

بررسی تأثیر تیتانیوم بر بهبود خواص فولاد هادفیلد ASTM A128-C

وحید نعمتی نجف آبادی^{۱*}، حسین مناجاتی زاده^۲، کامران امینی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، نجف آباد، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، نجف آباد، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، اصفهان، ایران

*nemativahid@ymail.com

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۷/۲۳، تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۰۴)

چکیده

در این پژوهش به منظور بررسی اثر تیتانیوم بر روی ریزساختار و خواص فولاد هادفیلد، ۴ آلیاژ با ترکیب شیمیایی پایه حاوی ۱/۲ درصد کربن، ۱۲ درصد منگنز و درصدهای مختلفی از تیتانیوم (۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶) و یک نمونه بدون تیتانیوم برای مقایسه ریخته‌گری شدند. نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی انحلالی شامل آستنیت کردن در دمای ۱۱۰۰°C به مدت سه ساعت و سپس کوئنچ در آب، قرار گرفتند. برای بررسی ریز ساختار از میکروسکوپ‌های نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و برای تعیین نوع کاربیدها از آنالیز عنصری (EDX) کمک گرفته شد. برای آزمون سایش نیز از روش پین روی دیسک استفاده گردید. نتایج و مشاهدات حاصل از آزمایشات نشان داد که بعد از عملیات حرارتی، ساختاری کاملاً آستنیتی (در نمونه بدون تیتانیوم) و زمینه آستنیتی به همراه کاربیدهای غیر پیوسته تیتانیوم (در نمونه‌های تیتانیوم دار) حاصل گردید. هم‌چنین با افزایش تیتانیوم، ساختار ریزدانه و سختی افزایش پیدا کرده است. علاوه بر این تفاوت زیادی در مقاومت به سایش نمونه‌های تیتانیوم دار و بدون تیتانیوم حاصل شده و بهترین مقاومت به سایش مربوط به نمونه حاوی ۰/۶ درصد تیتانیوم می‌باشد.

واژه‌های کلیدی:

فولاد هادفیلد، کاربید تیتانیوم، خواص مکانیکی، مقاومت به سایش.

۱- مقدمه

می‌شود. بیشترین کاربرد این فولاد در شرایط سایش همراه با ضربه است. استفاده در وسایل حفاری، چکش‌های خرد کننده سنگ، آسیاب‌ها و ناخن‌های بیل مکانیکی، نمونه‌هایی از کاربردهای گسترده این فولاد است [۱-۲]. عملیات حرارتی متداول بر روی این فولاد، شامل آنیل انحلالی یا آستنیت کردن در دمای ۹۵۰-۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و تندسرمایی در آب

فولاد آستنیتی منگنزی شامل ۱ تا ۱/۲٪ کربن و ۱۲ تا ۱۴٪ منگنز توسط روبرت هادفیلد در سال ۱۸۸۲ اختراع شد. فولاد هادفیلد فولادی است که ترکیبی مناسب از چقرمگی زیاد را همراه با کارسختی بالا دارا بوده و مقاومت بالایی در برابر سایش دارد. امروزه با اصلاحات کوچکی در ترکیب شیمیایی و یا عملیات حرارتی آن، به‌طور گسترده‌ای در زمینه‌های گوناگون استفاده

شرکت صنایع ریخته‌گری اصفهان توسط قراضه، برگشتی‌ها از جنس فولاد هادفیلد و فرو آلیاژ تهیه گردید. سپس جهت ایجاد شرایط یکسان ذوب ریزی، دما به وسیله دستگاه پیرومتر کنترل و دما در زمان ریخته‌گری °C ۱۴۵۰-۱۴۰۰ درجه بود. ۴ عدد Y بلوک طبق استاندارد ASTM E370 ریخته‌گری شد. Y بلوک اول بدون تیتانیوم و به سه Y بلوک بعدی فرو تیتانیوم افزوده شد. ترکیب شیمیایی با استفاده از دستگاه Fundry master2005 مطابق استاندارد ASTM E415 کنترل گردید که نتایج آن در جدول (۱) آمده است. پس از انجماد و سرد شدن، Y بلوک‌ها از داخل قالب تخلیه شد. عملیات حرارتی در دمای °C ۱۱۰۰ به مدت سه ساعت انجام و سپس کوئنچ در آب انجام گردید. تصاویر میکروسکوپ نوری با توجه به استاندارد ASTM E883 و به وسیله میکروسکوپ Olympus مدل PME3 تهیه شد. سختی سنجی به تعداد ۶ بار برای هر یک از نمونه‌های عملیات حرارتی شده طبق استاندارد ASTM E18-03 با معیار راکول C توسط دستگاه سختی سنج راکول ساخت کشور روسیه انجام و سختی میانگین گزارش شد. برای بررسی کاربیدها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA//TESCAN-LMU و هم‌چنین آنالیز نقطه‌ای (EDX) استفاده گردید. آزمون سایش به روش پین روی دیسک با استفاده از پین از جنس فولاد بلیرینگ با سختی HRC ۶۴ و دیسک به قطر ۵cm در دمای محیط انجام گردید.

