

ارزیابی تأثیر کروم بر چقرمگی شکست فولاد هادفیلد با استفاده از آزمایش ضربه شارپی

مسعود سبزی*

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

احمد منشی

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

چکیده

در این پژوهش به بررسی تأثیر افزودن کروم بر چقرمگی شکست فولاد هادفیلد، با استفاده از آزمایش ضربه شارپی پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا سه بلوک از فولاد هادفیلد (۰٪Cr، ۱٫۵٪Cr و ۳٪Cr) بوسیله کوره القایی ریخته‌گری شدند. سپس هر سه بلوک به مدت ۲ ساعت تحت عملیات حرارتی آستنیت‌دهی در دمای ۱۱۰۰°C قرار گرفته و بلافاصله در آب خالص سرد شدند. در مرحله بعد، آزمایش‌های کشش تک‌محوره، سختی‌سنجی و ضربه‌ی شارپی بر روی هر سه نمونه انجام شد. برای بررسی ریزساختار از میکروسکوپ نوری و برای بررسی سطوح شکست از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. سپس برای بررسی چقرمگی شکست نمونه‌ها از روابط تجربی بین چقرمگی شکست و نتایج آزمایش ضربه شارپی، استفاده گردید. نتایج نشان داد که کمترین سختی - بالاترین چقرمگی شکست - بالاترین طول ترک بحرانی به بدون کروم و بالاترین سختی - کمترین چقرمگی شکست - کمترین طول ترک بحرانی به نمونه‌ی حاوی ۳٪Cr تعلق گرفت. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی دلالت بر افزایش رشد ترک در آزمایش ضربه شارپی در اثر افزودن کروم به ترکیب شیمیایی فولاد منگنزدار هادفیلد داشتند.

واژه‌های کلیدی: فولاد هادفیلد، چقرمگی شکست، کروم، طول ترک بحرانی، سختی.

Evaluation of Chromium Effect on the Fracture Toughness of Hadfield Steel By Using Charpy Impact Test

M. Sabzi

Young Researchers and Elite Club, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

A. Monshi

Department of Materials and Metallurgical, College of Technical, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Abstract

In this study, effect of chromium addition on the fracture toughness of Hadfield steel was investigated by using charpy impact test. For this purpose, 3 casting blocks were prepared from Hadfield steel (without Cr addition, and containing 1.5% Cr and 3% Cr) by using coreless induction furnace. After casting, all blocks austenitized in 1100°C for 2 hours and immediately quenched in the pure water. In the next step, uniaxial tensile test, hardness test and charpy impact test were applied on specimens. Evaluation of the microstructures was conducted by optical microscope and the fractured surfaces were observed by scanning electron microscope. The results of charpy impact test and fracture toughness empirical relationships were used for determination of fracture toughness values of specimens. As a result, it was found that sample without Cr had lowest hardness - highest fracture toughness value - highest critical crack length and the sample containing 3% Cr had the highest hardness - lowest fracture toughness value - lowest critical crack length. Also, scanning electron microscope images indicated increasing crack growth in the charpy impact test specimens by addition of Cr to chemical composition of Hadfield manganese steel.

Keywords: Hadfield steel, fracture toughness, Chrome, critical crack length, hardness.

۱- مقدمه

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 هادفیلد یک آلیاژ غیرمغناطیسی تشکیل شده از آهن، کربن ۱-۱/۴ 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، انعطاف‌پذیری خوب و مقاومت عالی در برابر سایش بصورت گسترده در صنایع مختلف نظیر صنایع سیمان، معدن، راهسازی و راه‌آهن بکار گرفته می‌شود [۱]. در موارد خاص بنا به کاربرد آن، عناصر آلیاژی دیگری نیز به این فولاد اضافه می‌شود. یکی از این عناصر تیتانیوم می‌باشد. استفاده از عنصر تیتانیوم جهت ریزدانه‌کردن ساختار و افزایش سختی در این فولاد نتایج بسیار مثبتی به جای گذاشته است [۲].

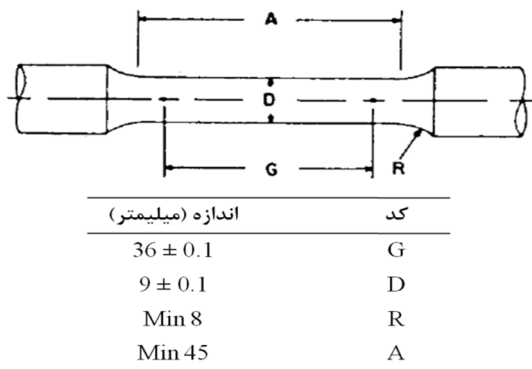
اگرچه این عنصر با ایجاد کاربیدهای پایدار، باعث افزایش سختی و بهبود مقاومت سایشی فولاد هادفیلد شده [۴ و ۳] ولی از طرفی هم با ایجاد کاربیدهای TiC، باعث کاهش انعطاف‌پذیری آن می‌شود [۵]. در تحقیقات دیگری اسری و استاوا و داس^۲ [۶]، گزارش نمودند که با طراحی کامپوزیت‌های شامل زمینه‌ای از فولاد هادفیلد و ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیوم، می‌توان مقاومت به سایش فولاد هادفیلد را بهبود بخشید. در همین زمینه، اسری و استاوا و همکارانش [۷]، به بررسی تأثیر ذرات کاربید تیتانیوم بر رفتار خوردگی کامپوزیت‌های با زمینه فولاد هادفیلد پرداختند. این محققان نشان دادند که با افزایش میزان کاربید تیتانیوم، مقاومت خوردگی کامپوزیت مذکور کاهش می‌یابد.

