

ارزیابی تأثیر آلومینیوم بر تغییرات ریزساختاری، خواص مکانیکی و عمر خستگی فولاد هایپر یوکتوئید هادفیلد

مسعود سبزی*

مریی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران

زهره بلک

استادیار، گروه مواد و متالورژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران

چکیده

در این پژوهش به بررسی تأثیر عنصر آلیاژی آلومینیوم بر تغییرات ریزساختاری، خواص مکانیکی و عمر خستگی فولاد هادفیلد پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا دو بلوک از فولاد هادفیلد (بدون آلومینیوم و حاوی ۱/۶۸ درصد وزنی آلومینیوم) بوسیله ی کوره القایی تهیه شد. پس از ریخته گری، هر دو بلوک تحت عملیات حرارتی آستنیتیزه کردن در دمای ۱۱۰۰°C به مدت ۲ ساعت قرار گرفته و بلافاصله در آب خالص سریع سرد شدند. در مرحله ی بعد، آزمون های کشش تک محوره، خستگی خمشی و سختی سنجی به روش ویکرز بر روی نمونه ها انجام شد. برای بررسی ریزساختار از متالوگرافی و برای بررسی سطوح شکست از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده گردید. در نتیجه معلوم شد که نمونه ی حاوی ۱/۶۸ درصد وزنی آلومینیوم سختی و استحکام تسلیم بیشتر، و در عوض استحکام کششی، انعطاف پذیری و عمر خستگی کمتری نسبت به نمونه ی بدون آلومینیوم دارد. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی دلالت بر وقوع شکست نرم در آزمایش کشش برای هر دو نمونه و افزایش رشد ترک خستگی در آزمایش خستگی در اثر افزودن آلومینیوم به ترکیب فولاد هادفیلد داشت. **واژه های کلیدی:** فولاد هادفیلد، عمر خستگی، خواص مکانیکی، تغییرات ریزساختاری، آلومینیوم.

Evaluation of Aluminum Effect on the Microstructural changes, Mechanical properties and Fatigue life of Hadfield hypereutectoid Steel

M. Sabzi
Z. Balak

Young Researchers and Elite Club, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran
Department of Materials and Metallurgy, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Abstract

In this study, the effect of aluminum alloying element on the microstructural changes, mechanical properties and fatigue life of Hadfield steel was investigated. For this purpose, 2 blocks castings were prepared from Hadfield steel (without Al and with 1.68 wt% Al addition) by using coreless induction furnace. After the casting, all the blocks were austenitized in 1100°C for 2 hours and immediately quenched in the pure water. In the next step, uniaxial tensile test, bending fatigue test and hardness test by vickers method were conducted on specimens. Microstructure evaluation was conducted by optical metallography and the fractured surfaces were observed by scanning electron microscopy. As a result, it was found that the sample containing 1.68 wt% Al had more hardness and greater yield strength but tensile strength, flexibility and fatigue life of lesser compared to sample without Al addition. So, scanning electron microscopy images indicated the occurrence of ductile fracture in tensile test for both samples and was increased fatigue crack growth in the fatigue test due to the addition of aluminum to chemical composition of Hadfield steel.

Keywords: Hadfield steel, fatigue life, mechanical properties, microstructural changes, Al.

۱- مقدمه

یکی از عناصری که تأثیر آن بر خواص و ریزساختار فولاد هادفیلد مورد توجه قرار گرفته است، عنصر تیتانیوم است. استفاده از عنصر تیتانیوم برای خنثی کردن اثر فسفر مورد توجه قرار گرفته است. این عنصر با ایجاد کاربیدهای پایدار میزان کربن محلول در آستنیت را کاهش داده و در نتیجه خواص مکانیکی فولاد را به میزان زیادی تحت تأثیر قرار می دهد. حضور تیتانیوم باعث بهبود ساختار قطعه پس از انجماد می شود (بدلیل کاربیدزا بودن، ساختار را ریزدانه می کند). با ایجاد مقاومت در برابر تردی (در مقادیر کمتر از ۰/۱ درصد وزنی تیتانیوم) حساسیت نسبت به سیکل عملیات حرارتی در قطعه را کاهش داده و بنابراین قطعه را از خطر ترک برداشتن در طول عملیات حرارتی محافظت می کند [۴ و ۳]. اگرچه این عنصر با ایجاد کاربیدهای پایدار، باعث افزایش سختی و بهبود مقاومت سایشی فولاد هادفیلد شده ولی از طرفی هم با ایجاد کاربیدهای پایدار TiC، باعث کاهش چقرمگی آن

فولاد هادفیلد یک آلیاژ غیرمغناطیسی تشکیل شده از آهن، ۱/۴-۱ درصد وزنی کربن و ۱۴-۱۰ درصد وزنی منگنز می باشد که دارای مقاومت بسیار خوبی در برابر سایش است. اولین فولاد آستنیتی منگنزدار که دارای حدود ۱/۲ درصد وزنی کربن و ۱۲ درصد وزنی منگنز بود، توسط رابرت هادفیلد^۱ در سال ۱۸۸۲ میلادی تهیه شد. فولاد آستنیتی پرمنگنز از دسته فولادهای پرآلیاژ می باشند که معروف ترین آنها به نام فولاد هادفیلد است که بدلیل انعطاف پذیری خوب، کارسختی بالا و مقاومت عالی در برابر سایش کاربردهای گسترده ای در صنایع گوناگون نظیر صنایع سیمان، معدن، راه سازی و راه آهن دارد [۲ و ۱].

1 Robert Hadfield

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mas.metallurg88@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۶/۱۶

می‌شود [۵]. در تحقیقات دیگری اسری و استاوا و داس^۱ [۶]، گزارش نمودند که با طراحی کامپوزیت‌های شامل زمینه‌ای از فولاد هادفیلد و ذرات تقویت کننده‌ی کاربید تیتانیم، می‌توان مقاومت به سایش فولاد هادفیلد را بهبود بخشید. در همین زمینه، اسری و استاوا و همکارانش [۷]، به بررسی تأثیر ذرات کاربید تیتانیم بر رفتار خوردگی کامپوزیت‌های با زمینه فولاد هادفیلد پرداختند. این محققان نشان دادند که با افزایش میزان کاربید تیتانیم، مقاومت خوردگی کامپوزیت مذکور کاهش می‌یابد.