جدول (۱): آنالیز ذوب ریخته‌گری شده بر اساس استاندارد ASTM A128 (درصد وزنی)

	ASTM A128	A	B	C	D
%C	۱/۰۵-۱/۳۵	۱/۱۹	۱/۱۵	۱/۱۴	۱/۲۳
%Mn	۱۱/۵-۱۴	۱۲/۴	۱۲/۲	۱۲/۲	۱۲/۴
%Si	۱max	۰/۴۷	۰/۵۳	۰/۵۳	۰/۶۶
%Cr	۱/۵-۲/۵	۱/۳۴	۱/۳۶	۱/۳۸	۱/۴۵
%S	۰/۰۳max	۰/۰۰۷	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	۰/۰۳۶
%P	۰/۰۷max	۰/۰۳۲	۰/۰۲۵	۰/۰۳۲	۰/۰۴۷
%Ti	-	-	۰/۱۷	۰/۴۱	۰/۵۶

است که حاصل، ساختاری آستنیتی بدون کاربید می‌باشد [۱]. ضعف اصلی این ساختار مقاومت به سایش کم در شرایط سایش لغزشی آرام است [۳]. طی چند دهه اخیر تحقیقات گسترده‌ای در مورد این فولاد صورت گرفته است که از جمله می‌توان به بالا بردن تنش تسلیم، افزایش مقاومت در مقابل سایش، بهبود خواص ماشین‌کاری، ریز دانه کردن و اصلاح ساختار اشاره کرد. در این میان دستیابی به ساختار ریز دانه و همگن و نتایج حاصل از آن بر خواص مکانیکی همواره مورد توجه محققان مختلف قرار گرفته است. گزارش شده است که استفاده از عناصری نظیر بور، تیتانیوم و وانادیم در این نوع فولاد بعنوان جوانه زا می‌تواند ضمن کاهش اندازه دانه‌ها، مقاومت سایشی آن را نیز افزایش دهد [۴]. هافر با بررسی سه نوع فولاد آستنیتی منگنزدار با درصد‌های ۱۲، ۱۶ و ۲۲ درصد منگنز نشان داد که فولاد حاوی ۲۲ درصد منگنز استحکام تسلیم بالاتری را نشان می‌دهد و از طرفی نیز فولاد با ۱۶ درصد منگنز رفتار کارپذیری بهتری را نسبت به فولاد با ۱۲ درصد منگنز دارد [۵]. استفاده از کرم نیز در درصد‌های مختلف باعث افزایش استحکام تسلیم و بدست آمدن یک زمینه سخت آستنیتی می‌شود [۲-۶]. هم‌چنین Srivastava نشان داد که می‌توان با تشکیل کامپوزیتی متشکل از فولاد هادفیلد و کاربیدهای تیتانیوم، نسبت به بهبود خواص این فولاد از جمله افزایش سختی و مقاومت به سایش اقدام نمود [۷]. هدف از تحقیق حاضر بررسی اثر افزودن تیتانیوم بر بهبود خواص فولاد هادفیلد است. با توجه به اینکه تحقیقات انجام گرفته توسط محققان بیشتر با تیتانیوم بالاتر از ۱۰ درصد بوده (که از نظر اقتصادی قابل توجهی نمی‌باشد) لذا در این پژوهش مقدار تیتانیوم از ۰/۲ تا ۰/۶ درصد اضافه و اثرات آن بر ریز ساختار و خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

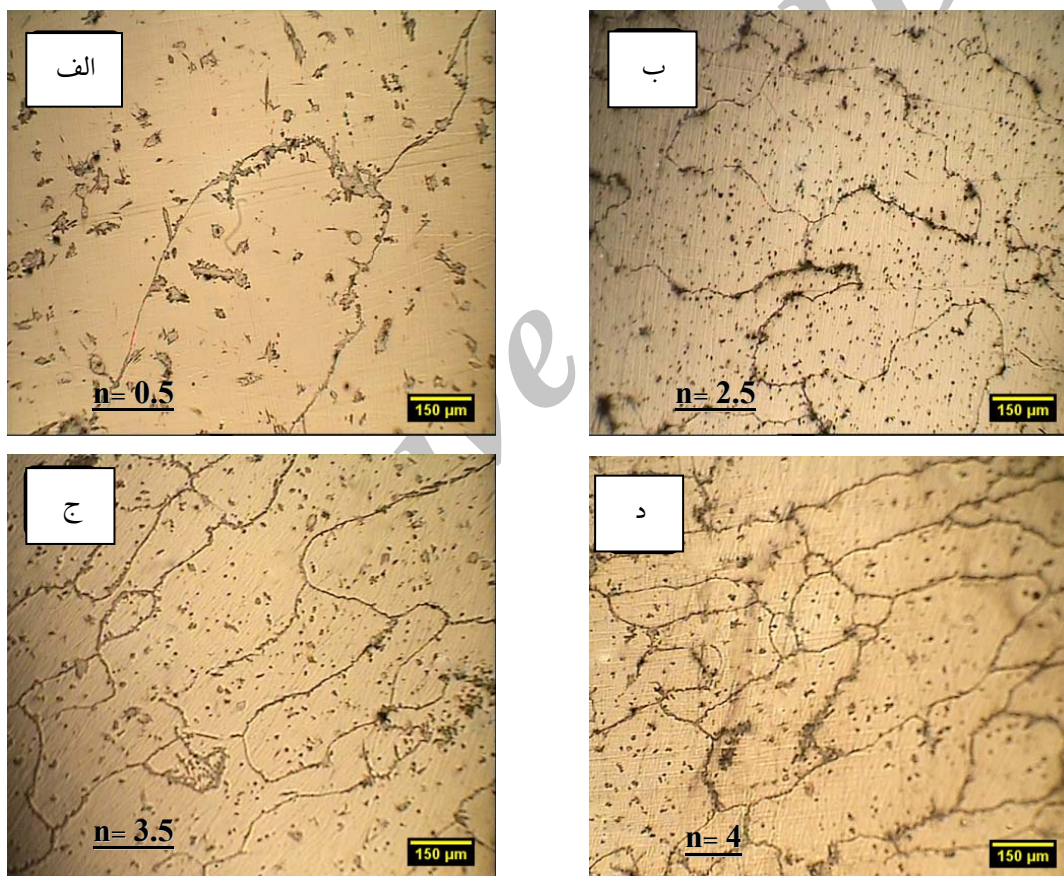
در این تحقیق برای تهیه نمونه‌های از جنس فولاد هادفیلد مطابق با استاندارد ASTM A128 استفاده شد. مذاب مورد نیاز به وسیله کوره القایی فرکانس شبکه با ظرفیت ۸۰۰ کیلوگرم

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریز ساختار

شکل (۱) ریز ساختار چهار نمونه را قبل از عملیات حرارتی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزودن تیتانیوم دانه‌های ریزتری حاصل شده است. دلیل این امر خاصیت جوانه زایی و ریزکنندگی تیتانیوم است، ضمن اینکه تیتانیوم با ترکیب شدن با کربن و تشکیل کاربید تیتانیوم باعث قفل شدن و عدم حرکت مرزدانه‌ها و در نهایت ریز دانه شدن ساختار می‌شود.