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 مرزدانه‌ای در ساختار

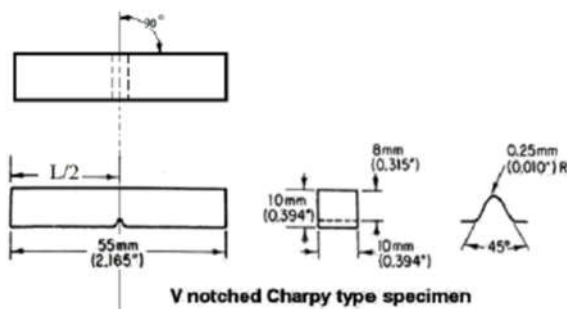
جدول ۱- آنالیز شیمیایی هر سه نمونه تولید شده برحسب درصدوزنی

نمونه	کربن	منگنز	سیلیسیم	گوگرد	کروم
A	۱,۲۵	۱۲,۷۱	۰,۲۵	۰,۰۱۷	-
B	۱,۲۴	۱۲,۶۸	۰,۲۳	۰,۰۱۹	۱,۵۱
C	۱,۲۶	۱۲,۶۹	۰,۲۴	۰,۰۱۸	۳,۰۱

سپس هر سه نمونه تحت عملیات حرارتی آستنیت‌دهی در دمای 1100°C 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 دانه‌ها از نرم افزار Image Analyzer و برای بررسی میزان کاربیدهای هر سه نمونه از نرم‌افزار Image J بصورت جداگانه استفاده شد. همچنین برای بررسی تأثیر کروم بر فازهای تشکیل شده در ساختار، از نمونه‌های بدون کروم و ۳٪Cr، از پراش پرتو ایکس^۱ استفاده گردید. برای بررسی سختی، از هر سه نمونه‌ی مورد آزمایش بعد از عملیات آستنیت‌دهی و سریع سرد کردن در آب، بر اساس استاندارد ASTM E ۹۲-۸۲ [۲۱]، آزمایش سختی‌سنجی با استفاده از دستگاه INSTRON انجام شد. همچنین بعد از عملیات آستنیت‌دهی و تندسرمایی در آب، نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش کشش، توسط دستگاه تراش CNC مطابق با استاندارد ASTM E۸ [۲۲] تراشکاری شدند (شکل ۱). همچنین نمونه‌های لازم برای آزمایش ضربه شاریپی مطابق با استاندارد ASTM A۳۷۰ [۲۳] توسط دستگاه تراش CNC تهیه شدند (شکل ۲).



شکل ۱- ابعاد نمونه‌ی کشش مطابق با استاندارد ASTM E۸



شکل ۲- ابعاد نمونه‌ی ضربه مطابق با استاندارد ASTM A۳۷۰

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، نیروی محرکه لازم برای انجام استحاله آستنیت به مارتنزیت را در این فولادها افزایش داده و از طرفی دمای تشکیل مارتنزیت را کاهش می‌دهد [۹].

فولاد هادفیلد به دلیل دارا بودن مقدار کربن بالا، ساختار آن در حالت ریختگی، شامل دانه‌های آستنیت و رسوب‌های کاربید مرزانه‌ای است که در این حالت ترد و شکننده بوده و به نوعی غیرقابل استفاده هستند. برای رفع این مشکل حسینی و همکارانش [۱۰ و ۱۱] گزارش نمودند که با سریع سرد کردن فولاد هادفیلد در حمام آب نمک پس از عملیات حرارتی آستنیت‌دهی، می‌توان از تشکیل بیش از حد ذرات کاربیدی در این فولاد جلوگیری نمود.

از آنجا که یکی از دلایل اصلی کاربرد فولاد هادفیلد بویژه در مته حفاری به خاطر مقاومت به سایش بالای آن می‌باشد، تعدادی از محققین در تحقیقات جداگانه‌ای به بررسی خواص سایشی فولاد هادفیلد پرداختند. مقدم و همکارانش [۱۲]، گزارش دادند که افزودن وانادیوم به فولادهای منگنزی، باعث افزایش مقاومت به سایش آنها نسبت به فولاد منگنزار هادفیلد می‌شود که دلیل این رخداد، تشکیل ذرات کاربید وانادیوم گزارش شده است. تعدادی دیگر از محققین [۱۵ - ۱۳] به مقایسه خواص و ساختار فولاد هادفیلد و آلیاژهای آهن - کروم پرداختند و نتایج آنها نشان می‌دهد که فولاد هادفیلد از سختی پایین‌تری برخوردار می‌باشد.

در تحقیقات دیگری که در رابطه با تأثیر افزودن کروم بر خواص و ریزساختار فولاد هادفیلد شده [۱۶ و ۱۷]، محققان گزارش دادند که افزودن کروم به ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد منجر به افزایش میزان رسوبات کاربیدی و مقاومت به سایش آن می‌شود.

بدلیل دشواری‌های خاص آزمایشگاهی، تعیین مستقیم چقرمگی شکست بسهولت امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا در همین زمینه محققان زیادی با استفاده از نتایج آزمایش ضربه شاریپی به تخمین چقرمگی شکست پرداختند [۱۸ و ۱۹].