تحقیقات انجام گرفته در راستای بهبود مقاومت سایشی فولاد هادفیلد، نشان داده است افزایش کربن در فولاد هادفیلد، می‌تواند مقاومت به سایش را افزایش دهد. اما افزایش کربن در این فولاد، با مشکل تشکیل بیشتر کاربیدهای منگنز در مرز دانه‌ها همراه است. بنابراین میزان افزایش کربن تا حدی امکانپذیر است که منجر به رسوب این کاربیدها در حین سریع سردی از دمای بالا نشود در همین زمینه خیاط و همکارانش [۸] به بررسی تأثیر آلومینیوم بر خواص و ریزساختار فولاد هادفیلد پرداختند و دریافتند که افزودن آلومینیوم به فولاد هادفیلد، منجر به کاهش کاربیدهای مرز دانه‌ای 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 منگیزی، نیروی محرکه لازم برای انجام استحاله آستنیت به مارتنیت را در این فولادها افزایش داده و از طرفی دمای تشکیل مارتنیت را کاهش می‌دهد [۹].

سبزی و معینی‌فر [۱۰] در تحقیقاتی که بر روی تأثیر آلومینیوم بر رفتار خوردگی فولاد هادفیلد انجام داده‌اند، گزارش نمودند که آلومینیوم باعث افزایش مقاومت به خوردگی فولاد هادفیلد می‌شود. در تحقیقات دیگری که توسط عباسی و همکارانش انجام شده [۱۲ و ۱۱]، گزارش شده که با افزودن آلومینیوم به ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد و افزایش انرژی نقص چیدمان، پدیده‌ی کرنش دوقلوبی تضعیف می‌شود. در نتیجه، پدیده‌های چروکیدگی و ترک دار شدن سطحی در فولاد هادفیلد تضعیف می‌شوند.

یکی از علل اصلی تخریب مواد، خستگی می‌باشد. لذا اسکیلکی و همکارانش [۱۳] به مقایسه رفتار خستگی فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد در شرایط نورد شده و ریخته‌گری شده پرداختند. نتایج این محققان نشان داد که تفاوت زیادی بین رفتار خستگی نمونه‌ی نورد شده و نمونه‌ی ریخته‌گری شده مشاهده نمی‌گردد. در تحقیقات دیگری که به بررسی رفتار خستگی فولادهای آستنیتی منگنزدار پرداخته شده است [۱۴]، نشان داده شده که استحکام خستگی فولادهای آستنیتی منگنزدار بیشتر از فولادهای زنگ‌زن آستنیتی می‌باشد. همچنین نشان داده شده که رشد ترک خستگی در فولاد منگنزدار هادفیلد ارتباطی با جهت‌گیری کریستال‌ها در ریزساختار ندارد [۱۵].

با توجه به اینکه ۹۰ درصد شکست‌هایی که در صنعت رخ می‌دهد، شکست ناشی از خستگی است و با توجه به کاربردهای ذکر شده برای فولاد هادفیلد، در اکثر کاربردها بویژه در چکش‌های سنگ شکن‌ها، آلیاژ مذکور در معرض تنش‌های چرخه‌ای بوده و بدون شک اکثر قطعات ساخته شده از جنس این آلیاژها، دچار شکست ناشی از

خستگی می‌شوند. لذا در این پژوهش لازم دیده شد که به بررسی تأثیر آلومینیوم بر عمر خستگی فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد پرداخته شود که در پژوهش‌های گذشته به آن پرداخته نشده بود.

۲- روش تحقیق

آلیاژ آهن - منگنز مورد استفاده در این تحقیق، فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد ASTM A-128 [۱۶] بود. برای تهیه‌ی این فولاد، ۲ نمونه از فولاد هادفیلد با مقادیر مختلفی از آلومینیوم (بدون آلومینیوم و حاوی ۱/۶۸ درصد وزنی آلومینیوم) توسط کوره القایی بدون هسته تهیه شده و سپس ترکیب شیمیایی آنها توسط دستگاه طیف‌سنجی نشری جرقه‌ای^۲ بررسی و در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده بر حسب درصد وزنی

کد نمونه	C	Mn	Si	P	S	Al
A	۱/۲۳	۱۲/۵۳	۰/۳۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱۹	-
B	۱/۲۲	۱۲/۵۲	۰/۳۲	۰/۰۰۱	۰/۰۲۰	۱/۶۸

سپس هر ۲ نمونه تحت عملیات حرارتی آستنیت در دمای ۱۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت قرار گرفته و بلافاصله در آب سریع سرد شدند. برای بررسی ریزساختار، نمونه‌های متالوگرافی پس از آماده‌سازی توسط محلول نایتال ۲ درصد حکاکی شدند. سپس ریزساختارهای حاصل توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی اندازه دانه‌ی نمونه‌های عملیات حرارتی شده از نرم افزار آنالیز تصویر^۳ استفاده شد. همچنین جهت بررسی رسوبات تشکیل شده در هر دو نمونه پس از عملیات آستنیت و تندرسمایی در آب از پراش پرتو ایکس^۴ استفاده گردید. برای بررسی سختی، از هر دو نمونه‌ی مورد آزمایش بعد از عملیات آستنیت و تندرسمایی در آب، بر اساس استاندارد ASTM E92-82 [۱۷]، آزمون سختی سنجی با استفاده از دستگاه اینسترون^۵ انجام شد. همچنین بعد از عملیات آستنیت و تندرسمایی در آب، نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش کشش، توسط دستگاه تراش مطابق با استاندارد ASTM E8 [۱۸] تراشکاری شدند. همچنین نمونه‌های لازم برای آزمایش خستگی مطابق با استاندارد DIN 50113 [۱۹] توسط دستگاه تراش تهیه شدند. لازم به ذکر است که پس از تهیه‌ی نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش خستگی توسط دستگاه تراش، سطح نمونه‌ها توسط خمیر الماس پولیش شده تا احتمال تشکیل میکروترک در حین تراشکاری در سطح نمونه‌ها به حداقل رسیده باشد.

آزمایش کشش تک محوره توسط دستگاه SANTAM مدل ۴۰۰-ASTM در دمای اتاق انجام شد. همچنین آزمایش خستگی توسط دستگاه SANTAM مدل ۶۰۰-SFT از نوع خمشی و با سرعت ۳۶۰۰rpm و نسبت تنشی $R = -1$ تنشهای اعمالی ۵۰، ۵۵۰،

2spark emission spectroscopy
3 Image Analyzer
4 X-Ray Diffraction (XRD)
5 INSTRON

۶۰۰ و ۶۵۰ MPa و در دمای محیط انجام شد. لازم به ذکر است که در هر دامنه تنش اعمالی، سه مرتبه از هر نمونه آزمایش خستگی گرفته شد. همچنین تنش در 10^7 سیکل به عنوان حد خستگی در نظر گرفته شد.