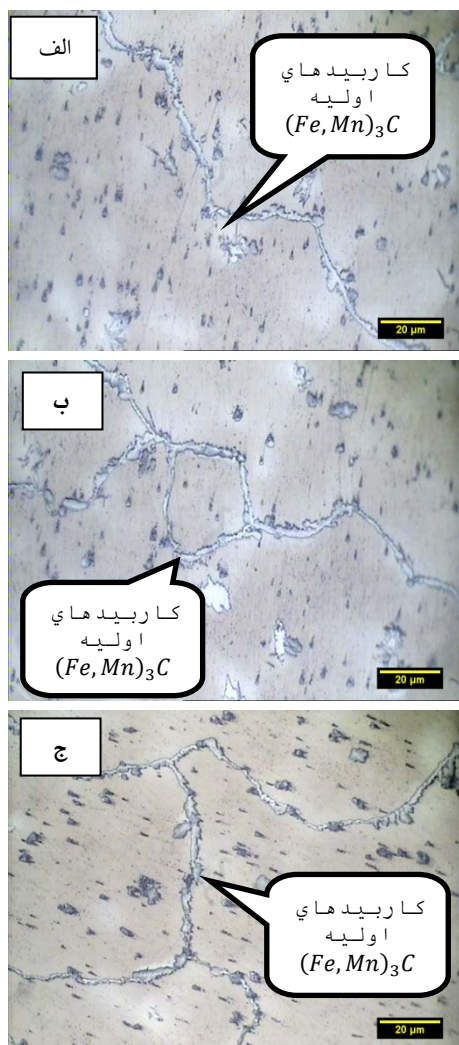
عدد اندازه دانه (n) توسط روش خطی محاسبه و بر روی تصاویر ارائه شده است. هر چه میزان کربن و تیتانیوم بیشتر باشد ذرات کاربیدی ایجاد شده نیز افزایش یافته و در نتیجه ساختار ریزدانه‌تر می‌شود. البته شامل زمینه آستنیتی با کاربیدهای درشت اولیه $(Fe, Mn)_3C$ در مرز دانه‌ها می‌باشد که این کاربیدها به صورت پیوسته می‌باشند و تأثیر منفی بر خواص مکانیکی فولاد دارند و در نمونه‌های حاوی تیتانیوم، TiC علاوه بر داخل دانه‌ها مقداری هم داخل کاربیدهای اولیه تشکیل شده است.



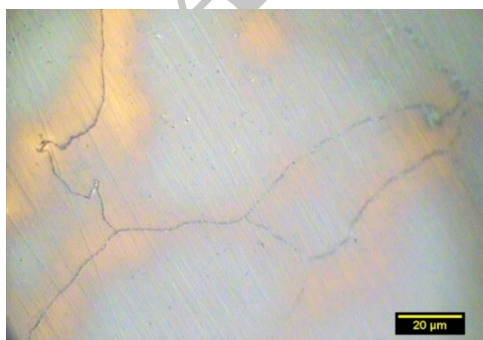
شکل (۱): ریزساختار متالوگرافی نمونه‌های ریخته‌گری در بزرگنمایی $100\times$: الف) نمونه بدون تیتانیوم، ب) نمونه ۰/۲ درصد تیتانیوم دار، ج) نمونه ۰/۴ درصد تیتانیوم دار و د) نمونه ۰/۶ درصد تیتانیوم دار

و سریعاً مرزدانه‌ها را احاطه می‌کنند و چقرمگی ضربه را کاهش می‌دهند [۸-۹]. برای حذف کاربیدهای پیوسته در مرزدانه انجام عملیات حرارتی آستنیت‌زد کردن امری ضروری است. برای بهتر

در شکل (۲) آنالیز عنصری EDX از نمونه بدون تیتانیوم نشان می‌دهد که کاربیدهای پیوسته مرزدانه‌ها $(Fe, Mn)_3C$ می‌باشند. این کاربیدهای درشت اولیه در مرز دانه‌ها تشکیل شده

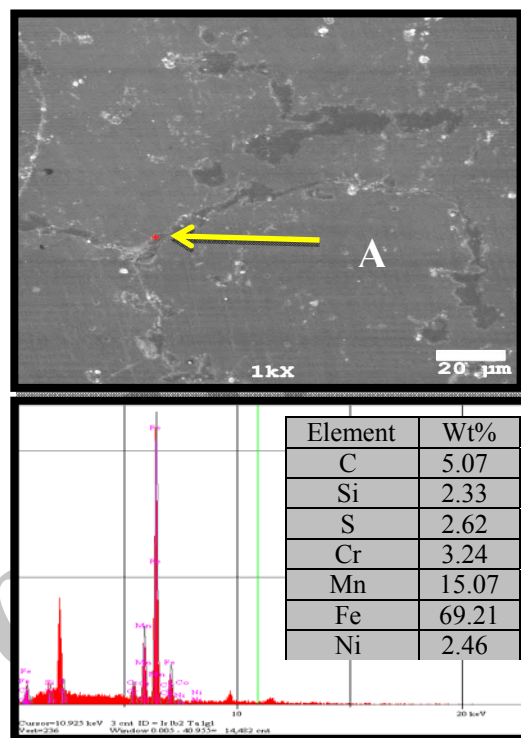


شکل (۳): ریزساختار متالوگرافی نمونه‌های ریخته‌گری در بزرگنمایی ۴۰۰X (الف) نمونه ۲/۰ درصد



شکل (۴): ریزساختار متالوگرافی نمونه بدون تیتانیوم بعد از عملیات حرارتی در بزرگنمایی ۴۰۰X.