با توجه به اینکه محققان قبلی گزارش نمودند کروم منجر به بهبود سختی و مقاومت به سایش فولاد هادفیلد می‌گردد، لذا استراتژی اصلی در این پژوهش این است که علاوه بر سختی، به بررسی تأثیر ۱,۵ و ۳٪Cr (در مقادیر کربن و منگنز ثابت) بر چقرمگی شکست فولاد هادفیلد با استفاده از آزمایش ضربه شاریپی بپردازد که در پژوهش‌های گذشته به آن پرداخته نشده است.

۲- روش تحقیق

آلیاژ آهن - منگنز مورد استفاده در این تحقیق، فولاد آستنیتی منگنزار هادفیلد ASTM A-۱۲۸ [۲۰] بود. برای تهیه این فولاد، سه نمونه از فولاد هادفیلد با مقادیر مختلفی از کروم (۰٪Cr، ۱,۵٪Cr و ۳٪Cr) توسط کوره القایی بدون هسته ریخته‌گری شده و سپس ترکیب شیمیایی آنها توسط دستگاه طیف سنجی نشری جرقه‌ای ساخت کشور آلمان بررسی گردید. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی هر سه نمونه نشان داده شده است.

1 X-Ray Diffraction (XRD)

بویژه کاربیده‌های کمپلکس افزایش یافته و منجر به ریزدانه شدن ساختار گشته است. برای بررسی اندازه دانه‌ها در هر سه نمونه، اندازه‌ی دانه‌ها توسط نرم افزار Image Analyzer محاسبه شده و بر روی تصاویر متالوگرافی مشخص گردیده است. لازم به ذکر است که در نمونه‌های حاوی ۱/۵ و ۳٪Cr، بدلیل افزایش تعداد دانه‌ها، اندازه‌ی چند دانه با نرم‌افزار محاسبه شده و در نهایت میانگین آنها بر روی تصاویر متالوگرافی گزارش شده است. بررسی اندازه دانه‌ها توسط نرم‌افزار نشان از این دارد که افزودن ۳٪Cr به ترکیب فولاد هادفیلد منجر به کاهش اندازه دانه‌های آستنیت از ۱۳۶۵ به ۶۱۲ میکرومتر می‌شود. در مجموع ریزساختارهای مشاهده شده در نمونه‌های حاوی ۱/۵ و ۳٪Cr نشان از این دارد که حضور کروم در فولاد هادفیلد باعث افزایش میزان کاربیده‌ها و ریز شدن دانه‌ها در ساختار می‌گردد.

برای بررسی بهتر میزان کاربیده‌ها در هر سه نمونه‌ی مورد آزمایش، از نرم افزار Image J استفاده شده و نتایج این بررسی در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل هم مشاهده می‌گردد که نمونه‌های حاوی کروم نسبت به نمونه‌ی بدون کروم دارای میزان کاربید بیشتری هستند. همچنین از این شکل مشاهده می‌شود که نمونه‌ی بدون کروم و نمونه‌ی حاوی ۳٪Cr به ترتیب کمترین و بیشترین میزان کاربید را دارا هستند.

۳-۲- آنالیز XRD

در شکل ۵ الگوهای XRD از نمونه‌های بدون کروم و حاوی ۳٪Cr نشان داده شده است. الگوهای XRD بیانگر وجود فاز آستنیت و کاربیده‌های منگنز از نوع Mn_۳C در ساختار نمونه‌ی بدون کروم و فاز آستنیت و کاربیده‌های کمپلکس (Fe,Mn,Cr)_۳C_۶ در ساختار نمونه‌ی حاوی ۳٪Cr می‌باشد. باتوجه به کاربیدزا بودن کروم، ملاحظه می‌شود که در نمونه‌ی حاوی ۳٪Cr، کروم هم منجر به تشکیل کاربید کمپلکس شده و هم به میزان کاربیده‌ها افزوده است که این موارد بخوبی در شکل ۵ قابل مشاهده هستند.

آزمایش کشش تک محوره توسط دستگاه SANTAM مدل STM-۴۰۰ با ظرفیت ۴۰ تن در دمای اتاق و با سرعت فک ۱۰^{-۲}S^{-۱} انجام شد. همچنین آزمایش ضربه شاریبی توسط دستگاه SANTAM با ظرفیت ۲۰۰ ژول در دمای محیط انجام شد. پس از پایان آزمایش های کشش و ضربه شاریبی، از سطح شکست نمونه‌های دارای بالاترین و کمترین چقرمگی و انرژی ضربه، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ تصاویری تهیه شد.