پس از پایان آزمایش‌های کشش و خستگی، از سطح شکست نمونه‌های تست شده در آزمایش کشش و نمونه‌های تست شده در تنش ۵۰۰ MPa در آزمایش خستگی، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ تصاویری تهیه شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشاهدات و آنالیز ریزساختاری

شکل ۱، تصاویر متالوگرافی تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری از فولاد هادفیلد مورد استفاده در این پژوهش را در شرایط ریخته‌گری، عملیات حرارتی و تندرسمایی شده در آب را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۱ مشاهده می‌شود، در حالت ریخته‌گری و بدون عملیات حرارتی در نمونه‌ی بدون آلومینیوم، ریزساختار متشکل از یک زمینه آستنیتی و مقدار زیادی کاربید پیوسته در مرز دانه‌ها می‌باشد. ولی در نمونه‌ی حاوی آلومینیوم از میزان ذرات کاربیدی کاسته شده و همچنین کاربیدها از حالت پیوسته در مرز دانه‌ها خارج شده و به شکل منقطع و پراکنده تبدیل شده‌اند. با انجام عملیات حرارتی در دمای 1100°C ، میزان کاربیدها در ریزساختار کاهش یافته و پس از سریع سردی در حمام آب خالص، مقداری کاربید پراکنده و کروی شکل در ریزساختار هر دو نمونه مشاهده می‌شود. دلیل زمینه آستنیتی در فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد را می‌توان به حضور مقادیر بالای کربن و منگنز و همچنین عملیات حرارتی در دمای 1100°C اثبات نمود.

لی و چو [۲۰] گزارش دادند که با افزایش منگنز در آلیاژهای آهن-منگنز، دمای شروع مارتنزیت به میزان بسیار زیادی کاهش می‌یابد، بطوریکه در آلیاژهای پرمنگنز یک زمینه کاملاً آستنیتی را می‌توان مشاهده نمود.

اما نکته قابل توجه بزرگ‌تر بودن اندازه‌ی دانه‌ها در نمونه‌ی حاوی آلومینیوم نسبت به نمونه‌ی بدون آلومینیوم در هر دو حالت ریخته‌گری و عملیات حرارتی است. در نمونه‌ی حاوی آلومینیوم، آلومینیوم باعث افزایش حلالیت کربن در زمینه آستنیت شده و این امر موجب کاهش تشکیل ذرات کاربیدی و افزایش اندازه‌ی دانه‌ها شده است. نتایج حاصل شده در این پژوهش در اثر افزودن آلومینیوم با نتایج زودینا [۲۱]، خیاط [۸] و همکارانشان مطابقت دارد. زودینا و همکارانش گزارش نمودند که افزودن آلومینیوم به ترکیب شیمیایی فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد منجر به کاهش ضریب فعالیت کربن در آستنیت و افزایش حلالیت کربن در زمینه آستنیت این فولاد می‌شود. خیاط و همکارانش نشان دادند که افزودن ۱٫۵ درصد وزنی آلومینیوم به ترکیب شیمیایی فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد منجر به افزایش اندازه دانه‌های آستنیت شده که اندازه‌ی این دانه‌ها با انجام عملیات آستنیت‌ه هم تغییری نمی‌کند.

برای بررسی اندازه دانه‌ها در هر دو نمونه‌ی عملیات حرارتی شده، اندازه‌ی دانه‌ها توسط نرم افزار آنالیز تصویر محاسبه شده و بر روی تصاویر متالوگرافی مشخص گردیده است. لازم به ذکر است که در نمونه‌ی بدون آلومینیوم (A)، دلیل حضور دانه‌های متعدد آستنیت، اندازه‌ی چند دانه با نرم افزار محاسبه شده و در نهایت میانگین آنها بر روی تصاویر متالوگرافی گزارش شده است. در مجموع ریزساختارهای مشاهده شده در نمونه‌ی حاوی ۱٫۶۸ درصد وزنی آلومینیوم نشان از این دارد که حضور آلومینیوم در فولاد هادفیلد منجر به افزایش اندازه دانه‌های آستنیت در ساختار این فولاد می‌شود [۸].

برای بررسی رسوبات تشکیل شده در هر دو نمونه‌ی آستنیت و تندرسمایی شده در آب از آنالیز XRD استفاده شده و نتایج آن در شکل ۲ گزارش شده است. از شکل ۲ هم ملاحظه می‌شود که کاربیدهای تشکیل شده در هر دو نمونه، کاربیدهای منگنز از نوع Mn_7C_6 بوده و فاز غالب (فاز زمینه)، آستنیت می‌باشد [۱۳]. همچنین از الگوهای پراش پرتو X ملاحظه می‌گردد که در نمونه‌ی حاوی آلومینیوم ترکیب بین فلزی Fe_3Al تشکیل شده و شدت پراش مربوط به فاز کاربیدهای منگنز کاهش یافته که نشان از کاهش تشکیل این کاربیدها در این نمونه دارد.