مشخص شدن ساختار فولاد خصوصاً کاربیدها، تصاویر متالوگرافی با بزرگنمایی ۴۰۰ در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل (۲): آنالیز عنصری EDX از نقطه A برای نمونه بدون تیتانیوم.

بعد از انجام عملیات حرارتی شامل آستنیت‌زدن در دمای ۱۱۰۰ °C، نگهداری به مدت سه ساعت و سپس کوئنچ در آب از نمونه‌ها در بزرگنمایی‌های مختلف تصاویر متالوگرافی تهیه که در ادامه ارائه می‌شود.

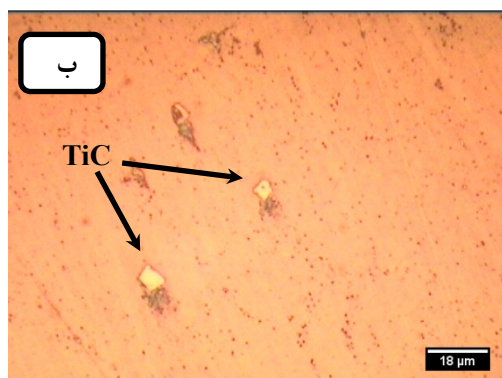
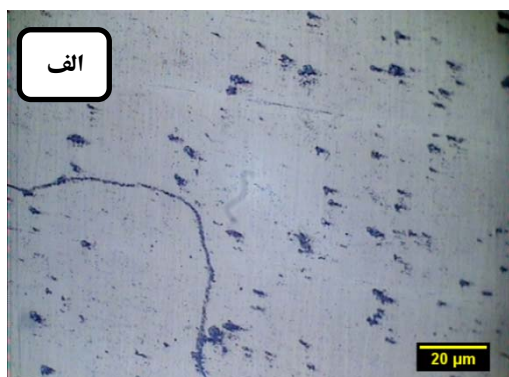
به دلیل اینکه بعد از عملیات حرارتی نمونه بدون تیتانیوم کاملاً آستنیت‌زدن می‌شود و کاربیدی در ساختار وجود ندارد تصویر متالوگرافی فقط در بزرگنمایی ۴۰۰ ارائه شده است (شکل ۴). ولی در نمونه‌های حاوی تیتانیوم به دلیل تشکیل کاربید و بررسی بهتر کاربیدها، تصاویر در دو بزرگنمایی ۲۰۰ و ۱۰۰۰ ارائه شده است. شکل‌های (۵) تا (۷) ریز ساختار نمونه‌ها را بعد از عملیات حرارتی نشان می‌دهد.

برای اطمینان از اینکه کاربیدهای باقیمانده در ریز ساختار کاربیدهای تیتانیوم هستند، بر روی نمونه‌ها آنالیز EDX انجام گردید که در شکل (۸) قابل مشاهده می‌باشد.

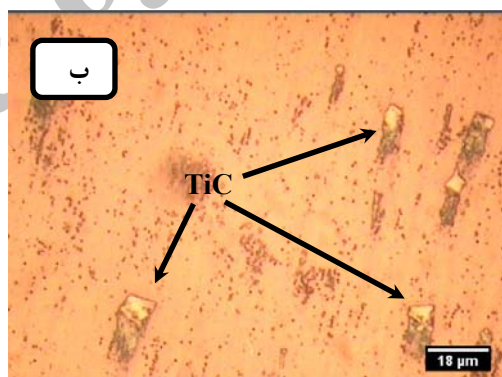
این کاربیدها برخلاف کاربیدهای نوع پیوسته بدلیل عدم پیوستگی و توزیع یکنواخت در ساختار باعث بهبود خواص مکانیکی فولاد از جمله سختی و مقاومت سایشی می‌شوند.

همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است در نمونه بدون تیتانیوم بعد از عملیات حرارتی ساختاری کاملاً آستنیته بدون حضور کاربید حاصل می‌شود.

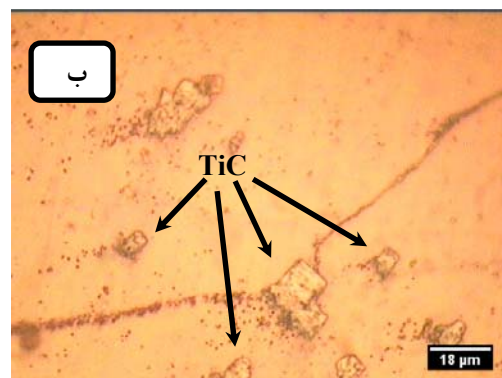
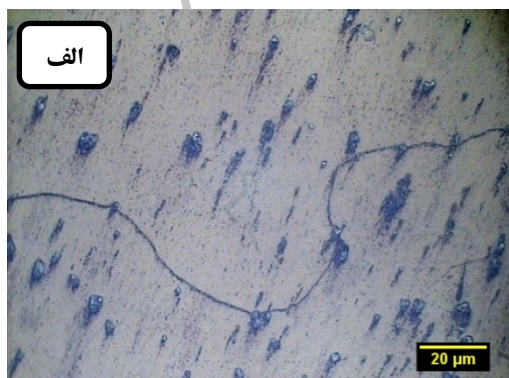
در نمونه‌های حاوی تیتانیوم نیز همانند نمونه بدون تیتانیوم، کاربیدهای پیوسته حذف اما بدلیل حضور تیتانیوم در ترکیب فولاد، کاربیدهای ریز TiC در ساختار مشاهده می‌گردد.