بدلیل دشواری‌های خاص آزمایشگاهی، تعیین مستقیم چقرمگی شکست بسهولت امکان پذیر نمی‌باشد. در تحقیق حاضر از یک روش نیمه‌تجربی برای محاسبه چقرمگی شکست فولاد هادفیلد پرکربن با توجه به اطلاعات موجود در آزمایش ضربه شاریبی استفاده می‌شود. بارسام و رالف^[۲۴] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی که بر روی ۸ نوع فولاد با استحکام تسلیم بین ۱۷۰۰-۲۷۰۰ مگاپاسکال انجام دادند، معادله زیر را برای محاسبه‌ی K_{IC} در تمام دماهای مورد آزمایش در آزمایش ضربه شاریبی پیشنهاد دادند:

$$K_{IC} = \sqrt{E'V} \times (CVN)^{0.72} \quad (1)$$

که در آن چقرمگی شکست (K_{IC}) برحسب MPa. \sqrt{m} و انرژی ضربه شاریبی (CVN) برحسب ژول است. لذا با توجه به قرارگیری استحکام تسلیم فولاد هادفیلد در محدوده‌ی ۱۷۰۰-۲۷۰۰ مگاپاسکال، در این پژوهش برای محاسبه‌ی چقرمگی شکست فولاد هادفیلد از رابطه‌ی ۱ استفاده شد. همچنین برای بررسی طول ترک بحرانی برای انواع ترک در فولاد هادفیلد پرکربن از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود [۲۵]:

$$K_{IC} = Y\sigma_f \sqrt{\pi a_c} \quad (2)$$

که در این رابطه Y ضریب اصلاح شکل ترک، K_{IC} چقرمگی شکست، σ_f استحکام شکست و a_c طول ترک بحرانی می‌باشد.

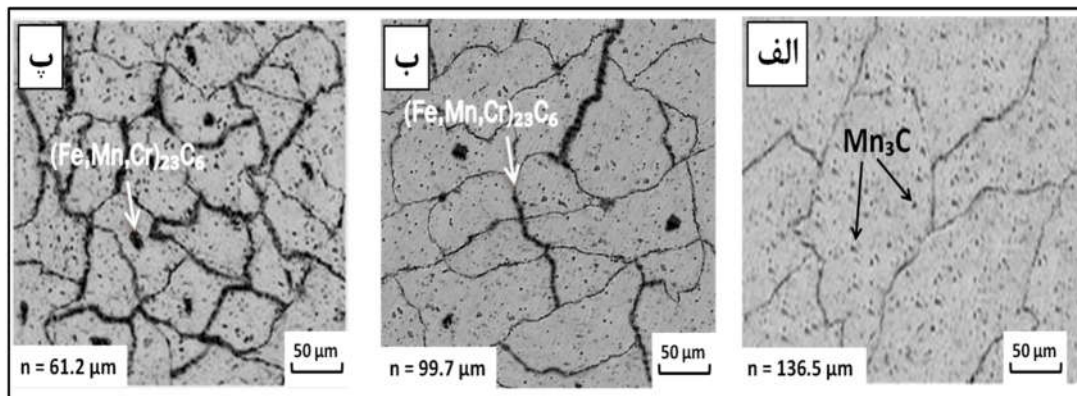
۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشاهدات ریزساختاری

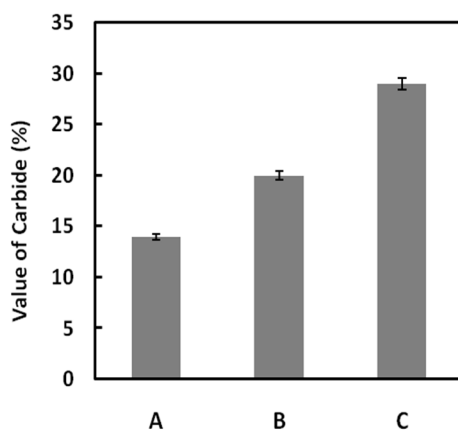
شکل ۳، تصاویر متالوگرافی تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری از فولاد هادفیلد مورد استفاده در این پژوهش را با مقادیر مختلفی از کروم، بعد از عملیات آستنیت‌ه و تندسرمایی در آب را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در هر سه نمونه‌ی مورد آزمایش، ریزساختارها دارای زمینه‌ی آستنیتی می‌باشند. وجود زمینه‌ی آستنیتی بدلیل حضور کربن و منگنز زیاد در ترکیب است. تعدادی از محققین [۲۶]، گزارش دادند که با افزایش منگنز در آلیاژهای Fe-Mn، دمای شروع مارتنزیت به میزان بسیار زیادی کاهش می‌یابد، بطوریکه در آلیاژهای پرمنگنز یک زمینه‌ی کاملاً آستنیتی را می‌توان مشاهده نمود. همانطور که از شکل ۳ ملاحظه می‌گردد، میزان کاربیده‌های تشکیل شده در نمونه‌ی بدون کروم، بسیار کمتر از کاربیده‌های تشکیل شده در نمونه‌های حاوی ۱/۵ و ۳٪Cr بوده و دارای دانه‌های آستنیت بزرگتری است. ولی در نمونه‌های حاوی ۱/۵ و ۳٪Cr ساختار ریزدانه‌تری بوجود آمده و میزان کاربیده‌ها افزایش یافته است. چون که کروم یک عنصر کاربیدزا بوده و در اثر افزودن کروم به فولاد هادفیلد، میزان کاربیده‌ها