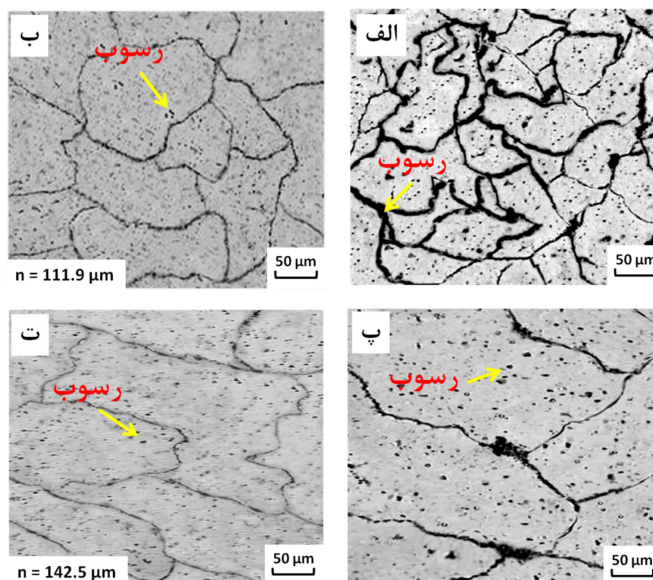
۳-۲- آزمایش کشش

نتایج مربوط به آزمایش کشش برای هر دو نمونه‌ی مورد آزمایش پس از عملیات آستنیت و تندرسمایی در آب در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۳ مشاهده می‌شود، نمونه‌ی بدون آلومینیوم و تندرسمایی شده در حمام آب خالص (نمونه‌ی A) از استحکام تسلیم پائین‌تر، استحکام کششی بالاتر و چقرمگی و کرنش شکست بالاتری نسبت به نمونه‌ی حاوی آلومینیوم و تندرسمایی شده در حمام آب خالص (نمونه‌ی B) برخوردار است. زیرا همانطور که در تصاویر متالوگرافی تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری مشاهده گردید (شکل ۱)، دیده شد که فولاد هادفیلد حاوی آلومینیوم (نمونه‌ی B)، تعداد مرز دانه کمتری در ساختار دارد. این امر بدلیل آن است که آلومینیوم باعث افزایش حلالیت کربن در آستنیت شده و موجبات بزرگ شدن دانه‌های آستنیت را فراهم نموده است [۸ و ۲۱]. لذا نمونه‌ی حاوی آلومینیوم بدلیل درشت ساختاری و اندازه دانه‌های آستنیت بزرگتر، دارای قابلیت تغییر شکل پلاستیک (کرنش شکست) کمتری بوده ولی بدلیل تشکیل محلول جامد بین‌نشین بیشتر توسط کربن، دارای استحکام تسلیم بیشتری است. همچنین رسوباتی که توسط آلومینیوم در ریزساختار فولاد هادفیلد تشکیل شده‌اند، با جلوگیری از حرکت نایجایی‌ها منجر به افزایش استحکام تسلیم شده‌اند.

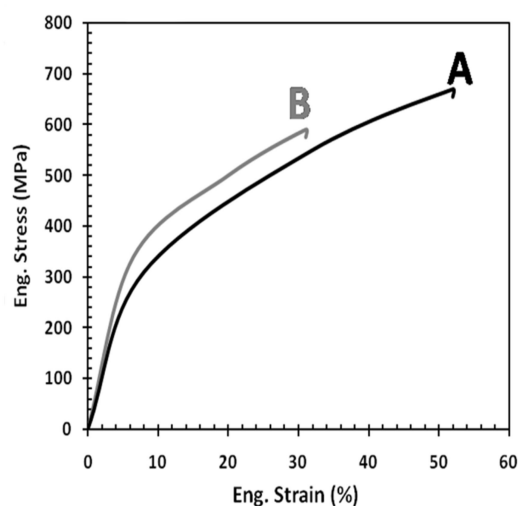
درواقع با افزودن آلومینیوم به ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد و افزایش انرژی نقص چیدمان، اکتیویته‌ی نسبی دوقلوبی در مقایسه با لغزش کاهش می‌یابد. بنابراین با افزودن آلومینیوم به ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد، میزان ازدیاد طول نسبی و استحکام کششی نیز کاهش می‌یابد [۱۲].

بطور کلی بررسی‌ها نشان داده است که تشکیل محلول جامد به میزان زیادی بر روی استحکام تسلیم تأثیر گذار بوده و همچنین بررسی‌ها نشان داده است که اتم‌های بین‌نشین اثر استحکام‌دهی نسبی حدود ۳

1 Scanning Electron Microscopy (SEM)

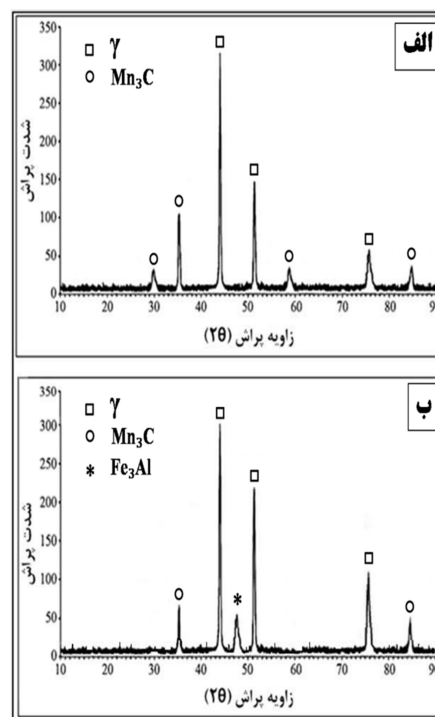


شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۱۰۰: الف) نمونه‌ی A در حالت ریخته‌گری، ب) نمونه‌ی A پس از عملیات حرارتی، پ) نمونه‌ی B در حالت ریخته‌گری، ت) نمونه‌ی B پس از عملیات حرارتی



شکل ۳- نمودار تنش - کرنش مهندسی برای آلیاژهای مختلف

برابر مدول برشی دارند، در حالی که اتم‌های جانشین دارای اثر استحکام‌دهی نسبی حدود ۰/۱ مدول برشی هستند. دلیل این رخداد واکنش بیشتر اتم‌های بین‌نشین با نایجایی‌های لبه‌ای و پیچی گزارش داده شده است [۲۲]. نتایج حاصل شده از این پژوهش در ارتباط با تأثیر آلومینیوم بر استحکام تسلیم و کرنش شکست فولاد منگن‌دار با نتایج دیگر محققین همخوانی دارد. کینا [۲۳]، پارک [۲۴] و همکارانش گزارش نمودند که با افزودن آلومینیوم به فولادهای منگن‌دار، استحکام تسلیم افزایش و کرنش شکست کاهش می‌یابد. عباسی و همکارانش [۲۵] با بررسی تأثیر ۱/۵ و ۳ درصد وزنی آلومینیوم بر خواص مکانیکی فولاد آستنیتی منگن‌دار هادفیلد گزارش دادند که افزایش میزان آلومینیوم در فولاد هادفیلد منجر به افزایش



شکل ۲- الگوهای XRD از: الف) نمونه‌ی بدون آلومینیوم (A)، ب) نمونه‌ی حاوی آلومینیوم (B)

استحکام تسلیم و کاهش چقرمگی و کرنش شکست در فولاد مذکور می‌گردد.

۳-۳- آزمایش سختی

نتایج سختی‌سنجی برای هر دو نمونه‌ی مورد آزمایش پس از عملیات آستنیت‌ه و تندسرمایی در آب در جدول ۲ گزارش داده شده است. همانطور که از این جدول ملاحظه می‌گردد، با افزودن آلومینیوم به ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد، سختی نیز افزایش یافته است. همانطور که از نتایج آزمایش کشش ملاحظه گردید (شکل ۳)، نمونه‌ی حاوی آلومینیوم (نمونه‌ی B) نسبت به نمونه‌ی بدون آلومینیوم (نمونه‌ی A) از استحکام تسلیم بالاتری برخوردار است. از طرفی با توجه به ارتباط مستقیم بین استحکام تسلیم با سختی [۲۲]، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌ی حاوی آلومینیوم بدلیل استحکام تسلیم بالاتر، دارای سختی بیشتری نسبت به نمونه‌ی بدون آلومینیوم است. همچنین نتایج حاصل شده از آزمایش سختی‌سنجی و تأثیر آلومینیوم بر سختی فولاد هادفیلد با نتایج حاصل شده از تحقیقات آقای عباسی و همکارانش همخوانی دارد [۱۲].