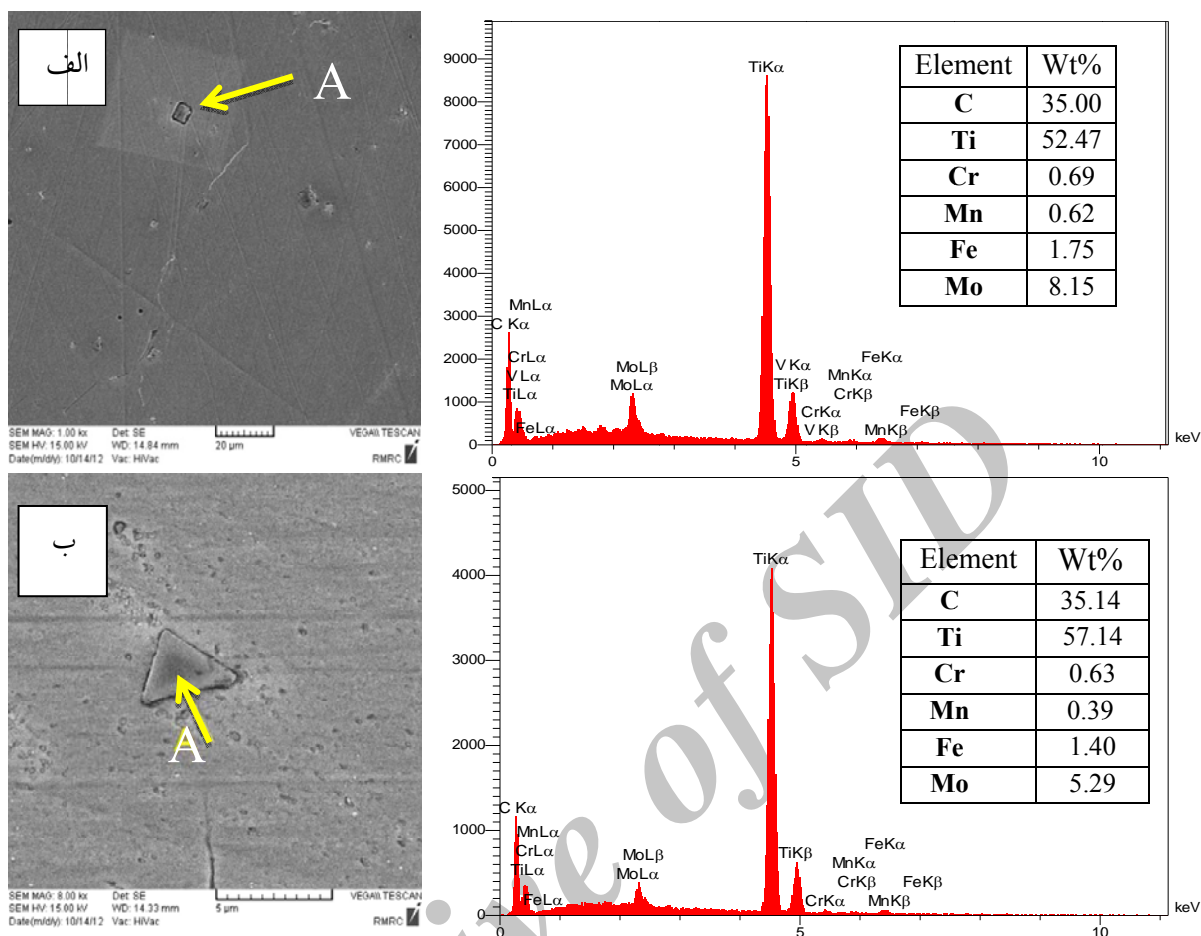
شکل (۵): ریزساختار متالوگرافی نمونه ۰/۲ درصد تیتانیوم بعد از عملیات حرارتی: الف) ۲۰۰X و ب) ۱۰۰۰X.



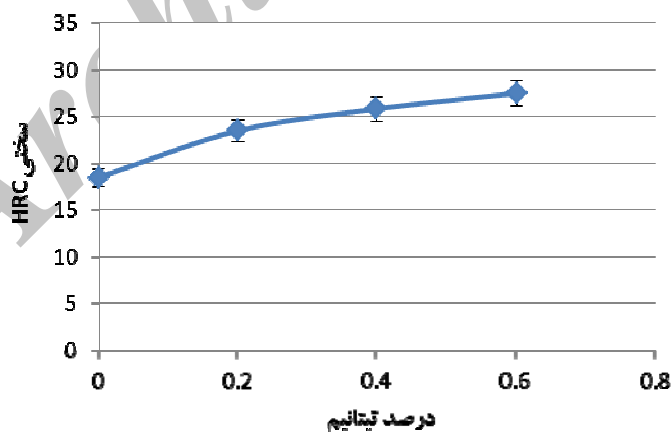
شکل (۶): ریزساختار متالوگرافی نمونه ۰/۴ درصد تیتانیوم بعد از عملیات حرارتی: الف) ۲۰۰X و ب) ۱۰۰۰X.



شکل (۷): ریزساختار متالوگرافی نمونه ۰/۶ درصد تیتانیوم بعد از عملیات حرارتی: الف) ۲۰۰X و ب) ۱۰۰۰X.



شکل (۸): آنالیز عنصری EDX از نقطه A برای نمونه: الف) ۰/۲ درصد تیتانیوم و ب) ۰/۴ درصد تیتانیوم.



شکل (۹): تغییرات سختی با درصد تیتانیوم.

افزایش تیتانیوم ایجاد کاربیدهای پایدار و سخت TiC می کند و همین امر علت بالا رفتن سختی می شود. نتایج بدست آمده تطابق خوبی با نتایج Andreussi و همکاران دارد [۱۰].