1 Scanning Electron Microscopy (SEM)

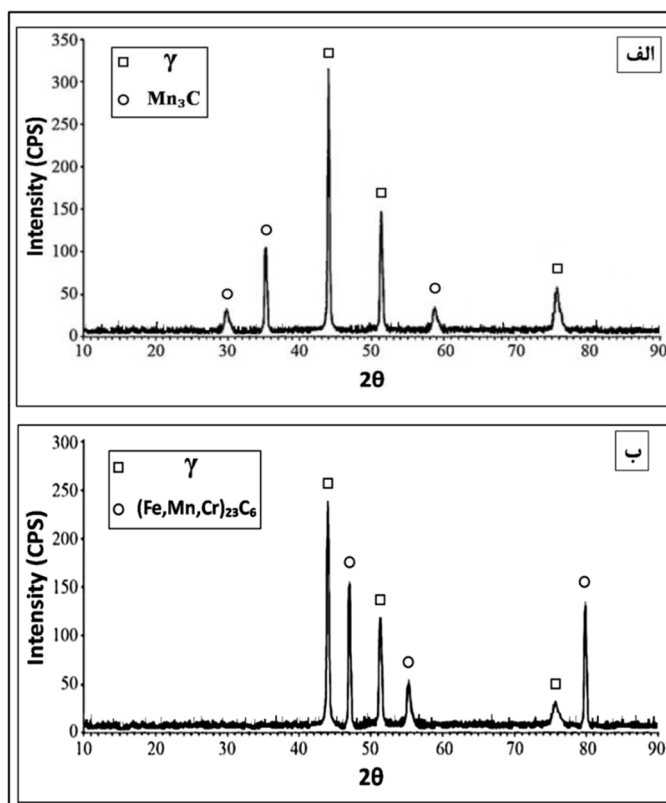
2 Barsom and Rolfe



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار: الف) نمونه‌ی بدون کروم (A)، ب) نمونه‌ی حاوی ۱٫۵٪Cr (B)، پ) نمونه‌ی حاوی ۳٪Cr (C)



شکل ۴- توزیع کاربید در نمونه‌های مختلف توسط نرم افزار Image J



شکل ۵- الگوهای XRD نمونه‌ی: الف) بدون کروم، ب) حاوی ۳٪Cr

۳-۳- آزمایش‌های سختی و ضربه

نتایج سختی‌سنجی برای هر سه نمونه‌ی مورد آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطور که از این جدول ملاحظه می‌گردد، با افزایش میزان کروم در ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد، سختی نیز افزایش می‌یابد. زیرا همانطور که در تصاویر متالوگرافی مشاهده گردید، حضور کروم باعث ایجاد کاربیدهای کمپلکس $(Fe, Mn, Cr)_{23}C_6$ در ساختار فولاد هادفیلد می‌شود و همین امر منجر به افزایش سختی شده است که این نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از پژوهش‌های دیگران همخوانی دارد [۱۵ - ۱۳].

جدول ۲- نتایج آزمایش‌های سختی و ضربه شاری با حداقل سه بار تکرار

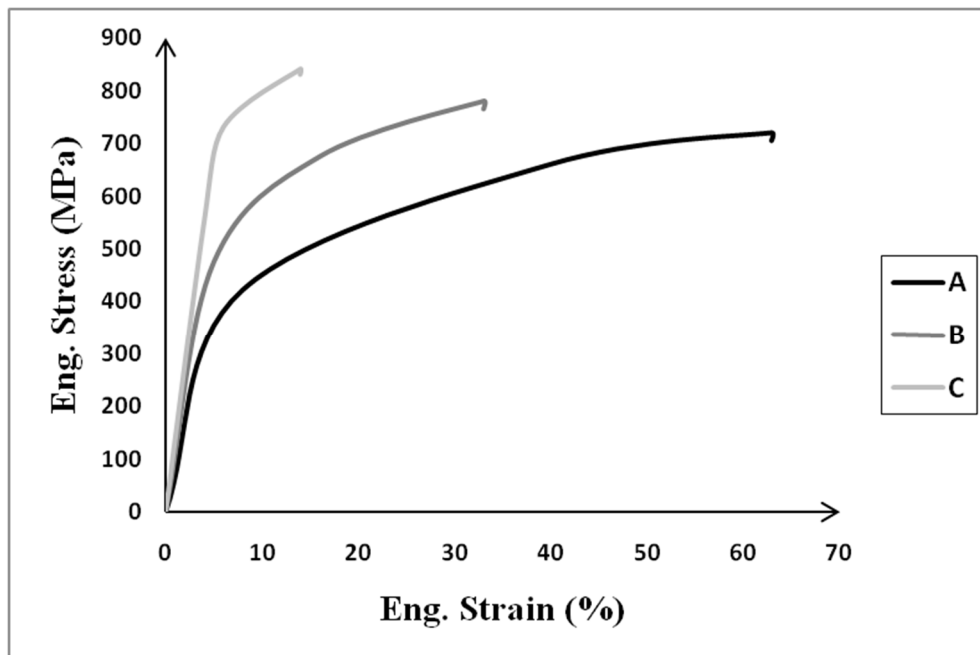
کد نمونه	میزان کروم برحسب درصد وزنی	آزمایش سختی		آزمایش ضربه	
		میزان سختی (HV)	انحراف معیار	انرژی ضربه (J)	انحراف معیار
A	۰	۱۷۳	۳/۱۹	۱۱۰	۴/۰۲
B	۱/۵	۲۴۲	۳/۵۷	۸۱	۲/۷۴
C	۳	۳۰۴	۲/۳۹	۵۵	۳/۹۱

نتایج مربوط به آزمایش ضربه شاری در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطور که در این جدول هم مشاهده می‌گردد، با افزایش مقدار کروم در ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد، انرژی ضربه نیز کاهش یافته است. بگونه‌ای که نمونه‌ی بدون کروم و نمونه‌ی حاوی ۳٪ Cr، برترتیب

بالاترین و کمترین انرژی ضربه را دارا هستند. علت این امر حضور مقادیر بالای کاربیدهای کمپلکس $(Fe, Mn, Cr)_{23}C_6$ در نمونه‌ی حاوی ۳٪ Cr و کاهش قابلیت تغییر شکل مومسان زمینه‌ی آستنیت در نمونه‌های حاوی کروم می‌باشد که این ذرات کاربیدی به خوبی در تصاویر متالوگرافی قابل مشاهده می‌باشند (شکل ۳).

