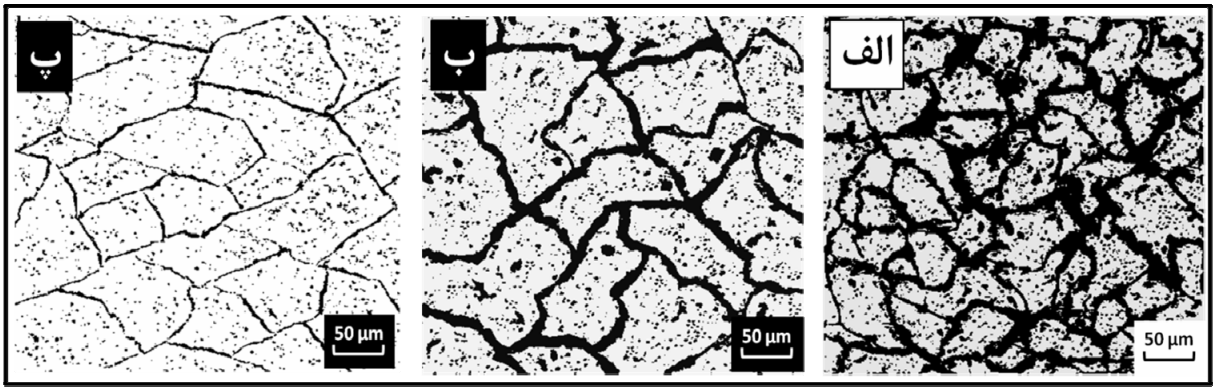
[1] Lee and Choi

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.2.5]

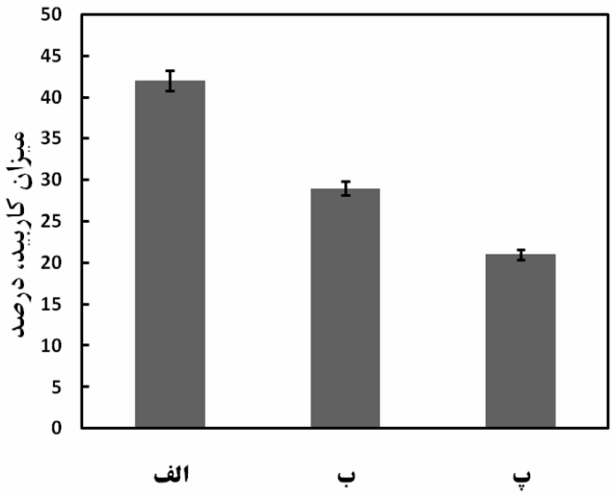
ذرات کاربیدی جلوی حرکت مرزدانه‌ها را گرفته و از درشت شدن دانه‌های آستنیت جلوگیری می‌کنند [۲۷ و ۲۶]. همچنین با مشاهده‌ی تصاویر متالوگرافی نمونه‌های ریخته‌گری شده، ملاحظه می‌گردد که نمونه ریخته‌گری شده در قالب الیوینی نسبت به نمونه ریخته‌گری شده در قالب ماسه سیلیسی از میزان کاربید کمتری برخوردار است که دلیل این امر هم نرخ انتقال حرارت بیشتر در ماسه الیوینی می‌باشد.

برای بررسی میزان کاربیدها، میزان ذرات کاربیدی بوسیله نرم افزار Image J برای تمام نمونه‌های مورد آزمایش، اندازه‌گیری شده و در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل هم مشاهده می‌شود که قطعه‌ی ریخته‌شده در قالب ماسه کرومیتی دارای میزان ذرات کاربیدی کمتری نسبت به قطعات ریخته شده در قالب‌های ماسه الیوینی و سیلیسی می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌گردد که قطعه‌ی ریخته شده در قالب ماسه الیوینی دارای میزان ذرات کاربیدی کمتری نسبت به قطعه ریخته شده در قالب ماسه سیلیسی است.