۲-۳- بررسی سختی

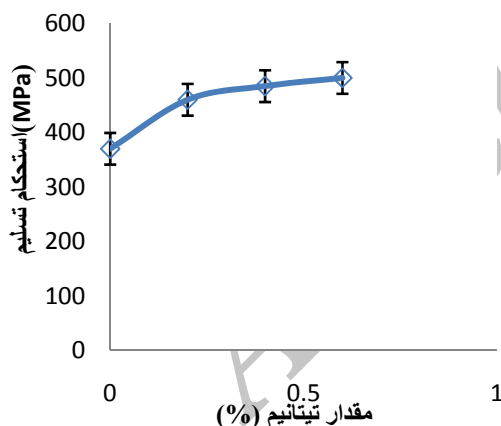
نتایج سختی سنجی در شکل (۹) ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می شود با افزایش تیتانیوم سختی افزایش می یابد. زیرا

۳-۳-۲- استحکام تسلیم

شکل (۱۱) نشان دهنده افزایش استحکام تسلیم با افزایش تیتانیوم می‌باشد. TiC باعث افزایش استحکام تسلیم می‌شود [۴]. از طرفی همان‌طوریکه در قسمت ۳-۱ توضیح داده شد با افزایش تیتانیوم اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد و با کاهش اندازه دانه استحکام تسلیم نیز افزایش می‌یابد [۱۲]. علاوه بر این با استفاده از معادله هال-پیچ (معادله ۱) که ارتباط بین اندازه دانه و تنش تسلیم را بیان می‌کند می‌توان این روند افزایش تنش تسلیم را توجیه کرد:

$$\sigma_0 = \sigma_i + \frac{K}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

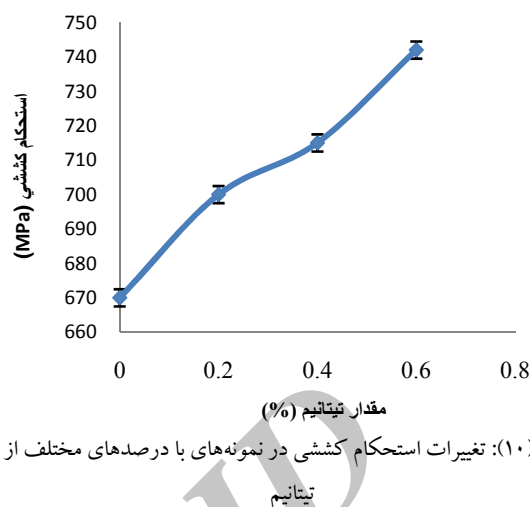
در رابطه فوق σ_0 تنش تسلیم، σ_i تنش اصطکاکی مخالف با حرکت نابجایی‌ها، K یک ثابت است که میزان تجمع نابجایی‌ها را در پشت موانع مشخص می‌کند و D قطر متوسط دانه است. طبق رابطه فوق با کاهش اندازه دانه، تنش تسلیم افزایش می‌یابد.



شکل (۱۱): تغییرات استحکام تسلیم در نمونه‌های با درصد‌های مختلف از تیتانیوم

۳-۳-۳- انعطاف پذیری

نتایج انعطاف پذیری حاصل از آزمون کشش در شکل (۱۲) ارائه شده است. همان‌طوری که در شکل مشاهده می‌گردد افزایش تیتانیوم باعث کاهش ازدیاد طول نسبی فولاد هادفیلد می‌شود.



شکل (۱۰): تغییرات استحکام کششی در نمونه‌های با درصد‌های مختلف از تیتانیوم

۳-۳-۳- نتایج آزمون کشش

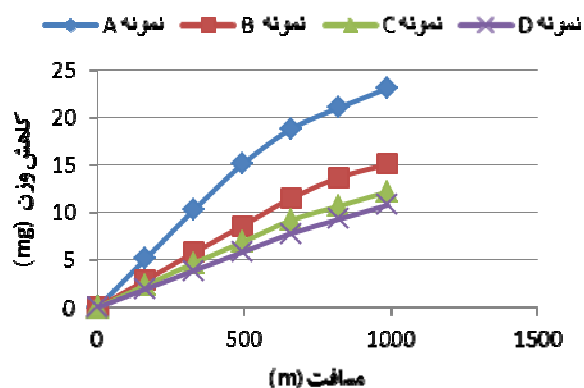
از آزمون کشش می‌توان اطلاعاتی هم‌چون استحکام کششی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول نسبی را بدست آورد. در ادامه تغییرات هر یک از این پارامترها برای نمونه‌های تیتانیوم دار و بدون تیتانیوم ارائه شده است.

۳-۳-۱- استحکام کششی

همان‌طوریکه از شکل (۱۰) مشخص است با افزایش تیتانیوم به فولاد هادفیلد، استحکام کششی افزایش می‌یابد. البته این نتیجه مورد انتظار بود زیرا استحکام کششی رابطه مستقیمی با سختی دارد و با افزایش سختی استحکام کششی نیز افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در بحث ۳-۲ ملاحظه گردید با افزایش درصد تیتانیوم، سختی فولاد افزایش می‌یابد در نتیجه افزایش استحکام کششی نیز امری طبیعی است. از طرفی مشاهده شد که با افزودن تیتانیوم فولاد ریز دانه شده و مرزدانه‌ها افزایش می‌یابد و نابجایی‌های متحرک با رسیدن به مرز دانه‌ها تجمع کرده و از حرکت باز می‌مانند، همین امر باعث افزایش استحکام می‌شود [۱۱]. هرچه قدر که درصد کاربیدهای ریز و مجزا بیشتر باشد (نمونه D) افزایش استحکام بیشتر است. نتیجه بدست آمده تطابق خوبی با نتایج Astaf و همکاران دارد که بیان کردند با ریز شدن ساختار فولاد هادفیلد خواص مکانیکی از جمله سختی، استحکام کشش و استحکام تسلیم افزایش می‌یابد [۱۲].

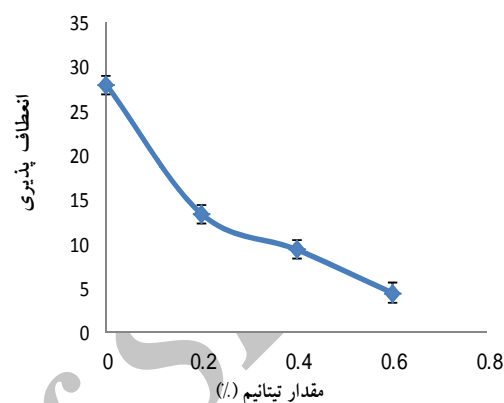
۳-۴- آزمون سایش

نمودار آزمون سایش در شکل (۱۳) ارائه شده است. همان‌طور که از شکل نیز مشخص است با افزایش تیتانیوم مقاومت به سایش افزایش پیدا کرده است زیرا سایش با سختی رابطه مستقیم دارد و با افزودن تیتانیوم، سختی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است.