۳-۴- آزمایش کشش

در شکل ۶ نتایج مربوط به آزمایش کشش برای هر سه نمونه‌ی مورد آزمایش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه‌ی بدون کروم (A) از استحکام تسلیم و کششی پائین‌تر و کرنش شکست بالاتری نسبت به نمونه‌های حاوی ۱/۵٪ Cr (B) و ۳٪ Cr (C) برخوردار است. با افزایش میزان کروم در فولاد هادفیلد، حجم ذرات کاربید کمپلکس $(Fe, Mn, Cr)_{23}C_6$ افزایش و اندازه‌ی دانه‌ها کاهش می‌یابد. کوچک شدن اندازه‌ی دانه‌ها منجر به افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی شده [۲۷] و افزایش میزان ذرات کاربیدی منجر به کاهش انعطاف‌پذیری و کرنش شکست می‌گردد [۲۵]. همانطور که در تصاویر متالوگرافی مشاهده گردید، با افزایش کروم در ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد، اندازه‌ی دانه‌ها کوچکتر و تعداد مرزخانه‌ها بیشتر شده است. مرزخانه‌ها محل‌های پراثری بوده و نابجایی‌های متحرک در هنگام رسیدن به این مکان‌های پراثری متوقف شده و در پشت مرزخانه‌ها تجمع می‌کنند و همین امر منجر به افزایش استحکام می‌گردد. بنابراین کروم با ایجاد کاربیدهای کمپلکس $(Fe, Mn, Cr)_{23}C_6$ منجر به افزایش استحکام و کاهش کرنش شکست در فولاد هادفیلد گردیده است.



شکل ۶- نمودار تنش - کرنش مهندسی آلیاژهای مختلف

۳-۵- محاسبه‌ی چقرمگی شکست

جدول ۳ محاسبات مورد نیاز برای تعیین چقرمگی شکست و طول ترک بحرانی را با استفاده از فرمول‌های ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین چقرمگی شکست به نمونه‌ی بدون کروم (A) رسیده است. چرا که نمونه‌ی بدون کروم دارای میزان ذرات کاربیدی کمتری بوده و زمینه‌ی آن نسبت به زمینه‌ی نمونه‌های حاوی ۱.۵ و ۳٪Cr قابلیت تغییر شکل مومسان بیشتری داشته و از انرژی شکست بالاتری برخوردار است. همانطور که در قسمت تحلیل نتایج آزمایش کشش گفته شد، اگرچه حضور کروم در فولاد هادفیلد باعث افزایش استحکام تسلیم و کششی می‌شود، اما از طرفی هم باعث افزایش میزان ذرات کاربیدی شده و از این طریق هم باعث کاهش مقاومت به ضربه و چقرمگی شکست در فولاد هادفیلد می‌گردد. در مجموع، محاسبات چقرمگی شکست نشان می‌دهد که حضور کروم در فولاد هادفیلد منجر به کاهش چقرمگی شکست در این فولاد می‌گردد. همچنین با محاسبه‌ی طول ترک بحرانی بوسیله‌ی رابطه (۲)، مشاهده می‌شود که کروم منجر به کاهش طول ترک بحرانی برای انواع ترک شده است و این موضوع در وقوع شکست می‌تواند بسیار تأثیرگذار باشد. از طرفی محاسبات نشان می‌دهد که مقدار طول ترک بحرانی برای ترک سطحی نسبت به ترک مرکزی در هر سه نمونه کمتر است که نشان دهنده‌ی خطرناک بودن ترک‌های سطحی نسبت به ترک‌های مرکزی می‌باشد. در مجموع در هر سه نمونه‌ی مورد آزمایش، بیشترین

طول ترک بحرانی به ترک دایره‌ای و کمترین طول ترک بحرانی به ترک سطحی تعلق گرفت. بدون شک بین مقادیر محاسبه شده برای چقرمگی شکست با مقدار واقعی چقرمگی شکست نمونه‌ها اختلافاتی وجود دارد [۱۸]. اما یکی از ساده‌ترین و کم هزینه‌ترین راه‌ها برای تأثیر ریزساختار بر مکانیک شکست فولادها، استفاده از روابط تجربی بین مقادیر انرژی ضربه شاریپی و چقرمگی شکست می‌باشد.