در مجموع مشاهدات میکروسکوپ نوری و اندازه‌گیری میزان رسوبات کاربیدی به کمک نرم افزار Image J، با نتایج حاصل شده از پژوهش آقای سبزی و همکارانش [۲۸] مطابقت دارد. آقای سبزی و همکارانش پیش از این گزارش داده بودند که استفاده از ماسه کرومیتی نسبت به ماسه سیلیسی و الیوینی جهت ریخته‌گری فولاد هادفیلد مناسب‌تر است. این محققان دلیل این امر را نرخ انتقال حرارت بیشتر ماسه کرومیتی و متعاقباً احتمال تشکیل میزان کاربید کمتر در ریزساختار توجیه کرده بودند.



شکل ۳- تصاویر متالوگرافی فولاد مورد استفاده در این پژوهش در بزرگنمایی ۱۰۰ تولید شده در قالب:
الف) ماسه سیلیسی، ب) ماسه الیوینی، پ) ماسه کرومیتی.

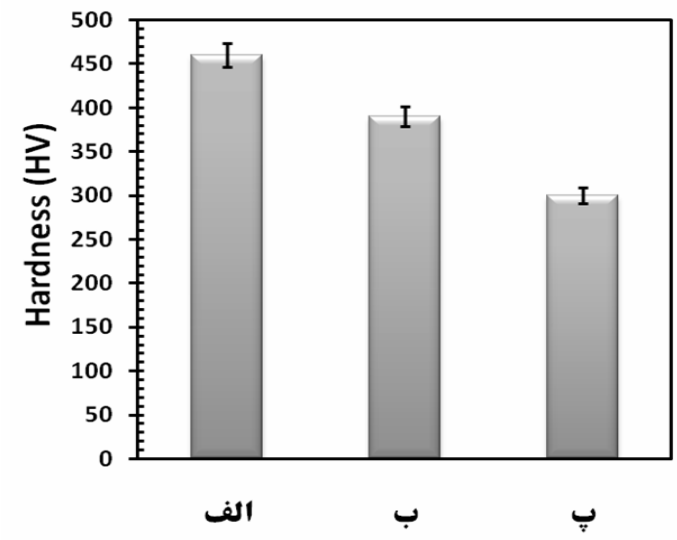


شکل ۴- تعیین توزیع کاربید توسط نرم افزار Image J در نمونه‌های ریخته‌گری شده در قالب:
الف) ماسه سیلیسی، ب) ماسه الیوینی، پ) ماسه کرومیتی.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.2.5]

۳-۲- آزمایش سختی

در شکل ۵ نتایج مربوط به آزمایش سختی برای هر سه نمونه‌ی مورد آزمایش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب سیلیسی نسبت به نمونه‌های ریخته‌گری شده در قالب‌های کرومیتی و الیوینی از سختی بیشتری برخوردار است. همانطور که از تصاویر میکروسکوپ نوری مشاهده گردید (شکل ۳)، نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب سیلیسی نسبت به نمونه‌های ریخته‌گری شده در قالب‌های کرومیتی و الیوینی از میزان کاربید بیشتری برخوردار است و کاربیدها هم ترکیباتی هستند که منجر به افزایش سختی می‌شوند [۲۹]. لذا با توجه به نقش رسوبات در افزایش سختی فولادها، می‌توان اثبات نمود که سختی بیشتر نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب سیلیسی نسبت به نمونه‌های ریخته‌گری شده در قالب‌های کرومیتی و الیوینی و سختی بیشتر نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب الیوینی نسبت به نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب کرومیتی ارتباط مستقیمی با میزان رسوبات کاربیدی در آنها دارد. در مجموع نتایج آزمایش سختی حکایت از آن دارد که در بین هر سه نمونه‌ی ریخته‌گری شده، نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب سیلیسی و نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب کرومیتی بترتیب بیشترین و کمترین میزان سختی را دارا هستند.