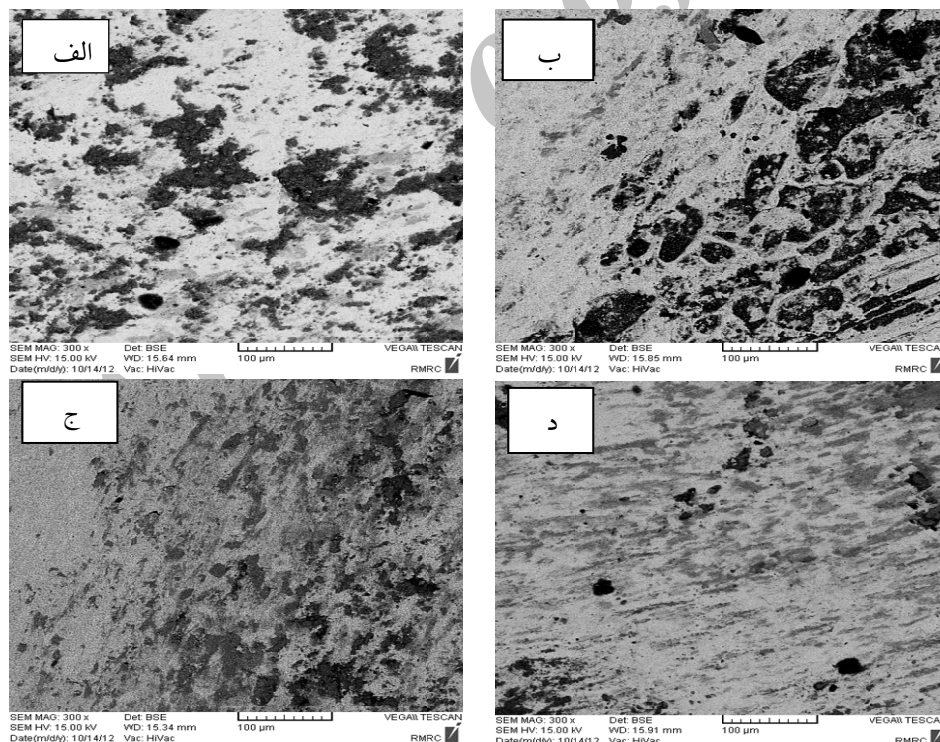


شکل (۱۳): کاهش وزن نمونه‌ها بر حسب مسافت طی شده

علت این کاهش حضور ترکیبات پایدار TiC می‌باشد و افزایش این کاربیدها باعث کاهش کلی انعطاف پذیری می‌شود [۴]. حضور این کاربیدها در تصاویر متالوگرافی به خوبی قابل مشاهده است.



شکل (۱۲): تغییرات انعطاف پذیری در نمونه‌های با درصد مختلف از تیتانیوم



شکل (۱۴): تصاویر SEM از سطح سایش: الف) نمونه بدون حاوی تیتانیوم، ب) نمونه حاوی ۰/۲ درصد تیتانیوم،

ج) نمونه حاوی ۰/۴ درصد تیتانیوم و د) نمونه ۰/۶ درصد تیتانیوم دار

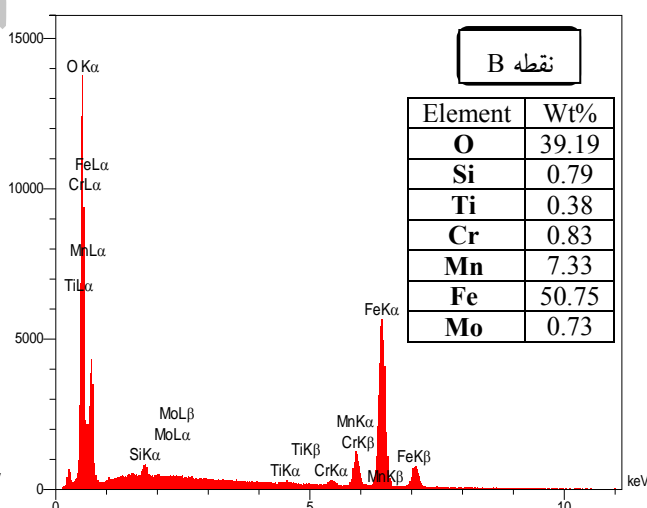
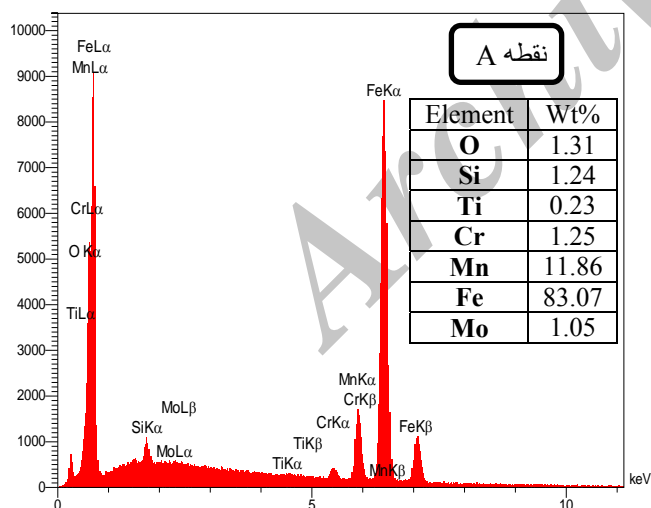
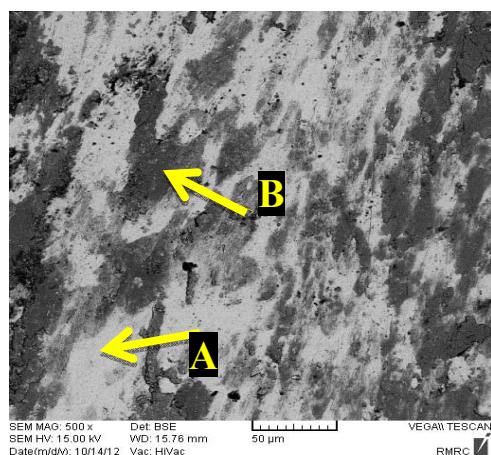
نیروهای وارد از شیار که در زمینه فولادی ایجاد کرده اند خارج شده، از روی کاربید سخت عبور کرده و دوباره بعد از