جدول ۲- نتایج آزمایش سختی با حداقل سه بار تکرار

کد نمونه	میزان آلومینیوم	آزمایش سختی	
	Wt %	میزان سختی (HV)	انحراف معیار
A	۰	۱۸۸	۴٫۷۳
B	۱٫۶۸	۲۲۴	۵٫۵۹

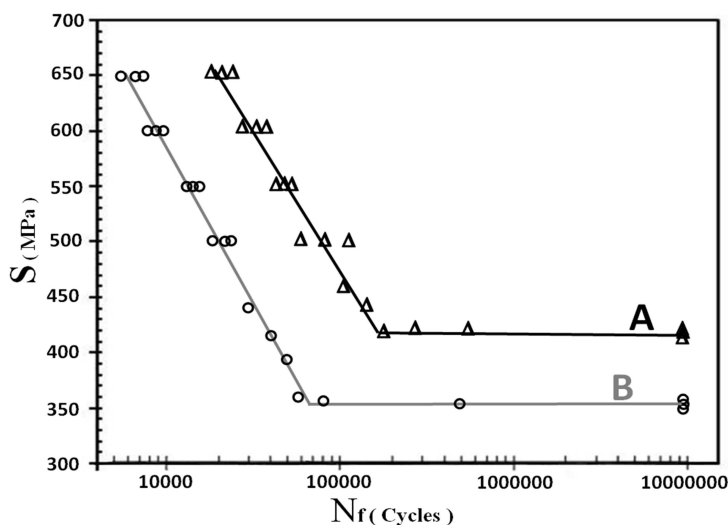
۳-۴- آزمایش خستگی

در شکل ۴ منحنی‌های S-N (تنش - تعداد چرخه شکست) حاصل از آزمایش خستگی برای هر دو نمونه‌ی مورد آزمایش در

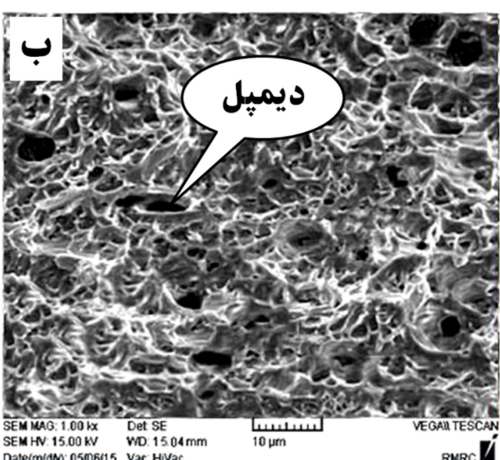
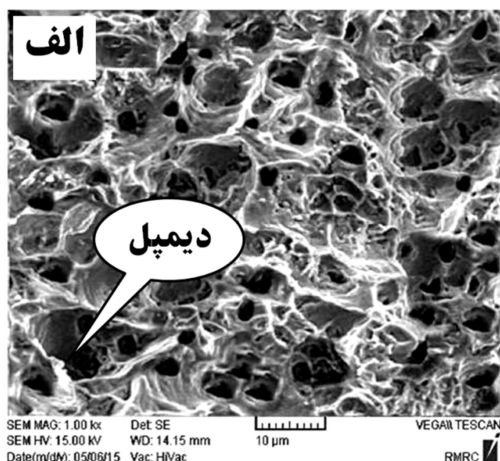
تنش‌های ۵۰۰، ۵۵۰، ۶۰۰ و ۶۵۰ Mpa نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، نمونه‌ی بدون آلومینیوم (نمونه‌ی A) نسبت به نمونه‌ی حاوی آلومینیوم (نمونه‌ی B)، در تمام تنش‌های اعمال شده رفتار و عمر خستگی بهتری را از خود نشان می‌دهد. منحنی‌های S-N حاصل از آزمایش خستگی، ارتباط مستقیمی با تغییرات ریزساختاری ایجاد شده در فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد در اثر افزودن آلومینیوم به ترکیب شیمیایی فولاد مذکور دارد. همانطور که از تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری مشاهده گردید (شکل ۱)، آلومینیوم منجر به بزرگ شدن اندازه دانه‌های آستنیت می‌شود. لذا نمونه‌ی حاوی آلومینیوم بدلیل داشتن ساختاری درشت دانه، نسبت به نمونه‌ی بدون آلومینیوم، عمر خستگی کمتری در تمام تنش‌های اعمال شده دارد [۲۲].

نتایج حاصل شده از این پژوهش در رابطه با تأثیر اندازه دانه‌های فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد حاوی آلومینیوم بر عمر خستگی این فولاد با نتایج حاصل شده از پژوهش شریفی و همکارانش [۲۶] شباهت دارد. شریفی و همکارانش گزارش نمودند که افزایش اندازه دانه‌های فریت باعث کاهش عمر و استحکام خستگی فولادهای دوفازی می‌شود.

از شکل ۴ مشاهده می‌شود که در تنش‌های بالا (۶۵۰ Mpa)، رفتار خستگی هر دو نمونه به هم نزدیک می‌باشد. ولی در تنش‌های پایین (۵۰۰ Mpa)، تفاوت رفتار خستگی افزایش یافته و ارتباط ریزساختار با طول عمر خستگی به وضوح قابل مشاهده است. دلیل این امر آن است که در تنش‌های اعمالی بالا، مراحل خستگی کوتاه می‌باشند و در نتیجه تأثیر ریزساختار بر این مراحل کم بوده و طول عمر خستگی به میزان کمتری نسبت به تنش‌های پایین تحت تأثیر ریزساختار قرار می‌گیرد. اما با این وجود باز هم مشاهده می‌گردد که نمونه‌ی بدون آلومینیوم نسبت به نمونه‌ی حاوی آلومینیوم رفتار خستگی بهتری را در تنش‌های بالا از خود نشان داده است.