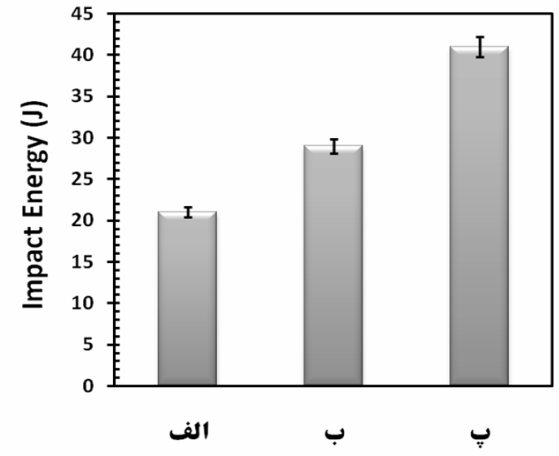


شکل ۵- متوسط نتایج آزمایش سختی با حداقل ۳ بار تکرارپذیری در نمونه‌های ریخته‌گری شده در قالب:
الف) ماسه سیلیسی، ب) ماسه الیوینی، پ) ماسه کرومیتی.

۳-۳- آزمایش ضربه

در شکل ۶ نتایج مربوط به آزمایش ضربه شارپی برای هر سه نمونه‌ی مورد آزمایش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب کرومیتی نسبت به نمونه‌های ریخته‌گری شده در قالب‌های سیلیسی و الیوینی از انرژی ضربه‌ی بالاتری برخوردار است. همانطور که از تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری مشاهده گردید، نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب کرومیتی نسبت به نمونه‌های ریخته‌گری شده در قالب‌های سیلیسی و الیوینی از میزان رسوبات کمتری برخوردار است. باتوجه به اینکه ذرات رسوبی زمانی‌که در زمینه‌ی فاز نرم آستنیت قرار می‌گیرند، قابلیت تغییر شکل مومسان آن را کاهش می‌دهند [۲۸]، لذا نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب کرومیتی نسبت به نمونه‌های ریخته‌گری شده در قالب‌های سیلیسی و الیوینی بدلیل داشتن میزان رسوبات کمتر، دارای چقرمگی و قابلیت جذب انرژی بیشتری در آزمایش ضربه شارپی است. همچنین از شکل ۶ ملاحظه می‌گردد که نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب الیوینی نسبت به نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب سیلیسی از قابلیت تغییر شکل مومسان بیشتری برخوردار است که این امر هم به کمتر بودن میزان رسوب کاربیدی در نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب الیوینی برمی‌گردد.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.2.5]

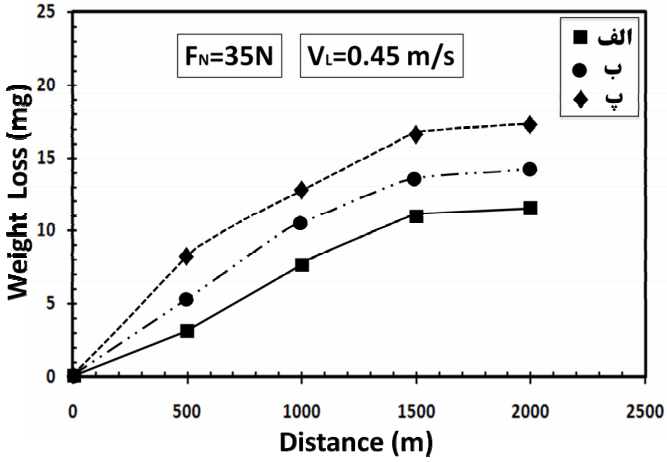


شکل ۶- متوسط نتایج آزمایش ضربه شارپی با حداقل ۳ بار تکرارپذیری در نمونه‌های ریخته‌گری شده در قالب:
الف) ماسه سیلیسی، ب) ماسه الیوینی، پ) ماسه کرومیتی.