کاربیدهای سخت به عنوان مانعی در برابر حرکت ساینده عمل نموده و هنگامی که ذرات ساینده به ذرات TiC می‌رسند در اثر

۳-۴-۱- بررسی سطوح سایش و تعیین مکانیزم سایش:

برای تعیین مکانیزم سایش، نمونه‌ها بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی تحت بررسی قرار گرفتند. همان‌طوریکه از شکل (۱۴) مشخص است مکانیزم غالب در سایش نمونه‌ها چسبان است. بررسی نواحی چسبان و منطقه سالم مجاور آن در نمونه حاوی ۰/۶٪ تیتانیوم بوسیله EDX نشان داد که در نواحی چسبان سایش اکسیدی نیز رخ داده است (شکل ۱۵). بنابراین مکانیزم سایش در این نمونه، چسبان و تریوشیمیایی است.

عبور از روی آن، در امتداد شیار قبلی در زمینه، شیار ایجاد می‌کند. میزان تأثیر فاز تقویت کننده به مقدار آن در زمینه بستگی دارد یعنی هرچه قدر که میزان ذرات کاربید تیتانیوم در زمینه بیشتر باشد مقاومت به سایش بالاتر است [۱۳]. با افزایش تیتانیوم، کسر حجمی ذرات کاربید تیتانیوم افزایش یافته و در نتیجه باعث مقاومت بیشتر در برابر جسم ساینده می‌شود. از این رو در نمونه D که بیشترین درصد تیتانیوم را دارد مقاومت به سایش نسبت به سه نمونه دیگر بالاتر است.



شکل (۱۵): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز عنصری EDX از سطح سایش نمونه حاوی ۰/۶ درصد تیتانیوم

۴- نتیجه گیری

۱- Ti می‌گردد.
۲- نمونه ۰/۶ درصد تیتانیوم دارای بالاترین استحکام کششی و تسلیم و کمترین انعطاف پذیری می‌باشد.

۱- با افزایش تیتانیوم اندازه دانه‌ها ریز و سختی افزایش می‌یابد. این عوامل باعث بهبود مقاومت سایشی فولاد با افزایش درصد

- [5] S. Hofer, M. Hartl and G. Schestak, " Comparison of Austenitic High-Mn-Steels with Different Mn- and C-Contents Regarding their Processing Properties", BMH, Vol. 156(3), pp. 99-104. 2011
- [6] A. Andreussi, P. Andreussi, E. Veneroso and E. Pontelli, "Method To Obtain Manganese Steel Alloy", united states patent, No. 11. 2077.
- [7] A. K. Srivastava and K. Das, " In-situ Synthesis and Characterization of TiC-Reinforced Hadfield Manganese Austenitic Steel Matrix Composite", ISIJ International, Vol.49, No.9, pp.1372-1377, 2009
- [8] W. H. Jiang, W. D. Pan, Y. L. Ren and X. L. Han, " In-situ Formation of TiC/Hadfield Steel Composites", Journal of Materials Science Letters, Vol.17, pp.1527-1529, 1998.
- [9] ASM Handbook, Vol. 9, Metallography and Microstructures, "Austenitic Manganese Steel Castings", pp. 1666-1687, 2004.
- [10] A. Andreussi, P. Andreussi, E. Veneroso, E. Pontelli, "Method To Obtain Manganese Steel Alloy", united states patent, No. 11,2007.
- [11] P. Rama Rao, V. V. Kutumbarao, "Developments in Austenitic Steels Containing Manganese", International Materials Eviews, Vol.34, pp.69-74, 1989.
- [12] A. A. Astaf'ev, " Effect of Grain Size on the Properties of Manganese Austenite Steel 110G13L", Metal Science and Heat Treatment, Vol. 39, No.5, pp.198-201, 1997.

[۱۳] ر. محمد رضا، " رفتار سایشی کامپوزیت‌های با زمینه چدن و فولاد"، مجله علوم و مهندسی سطح، شماره ۹، ۵۳-۴۳، ۱۳۸۹.

۳- با توجه به تفاوت کم نمودار سایش نمونه‌های تیتانیم دار و کاهش شدید انعطاف پذیری با افزایش تیتانیم، نمونه ۰/۲ درصد تیتانیم بعنوان نمونه بهینه معرفی می‌گردد.

۴- مکانیزم غالب سایش در نمونه‌ها، سایش چسبان و تریوشیمیایی است.

۵- تشکر و قدرانی

به این وسیله از آقایان مهندس ناصری مدیریت محترم شرکت صنایع ریخته‌گری اصفهان به خاطر راهنمایی‌ها و همکاری بی دریغشان تشکر و قدردانی می‌نمایم.

۶- مراجع

[1] Metals handbook, 10th ed, Vol.1, ASM, Metals Park, OH 44073, pp. 822-849. 2005.

[۲] م. مرعشی، متالورژی کاربردی فولادها (۱)، چاپ اول، شرکت نورد و تولید قطعات فولادی، ایران، ۱۳۷۳.

[۳] م. عباسی، ش. خیراندیش، ی. خرازی و جلال حجازی، "بررسی تاثیر برخی عوامل اصلی بر رفتار سایشی فولاد هافیلد، مجله علوم و مهندسی سطح ایران، شماره ۷، ص. ۶۹-۷۴، ۱۳۸۷.

[4] ASM Handbook 1th, Vol 5, Surface Engineering, pp. 1354-1357, 2005.