شکل ۴- نتایج آزمایش خستگی برای هر دو نمونه



شکل ۵- تصاویر SEM از سطح شکست نمونه‌ها پس از آزمایش کشش: (الف) نمونه‌ی A، (ب) نمونه‌ی B

همچنین استحکام خستگی برای فولاد آستنیتی منگن‌دار هادفیلد استاندارد و تندرستی شده در حمام آب خالص (نمونه‌ی A)، تقریباً برابر با ۴۰۰ MPa می‌باشد که با نتایج حاصل از پژوهش کانگ و همکارانش [۲۷] مطابقت دارد. همچنین از شکل ۴ ملاحظه می‌گردد که در محدوده‌ی تنش ۵۰۰ MPa - ۳۷۰ که مربوط به استحکام خستگی فولاد هادفیلد است، فولاد هادفیلد بدون آلومینیوم دارای عمر خستگی بیشتری نسبت به فولاد هادفیلد حاوی آلومینیوم است.

۳-۵- شکست نگاری سطوح شکست

پس از آزمایش کشش از سطح شکست هر دو نمونه‌ی مورد آزمایش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصویری تهیه شده و در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که از این تصاویر دیده می‌شود، هر دو نمونه دارای مشخصه‌ی شکست نرم (سطح دیمپلی^۱) می‌باشند. دلیل این امر آن است که فاز غالب در زمینه‌ی هر دو نمونه آستنیت بوده و آستنیت هم یک فاز نرم می‌باشد. مکانیسم شکست نرم در آزمایش کشش مواد نرم، مکانیسم جَوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها است. این نوع شکست که به شکست فنجان - مخروط^۲ معروف است، مهمترین مکانیسم در شکست مواد نرم به شمار می‌آید [۲۸]. اما با مقایسه‌ی هر دو تصویر، مشاهده می‌شود که سطح شکست نمونه‌ی بدون آلومینیوم (نمونه‌ی A) نسبت به نمونه‌ی حاوی آلومینیوم (نمونه‌ی B)، دارای دیمپل‌هایی با عمق بیشتر است که نشان از نرم‌تر بودن شکست در نمونه‌ی بدون آلومینیوم می‌باشد. همانطور که از نتایج آزمایش کشش ملاحظه گردید، حضور آلومینیوم در ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد با کاهش اکتیوته نسبی دوقلویی منجر به کاهش درصد ازدیاد طول نسبی و چقرمگی فولاد هادفیلد می‌شود [۱۲]. در نهایت کاهش چقرمگی و قابلیت تغییر شکل مومسان باعث شده که دیمپل‌هایی با عمق کمتر در سطح شکست فولاد هادفیلد حاوی آلومینیوم دیده شود.

همچنین شکست‌نگاری نمونه‌های آزمایش کشش نشان می‌دهد که میکرو دیمپل‌های ثانویه در فضای بین دیمپل‌های اولیه حضور دارند که می‌توانند شکست را به تأخیر بیاورند. این میکرو دیمپل‌ها در اثر برهمکنش و برخورد لایه‌های میکرو دوقلویی و نیز ایجاد نانو رسوبات کربیدی در اثر پیرسازی کرنشی دینامیکی می‌توانند ایجاد شوند [۲۹]. پس از آزمایش خستگی در تنش اعمالی ۵۰۰ Mpa، از ترک خستگی موجود در سطح شکست هر دو نمونه‌ی مورد آزمایش، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصویری تهیه شده و در شکل ۶ نشان داده شده است. در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده مشاهده می‌شود که نمونه‌ی حاوی آلومینیوم (نمونه B) نسبت به نمونه‌ی بدون آلومینیوم (نمونه A)، دارای طول ترک خستگی بیشتری در دامنه تنش یکسان است. همانطور که از نتایج آزمایش کشش در شکل ۳ ملاحظه گردید، اضافه کردن آلومینیوم به فولاد منگن‌دار هادفیلد منجر به کاهش چقرمگی و کرنش شکست (قابلیت تغییر شکل مومسان) این فولاد می‌شود.

از طرفی چقرمگی و کرنش شکست ماده تأثیر بسزایی در رشد و هندسه‌ی ترک خستگی دارد. لذا با توجه به توضیحات ارائه شده، می‌توان اثبات نمود که رشد ترک خستگی در فولاد آستنیتی منگن‌دار هادفیلد بدون آلومینیوم، بدلیل چقرمگی و کرنش شکست بالاتر نسبت به نمونه‌ی حاوی آلومینیوم، محدودتر و کمتر است. در چند سال اخیر تحقیقات زیادی بر روی نحوه‌ی رشد ترک خستگی و تأثیر منطقه مومسان ماده نوک ترک بر بسته شدن دهانه‌ی ترک خستگی صورت گرفته است. از جمله محققانی که در این زمینه فعالیت‌هایی انجام داده‌اند می‌توان به نیومن [۳۱ و ۳۰]، آنتونس [۳۲]، والکر [۳۳]، آلدلیستن [۳۴]، کاجر [۳۵] و همکارانشان اشاره نمود. نیومن بر مبنای محاسبات اجزای محدود، ایده‌ی بسته شدن دهانه‌ی ترک را در سال ۱۹۷۴ تأیید نمود. آنتونس و همکارانش یک مدل تجربی را برای بسته شدن ترک در اثر قابلیت تغییر شکل پلاستیک را براساس ضربه شدت تنش ارائه نمودند.

1 Dimple
2 Cup & Cone

از طرفی دیگر مرزدانه‌ها محل‌های پراثری بوده که عبور از آن نیاز به صرف انرژی بسیار زیادی دارد. همچنین ترک خستگی در محل مرزدانه باید جهت خود را عوض کند. در نتیجه مرزدانه‌ها مسیر رشد ترک خستگی را منحرف کرده و منجر به کاهش انرژی ترک می‌شوند [۲۸]. لذا آلومینیوم با افزایش اندازه دانه‌های آستنیت، تعداد مرزدانه‌ها (موانع رشد ترک خستگی) را کاهش داده و از این طریق هم موجب تسهیل در رشد ترک خستگی در فولاد آستنیتی منگن‌دار هادفیلد می‌شود.

بنابراین آلومینیوم با دو اثر کاهش تعداد مرزدانه‌ها و کاهش سهم اکتیوخته دوقلویی در تغییر شکل مومسان (کاهش منطقه مومسان ماده نوک ترک خستگی)، منجر به کاهش عمر خستگی فولاد آستنیتی منگن‌دار هادفیلد می‌شود.