۳-۴- آزمایش سایش

در شکل ۷ نتایج مربوط به آزمایش سایش در شرایط سایش آرام برای هر سه نمونه‌ی مورد آزمایش نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود، نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب سیلیسی نسبت به نمونه‌های ریخته‌گری شده در قالب‌های کرومیتی و الیوینی از مقاومت به سایش بیشتری برخوردار است. زیرا همانطور که از نتایج مشاهدات میکروسکوپ نوری و نتایج آزمایش سختی مشاهده گردید، نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب سیلیسی نسبت به نمونه‌های ریخته‌گری شده در قالب‌های کرومیتی و الیوینی از میزان رسوب و سختی بالاتری برخوردار است. همچنین یک رابطه‌ی مستقیم بین سختی و مقاومت به سایش وجود دارد [۳۰ و ۲۹]. کاربیدها ذرات سختی هستند که به عنوان مانعی در برابر حرکت جسم ساینده عمل می‌کنند. لذا هرچقدر میزان ذرات رسوبی در زمینه (آستنیت) بیشتر باشد، مقاومت بیشتری از فولاد هادفیلد در مقابل سایش دیده می‌شود [۳۰]. بنابراین نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب سیلیسی نسبت به نمونه‌ی ریخته‌گری شده در قالب کرومیتی به دلیل تفاوت در میزان کاربیدهای موجود در زمینه، بترتیب دارای بیشترین و کمترین مقاومت به سایش هستند.

همچنین با مشاهده‌ی شکل ۷، ملاحظه می‌گردد که میزان کاهش وزن در مرحله اول آزمایش سایش (۱۰۰۰m-۵۰۰) در هر سه نمونه بالا بوده و در مراحل بعدی آزمایش و با افزایش مسافت طی‌شده (۲۰۰۰m-۱۵۰۰)، میزان وزن از دست رفته کاهش می‌یابد. این امر بدلیل پدیده‌ی کارسختی در فولاد هادفیلد می‌باشد. در واقع در ابتدای آزمون، سایش خراشان اتفاق افتاده و سپس با طی مسافت‌های بیشتر و تغیرشکل پلاستیک سطح، سطح کارسخت شده و این امر منجر به بهبود مقاومت به سایش و توقف روند سعودی کاهش میزان وزن فولاد هادفیلد می‌شود[۳۰].



شکل ۷- نتایج آزمایش سایش در نمونه‌های ریخته‌گری شده در قالب: الف) ماسه سیلیسی، ب) ماسه الیوینی، پ) ماسه کرومیتی.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.2.5]

۴- نتایج

براساس مطالعات میکروسکوپ نوری و تحلیل نتایج آزمایش‌های مکانیکی می‌توان نتیجه گرفت که:

الف) مشاهدات ریزساختاری نشان داد که ماسه کرومیتی بدلیل نرخ سرد کردن بالاتر نسبت بـه ماسـه‌هـای سیلیـسی و الیـوینی، احتمال تشکیل ذرات فاز ثانویه و کاربیدها را کاهش می‌دهد. همچنین با بکارگیری هر نوع ماسه در فرآیند قالب‌گیری، دیده شـد که فاز غالب موجود در ریزساختار آستنیت می‌باشد.

ب) بررسی نتایج آزمایش سایش نشان داد که مقاومت به سایش فولاد هادفیلد در اثر ریخته‌گری آن در ماسـه سیلیـسی افـزایش افزایش می‌یابد. زیرا نرخ انتقال حرارت در ماسه سیلیسی نسبت به نرخ انتقال حرارت در ماسه‌های الیوینی و کرومیتـی نیـز کمتـر بوده و همین امر هم منجر به افزایش میزان رسوبات و متعاقباً افزایش مقاومت به سایش شده بود.

پ) بررسی نتایج آزمایش ضربه شارپی نشان داد که مقاومت به ضربه فولاد هادفیلد ریخته‌گری شـده در قالـب ماسـه کرومیتـی نسبت به فولاد هادفیلد ریخته‌گری شده در قالب‌های ماسه سیلیسی و الیوینی نیز بیشتر اسـت. زیـرا در اثـر ریختـه‌گـری فـولاد هادفیلد در قالب ماسه کرومیتی، میزان رسوب کمتری تشکیل شده بود.

ت) نتایج حاصل آز آزمایش سختی نشان از بیشتر بودن میزان سختی فولاد هادفیلد در اثر ریخته‌گری آن در قالب ماسه سیلیسی نسبت به ریخته‌گری آن در ماسه‌های الیوینی و کرومیتی داشت. زیرا در اثر ریخته‌گری فولاد هادفیلـد در قالـب ماسـه سیلیـسی، میزان رسوبات کاربیدی در ریزساختار فولاد هادفیلد افزایش یافته بود و ارتباط مستقیمی بین سختی و میزان رسـوبات نیـز وجـود دارد.

ث) لازم به ذکر است که در اکثر کاربردها، فولاد هادفیلد را پس از فرآیند عملیات حرارتی استفاده می‌کنند. لذا هدف ایـن مقالـه، تنها بررسی جنس ماسه قالب‌گیری بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد هادفیلد در شرایط ریخته‌گری بوده و باتوجه بـه وجـود مقادیر زیاد کاربید، عملاً نیاز به عملیات حرارتی جهت استفاده نهایی از این فولاد می‌باشد.

مراجع

[1] Barannikova, S.A., Li, Y., Malinovsky, A., Pestsov, D., "Study of Localized Plastic Deformation of Hadfield Steel Single Crystals Using Speckle Photography Technique", Key. Eng. Mater., Vol. 683, pp. 84-89, 2016.

[2] Lindroos, M., Apostol, M., Heino, V., Valtonen, K., Laukkanen, A., Holmberg, K., Kuokkala, V. T., "The deformation, strain hardening, and wear behavior of chromium-alloyed Hadfield steel in abrasive and impact conditions", Tribol. Lett., Vol. 57, pp. 1-11, 2015.

[3] Limooei, M. B. and Hosseini, SH, "Optimization of properties and structure with addition of titanium in hadfield steels", Proc. Conf. of Metal 2012, Czech Republic, Vol. 1, pp. 1-6, 2012.

[4] Najafabadi, V.N., Amini, K. and Alamdarlo, M.B., "Investigating the effect of titanium addition on the wear resistance of Hadfield steel", Metallurgical Research & Technology, Vol. 111, 2014, pp. 375- 382.

[۵] نجف آبادی، و.، مناجاتی زاده، ح. و امینی، ک.، "بررسی تأثیر تیتانیم بر بهبود خـواص فـولاد هادفیلـد ASTM A128-C"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال هفتم، شماره اول، ص ۴۵ – ۵۴، بهار ۱۳۹۲.

[6] Srivastava, A.K. and et al., "Corrosion Behaviour of TiC-Reinforced Hadfield Manganese Austenitic Steel Matrix In-Situ Composites", Open Journal of Metal, Vol. 5, pp. 11-17, 2015.

[۷] خیاط، م.، خیراندیش، ش.، عباسی، م.، "تاثیر آلومینیم بر ریزساختار فولاد آستنیتی منگنـزی هادفیلـد در شـرایط مختلـف عملیات حرارتی"، مجموعه مقالات دومین همایش بین المللی و هفتمین همایش مـشترک انجمـن مهندسـی متـالورژی ایران و انجمن ریخته گری ایران، سمنان، ص. ۵-۱، ۱۳۹۲.

[8] Tian, X. and Zhang, Y., "Mechanism on the Effect of Al upon the γ→ε Martensite Transformation in the Fe-Mn Alloys", J. Mater. Sci. Technol., Vol. 12, pp. 369-372, 1996.

[9] Phiu-on, K. and et al., "Effects of Solution Treatment and Test Temperature on Tensile Properties of High Mn Austenitic Steels", steel research international, Vol. 80, No. 1, pp. 29-38, 2009.

[۱۰] رواندوست، م.، نقوی، م. و شاعری، م.ح.، "بررسی اثر کوئنچ مستقیم بر ریز ساختار فـولاد منگنـزی هادفیلـد"، مجموعـه مقالات یازدهمین کنگره سالانه انجمن مهندسین متالورژی ایران، اصفهان، ص۹-۱، ۱۳۸۶.

[۱۱] حسینی، ش.، لیمویی، م. ب.، ابراهیمی قایی ا. و عرب، ن.، "تأثیر ترکیب محلول کوئنچ بر میزان حجم کاربید، مـاکرو و میکـرو سختی فولادهای منگنزی هادفیلد"، نشریه علمی، فنی و تخصصی چدن و فولاد، شماره ۱، ص ۲۵- ۲۱، آذر ۱۳۹۰.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.2.5]