۴- نتیجه گیری

در مطالعه‌ی حاضر به بررسی تأثیر عنصر آلومینیوم بر رفتار خستگی فولاد هایپرپروتکتوئید هادفیلد (فولادهای آستنیتی منگن‌دار) پرداخته شده است. برای این منظور دو نمونه از فولاد هادفیلد (بدون آلومینیوم و حاوی ۱/۶۸ درصد وزنی آلومینیوم) تهیه شد. در مرحله بعد هر دو نمونه در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد آستنیت شده و سپس در آب سریع سرد شدند. سپس آزمایش‌های کشش، خستگی، سختی‌سنجی و مشاهدات میکروسکوپی بر روی آنها اعمال شد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که:

الف) تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری نشان داد که افزودن آلومینیوم به ترکیب فولاد هادفیلد منجر به افزایش اندازه دانه‌های آستنیت در هر دو حالت ریخته‌گری و عملیات حرارتی می‌شود.

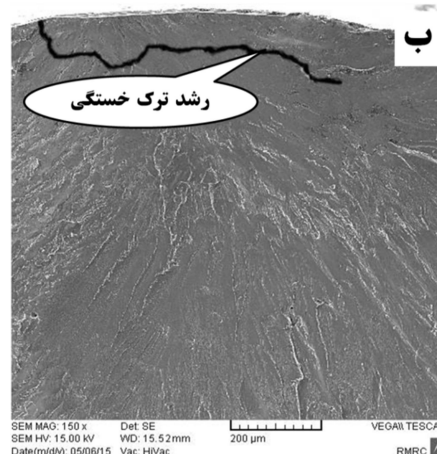
ب) با بررسی نتایج آزمایش کشش تک‌محوره و سختی‌سنجی مشخص گردید که حضور آلومینیوم در ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد منجر به افزایش استحکام تسلیم، افزایش سختی، کاهش استحکام کششی و چقرمگی (قابلیت تغییر شکل مومسان) در فولاد مذکور می‌شود.

پ) نتایج آزمایش خستگی دلالت بر کاهش عمر و استحکام خستگی فولاد هادفیلد در اثر افزودن آلومینیوم به ترکیب شیمیایی آن داشت. زیرا افزودن آلومینیوم منجر به افزایش اندازه دانه‌های آستنیت و کاهش خواص خستگی در فولاد هادفیلد شده بود.

ت) مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که در آزمایش کشش هر دو نمونه‌ی هادفیلد با و بدون آلومینیوم دچار شکست نرم (سطح دیملی) می‌شوند. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از رشد ترک خستگی نشان داد که ترک در فولاد هادفیلد حاوی آلومینیوم نسبت به فولاد هادفیلد بدون آلومینیوم به میزان زیادی رشد کرده و منجر به کاهش عمر خستگی فولاد هادفیلد می‌شود. زیرا آلومینیوم منجر به کاهش تعداد مرزدانه‌ها (بعنوان موانع رشد ترک خستگی) و کاهش سهم فعالیت دوقلویی در تغییر شکل مومسان (کاهش منطقه مومسان ماده نوک ترک خستگی) شده بود.

۵- سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول بخاطر



شکل ۶- تصاویر SEM از ترک خستگی موجود در سطح شکست ایجاد شده در تنش شکست ۵۰۰MPa: الف) نمونه A، ب) نمونه B

والکر و همکارانش به بررسی و تجزیه و تحلیل بسته شدن ترک‌های کوچک در آلیاژهای آلومینیوم پرداختند. آلدلیستن به ارائه‌ی راهکاری جهت درک بهتر تغییر شکل مومسان و بسته شدن ترک در خستگی پرداخته بود. همچنین کاجر در تحقیقاتی به بررسی اثر تنش میانگین بر بسته شدن ترک خستگی پرداخته بود.

لذا با اطمینان بالایی می‌توان گفت که یکی از مکانیسم‌های حفاظتی رأس ترک، بسته شدن دهانه‌ی ترک خستگی در اثر مومسانی زیاد ماده نوک ترک می‌باشد [۲۸]. لذا در این پژوهش چقرمگی بالاتر نمونه‌ی بدون آلومینیوم منجر به افزایش مومسانی منطقه‌ی جلوی نوک ترک شده و در نهایت منجر به بسته شدن دهانه ترک، توقف رشد ترک و متعاقباً افزایش عمر خستگی فولاد هادفیلد شده است. در مقابل نمونه‌ی حاوی آلومینیوم، بدلیل داشتن دانه‌های آستنیت بزرگتر، انعطاف پذیری و چقرمگی کمتری داشته و این امر منجر به رشد سریع ترک و کاهش مومسانی منطقه جلوی نوک ترک شده است. درواقع حضور آلومینیوم در ترکیب شیمیایی فولاد منگن‌دار هادفیلد منجر به تضعیف سهم کرنش دوقلویی در تغییر شکل مومسان آستنیت شده [۱۲] و موجبات رشد سریع ترک خستگی را به میزان زیادی فراهم نموده است.

حمایت‌های مالی که از این پروژه انجام داده‌است، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

۶- نمادها

سختی ویکرز	HV
تنش مهندسی (MPa)	Eng. Stress
کرنش مهندسی (%)	Eng. Strain
تنش شکست (Mpa)	S
تعداد چرخه تا شکست	N _f