[12] Hosseini, SH., Limooei, M.B., Hossein Zade, M., Askarnia, E. and Asadi, Z., "Optimization of Heat Treatment Due toAustenising Temperature, Time and Quenching Solution in Hadfield Steels", World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol.7, 2013, pp. 1940-1943.
[13] Hosseini, SH. and Limooei, M.B., "Optimization of Heat Treatment to Obtain Desired Mechanical Properties of High Carbon Hadfield Steels", World Appl. Sci. J., Vol. 15, pp. 1421-1424, 2011.
[۱۴] مهری، م.، رواندوست، م. و صالحی، ع. ح.، "بررسی اثر افزودن فرو بور بر ریز ساختار فولاد منگنزی هادفیلد"، مجموعه مقالات یازدهمین کنگره‌ی سالانه‌ی انجمن مهندسین متالورژی ایران، اصفهان، ص۸-۱، ۱۳۸۶.
[15] Moghaddam, E.G., Varahram, N. and Davami, P., "On the comparison of microstructural character -istics and mechanical properties of high-vanadium austenitic manganese steels with the Hadfield steel", Mate. Sci. and Eng. A, Vol. 532, pp. 260-266, 2011.
[16] Agunsoye, J.O., Isaac, T. S. and Abiona, A.A., "On the Comparison of Microstructure Characteristics and Mechanical Properties of High Chromium White Iron with the Hadfield Austenitic Manganese Steel", JMMCE, Vol. 1, pp. 24-28, 2013.
[17] Lindroos, M. and et al., "The Deformation, Strain Hardening, and Wear Behavior of Chromium-Alloyed Hadfield Steel in Abrasive and Impact Conditions", Tribology Letters, Vol. 57, No. 24, pp. 1-11, 2015.
[18] El-Mahallawi, I., Abdel-karim, R. and Naguib, A, "Evaluation of effect of chromium on wear performance of high manganese steel", J. Mater. Sci. Technol., Vol. 17, No. 11, pp. 1385-1390, 2001.
[19] Tani, K., Ueda, Y. and Mori, S., "Interfacial Reaction Between Cast Steel and Olivins and or Silica Sand", Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 27, No.3, pp. 197-204, 1987.
[۲۰] جان، ک، ریخته‌گری پیشرفته، بوترابی، م. ع. و بالی، ص. (مترجم)، جلد اول، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ۱۳۸۰.
[۲۱] فتحی، م. ح.، مواد قالب‌گیری برای ریخته‌گری فلزات، چاپ پنجم، انتشارات ارکان، ۱۳۸۳.
[22] Annual book of ASTM A-128 Standards, "ASTM 128 A / 128 M, Standard specification for steel castings, austenitic manganese", ASTM Int., Vol. 01.02, 2012.
[23] Annual book of ASTM E92-82 Standards, "Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials", ASTM Int.,pp. 1-9, 2003.
[24] Annual book of ASTM A370 Standards, "ASTM A370-14, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products", ASTM Int., Vol. 20-29, 2014.
[25] Lee, Y. K. and Choi, C.S., "Driving Force for γ→ε Martensitic Transformation and Stacking Fault Energy of γ in Fe-Mn Binary System", Metallurgical and Material Transaction A, Vol. 31A, pp. 355-360, 2000.
[۲۶] منشی، ا. و مرادی، ر.، "انجماد فلزات"، چاپ سوم، نشر ارکان اصفهان، اصفهان، ۱۳۸۸.
[27] Astaf'ev, A.A., "Effect of Grain Size on the Properties of Manganese Austenite Steel 110G13L", Metal Sci. Heat Treatment, Vol. 39, No.5, pp.198-201, 1997.
[۲۸] سبزی، م.، منشی، ا. و پوربشارتی، آ.، "بررسی تأثیر نوع ماسه قالب‌گیری بر مقاومت خوردگی فولاد هادفیلد ۱۲۸- ASTM A"، شانزدهمین کنگره ملی خوردگی، پژوهشگاه صنعت نفت، آذر ۱۳۹۴.
[۲۹] دیتر، ج.، "متالورژی مکانیکی"، شهیدی، ش. (مترجم)، چاپ پنجم، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، ۱۳۹۲.
[30] ASM Handbook 1th, "Surface Engineering", Vol. 5, pp. 1354-1357, 2005.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.2.5]