۷- مراجع

- [1] Ibitoye S.A., Olawale J.O. and Shittu M.D., Mechanical properties of quench-hardened, martempered and tempered ASTM A 128 grade b-4 steel, J. Sci. Technol, Vol. 29, No. 2, pp. 107-117, 2009.
- [2] Limooei M.B. and Hosseini SH., Optimization of properties and structure with addition of titanium in hadfield steels, Proc. Conf. of Metal 2012, Brono, Czech Republic, pp. 1-6, 2012.
- [3] Najafabadi V.N., Amini K. and Alamdarlo M.B., Investigating the effect of titanium addition on the wear resistance of Hadfield steel, Metallurgical Research Technoloe, Vol. 111, No. 6, pp. 375-382, 2014.
- [4] Magdaluyo E.R. and et al., Gouging Abrasion Resistance of Austenitic Manganese Steel with Varying Titanium, Proc. of the World Congress on Engineering 2015, London, English, pp. 1-4, 2015.
- [5] نجف آبادی و.، مناجاتی زاده ج. و امینی ک.، بررسی تأثیر تیتانیوم بر بهبود خواص فولاد هادفیلد "STM A128-C"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۷، شماره اول، ص ۵۴ - ۴۵، بهار ۱۳۹۲.
- [6] Srivastava A.K. and Das K., In-situ Synthesis and Characterization of TiC-Reinforced Hadfield Manganese Austenitic Steel Matrix Composite, Iron and Steel Institute of Japan International, Vol.49, No.9, pp.1372-1377, 2009.
- [7] 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.
- [8] خیاط م.، خیراندیش ش. و عباسی م.، تأثیر آلومینیوم بر ریزساختار فولاد آستنیتی منگنزی هادفیلد در شرایط مختلف عملیات حرارتی، مجموعه مقالات دومین همایش بین المللی و هفتمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران و انجمن ریخته‌گری ایران، سمنان، ۱۳۹۲.
- [9] Tian X. and Zhang Y., Mechanism on the Effect of Al upon the $\gamma \rightarrow \epsilon$ Martensite Transformation in the Fe-Mn Alloys, Journal of Material Science and Technology, Vol. 12, No. 22, pp. 369-372, 1996.
- [۱۰] سبزی م. و معینی‌فر ص.، بررسی تأثیر عناصر آلیاژی آلومینیوم و کروم بر رفتار الکتروشیمیایی فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد، مجله علوم و مهندسی خوردگی، شماره ۵، دوره ۵، ص ۲۸ - ۱۹، بهار ۱۳۹۴.
- [11] Abbasi M., Kheirandish SH., Kharrazi Y., Hejazi J., On the comparison of the abrasive wear behavior of aluminum alloyed and standard Hadfield steels, Wear, Vol. 268, No. 1-2, pp. 202-207, 2010.
- [۱۲] عباسی م.، خیراندیش ش.، خرازی ی. و حجازی ج.، بررسی تأثیر برخی عوامل اصلی بر رفتار سایشی فولاد هادفیلد، نشریه علوم و مهندسی سطح، سال ۵، شماره ۷، ص ۸۰ - ۶۹، تابستان ۱۳۸۸.
- [13] Schilke M., Ahlstrom J., Karlsson B., Low cycle fatigue and deformation behaviour of austenitic manganese steel in rolled and in as-cast conditions, Procedia Engineering, Vol. 2, No.1, pp. 623-628, 2010.
- [14] Hamada A.S., Karjalainen L.P., Puustinen J., Fatigue behavior of high-Mn TWIP steels, Materials Science and Engineering: A, Vol. 517, No. 1-2, pp. 68-77, 2009.
- [15] Feng X.Y., Zhang F., Zheng ch., Lu B., Micromechanics behavior of fatigue cracks in Hadfield steel railway crossing, Science China Technological Sciences, Vol. 56, No. 5, pp. 1151-1154, 2013.
- [16] Annual book of ASTM standards, ASTM 128 A / 128 M, Standard specification for steel castings, austenitic manganese, ASTM International, Vol. 1, 1980.
- [17] Annual book of ASTM standards, Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials, ASTM E92-82, pp. 1-9, 2003.
- [18] Annual book of ASTM standards, ASTM E8 / E8M-15a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM Int., Vol. 03.01, 2015.
- [19] German Standards Organization, Rotating Bar Bending Fatigue Test, DIN 50113, 1982.
- [20] Lee Y.K., Choi C.S., Driving Force for $\gamma \rightarrow \epsilon$ Martensitic Transformation and Stacking Fault Energy of γ in Fe-Mn Binary System, Metallurgical and Material Transaction A, Vol. 31, No. 2, pp. 355-360, 2000.
- [21] Zuidema B.K., Subramanyam D.K., Leslie W.C., The effect of Aluminium on the work hardening and wear resistance of Hadfield manganese steel, Metallurgical Transactions A, Vol. 18A, No. 9, pp. 1629-1639, 1987.
- [۲۲] دتیر جورج ای.، متالورژی مکانیکی، شهیدی ش. (مترجم)، مرکز نشر دانشگاهی، چاپ پنجم، ۱۳۹۲.
- [23] China K.G., Kang C.Y., Shin S.Y., Hong S., Lee S., Kim H.S., Kim K.H., Kim N.J., Effects of Al addition on deformation and fracture mechanisms in two high manganese TWIP steels, Materials Science and Engineering: A, Vol. 528, No. 6, pp. 2922-2928, 2011.
- [24] Parka K., Jin K.G., Han S.H., Hwang S.W., Choi K., Lee C.S., Stacking fault energy and plastic deformation of fully austenitic high manganese steels: Effect of Al addition, Materials Science and Engineering: A, Vol. 527, No. 16-17, pp. 3651-3661, 2010.
- [25] Abbasi M., Kheirandish S.H., Kharrazi Y., Hejazi J., The fracture and plastic deformation of aluminum alloyed Hadfield steels, Materials Science and Engineering: A, Vol. 513-514, No. 2-3, pp. 72-76, 2009.
- [26] Sharifi H., Salehi M., Saeri M.R., The Effect of Ferrite Grain Size on the Fatigue Behavior of Ferrite-martensite Dual-phase Steels, International Journal of ISSI, Vol. 11, No. 2, pp.11-16, 2014.
- [27] Kang j., Zhang F.C., Longa X.Y., Lv B., Cyclic deformation and fatigue behaviors of Hadfield manganese steel, Materials Science and Engineering: A, Vol. 591, No. 11, pp. 59-68, 2014.
- [۲۸] هرزبرگ ر.د.، تغییر شکل و مکانیک شکست مواد و آلیاژهای مهندسی، اکرامی ع.ا. (مترجم)، دانشگاه صنعتی شریف، موسسه انتشارات علمی، ۱۳۸۲.
- [۲۹] عباسی م. و همکارانش، ارزیابی مکانیزم شکست در فولاد هادفیلد، مجموعه مقالات ششمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی و انجمن علمی ریخته‌گری ایران، تهران، ایران، ص ۹ - ۱، ۱۳۹۱.
- [30] Newman J.C., Finite element analysis of crack growth under monoyonic and cyclic loading, ASTM STP 637, pp. 56-80, 1977.
- [31] Newman J.C., Finite-element analysis of fatigue crack propagation-including the effects of crack closure, PH. D. thesis, VPI and State Uneversity, Blacksburg, 1974.
- [32] Antunes F.W., Chegini A.G., Camas D., Correia L., Empirical model for plasticity-induced crack closure based on Kmax and ΔK , Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 38, No. 8, pp. 983-996, 2015.
- [33] Walkera K.F., Wangb C.H., Newman J.C., Closure measurement and analysis for small cracks from natural discontinuities in an aluminium alloy, International Journal of Fatigue, Vol. 82, No.2, pp. 1-12, 2015.
- [34] Alderliesten R.C., How proper similitude can improve our understanding of crack closure and plasticity in fatigue, International Journal of Fatigue, Vol. 82, No. 2, pp. 1-11, 2015.
- [35] Katcher M., Kaplan M., Effect of R-factor and crack closure on fatigue crack growth for Al and Ti alloys, ASTM ETP, Vol. 559, p. 264, 1974.