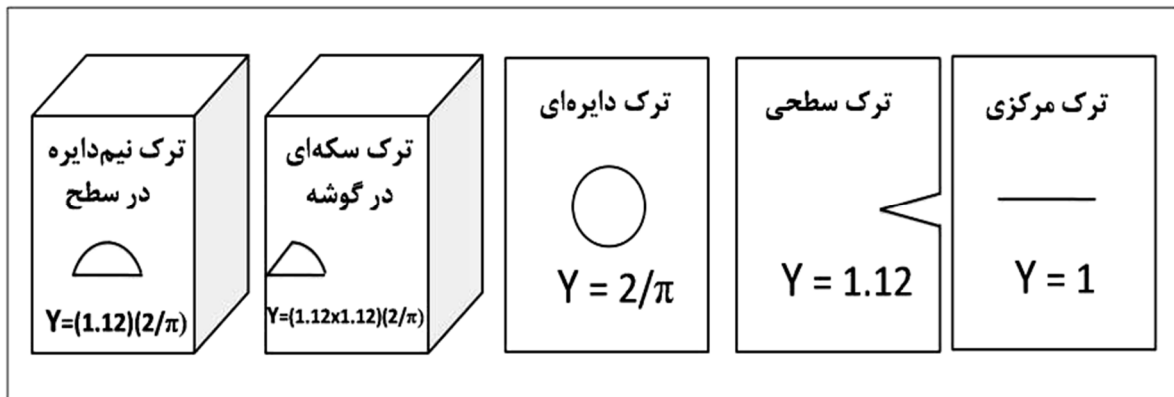
۳-۶- شکست‌نگاری سطوح شکست

پس از آزمایش کشش مشخص شد که نمونه‌ی بدون کروم و نمونه‌ی حاوی ۳٪Cr بترتیب بیشترین و کمترین کرنش شکست را دارا هستند. لذا پس از آزمون کشش از سطح شکست نمونه‌های بدون کروم و حاوی ۳٪Cr توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصاویری تهیه شده و در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که از این تصاویر دیده می‌شود، نمونه‌ی بدون کروم (A) دارای مشخصه‌ی شکست نرم (سطح دیمپلی) می‌باشند. دلیل این امر آن است که زمینه‌ی غالب در این نمونه آستنیت بوده و آستنیت هم یک فاز نرم می‌باشد. مکانیسم شکست نرم در آزمایش کشش مواد نرم، مکانیسم جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها است.

جدول ۳- محاسبه چقرمگی شکست و طول ترک بحرانی

نمونه	CVN (J)	K_{IC} (MPa.(m) ^{0.5})	a_c (m)		
			ترک سطحی	ترک مرکزی	ترک دایره‌ای
A	۱۱۰	۱۶۳.۷	۰.۰۰۶	۰.۰۰۷	۰.۰۱۷
B	۸۱	۱۳۵	۰.۰۰۳	۰.۰۰۴	۰.۰۰۹
C	۵۵	۱۰۵.۸	۰.۰۰۲	۰.۰۰۳	۰.۰۰۶

* مقادیر ضریب اصلاح شکل ترک (Y)، در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷- مقادیر ضریب اصلاح شکل ترک برای انواع ترک [۲۵]

شکست ترد اتفاق افتاده در این نمونه می‌باشد. زیرا در این نمونه میزان رسوبات کاربیدی در ساختار و بویژه در مرزدانه‌ها بیشتر بوده و همین امر هم باعث شده است که دچار شکست ترک گردد. با مقایسه‌ی هر

مهمترین مکانیسم در شکست مواد نرم به شمار می‌آید. اما در نمونه‌ی حاوی ۳٪Cr (C)، سطح شکست مشاهده شده صاف بوده که نشان از

در مقابل نمونه‌ی حاوی $3\%Cr$ ، بدلیل داشتن مقادیر بالای ذرات کاربید کمپلکس $(Fe, Mn, Cr)_3C$ ، انعطاف پذیری و چقرمگی کمتری داشته و این امر منجر به رشد سریع ترک و کاهش مومسانی منطقه جلوی نوک ترک شده است.

درمجموع تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی دلالت بر این دارند که افزایش کروم در ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد منجر به کاهش چقرمگی شکست شده و همچنین مود شکست را از حالت نرم به حالت ترد تبدیل می‌کند.

۴- نتیجه گیری

در مطالعه‌ی حاضر به بررسی تأثیر کروم بر چقرمگی شکست فولاد هادفیلد با استفاده از آزمایش ضربه شاری پراخته شد. برای این منظور ابتدا سه نمونه از فولاد هادفیلد با مقادیر مختلفی از کروم ($0\%Cr$ ، $1\%Cr$ و $3\%Cr$) توسط کوره القایی بدون هسته ریخته‌گری شد. سپس هر سه نمونه تحت عملیات حرارتی آستنیت‌دهی در دمای $1100^\circ C$ به مدت ۲ ساعت قرار گرفته و بلافاصله در آب سرد شدند. سپس آزمایش‌های کشش، ضربه شاری، سختی‌سنجی و مشاهدات میکروسکوپی بر روی آنها اعمال شد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که:

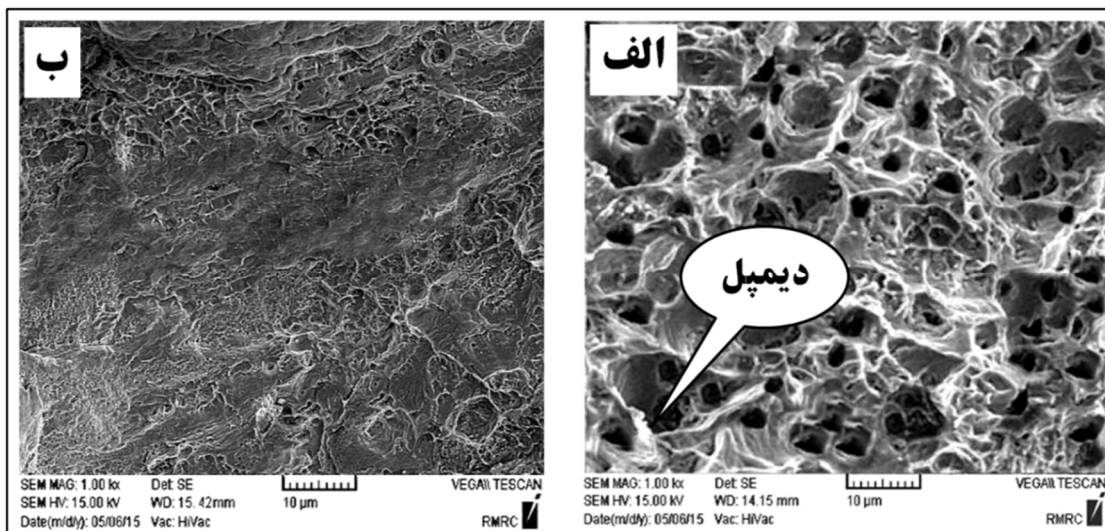
- ۱- با بررسی نتایج آزمایش ضربه شاری و محاسبات تجربی چقرمگی شکست برای فولاد هادفیلد حاوی 0% ، 1% و $3\%Cr$ مشخص گردید که فولاد هادفیلد بدون کروم از بالاترین چقرمگی شکست برخوردار است. زیرا نمونه‌ی بدون کروم نسبت به نمونه‌های حاوی کروم دارای میزان کاربید کمتر و قابلیت تغییر شکل مومسان بیشتری بود. همچنین محاسبات نشان داد که فولاد هادفیلد حاوی $1\%Cr$ ، ترکیب مناسبی بطور همزمان از استحکام و چقرمگی شکست را دارد.
- ۲- نتایج آزمایش‌های کشش و سختی‌سنجی دلالت بر افزایش استحکام، سختی و همچنین کاهش کرنش شکست فولاد هادفیلد در اثر افزایش میزان کروم در ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد داشتند. چون افزایش کروم منجر به افزایش میزان کاربیدها و متعاقباً ریز شدن دانه‌ها در ریزساختار شده بود.

دو تصویر، مشاهده می‌شود که سطح شکست نمونه‌ی بدون کروم (A) نسبت به نمونه‌ی حاوی $3\%Cr$ (C) دارای تعدادی دیپل بوده که دارای عمق بالایی هم هستند و نشان از نرم بودن شکست در نمونه‌ی بدون کروم دارد. عمق دیپل متناسب با چقرمگی شکست ماده است و هر چه عمق دیپلها بیشتر باشد، چقرمگی شکست ماده نیز بیشتر خواهد بود [۲۵].

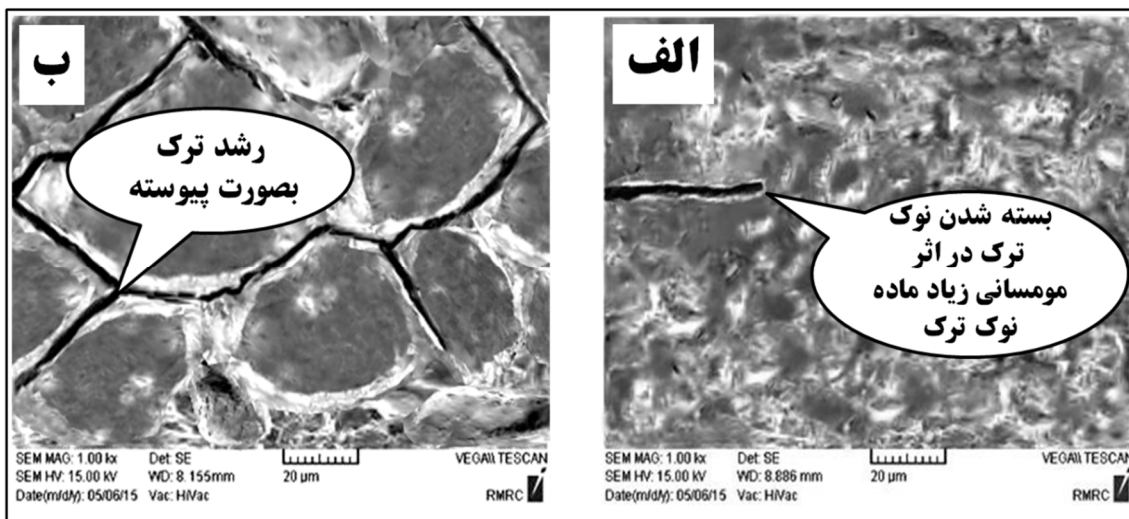
با توجه به اینکه کاهش کسر حجمی ذرات رسوبی و پراکنده و افزایش فاصله‌ی این ذرات به عنوان یک فرآیند ذاتی در جهت چقرمه‌کردن آلیاژهای مهندسی عمل می‌کند [۲۵]، حال با مشاهده‌ی سطوح شکست نمونه‌ها پس از آزمایش کشش ملاحظه می‌گردد که نمونه‌ی بدون کروم که دارای میزان ذرات رسوبی کمتری نسبت به نمونه‌ی حاوی $3\%Cr$ است، دارای سطح شکستی نرم تر و با تعداد دیپل بیشتر است که نشان از چقرمگی بالاتر نمونه‌ی بدون کروم دارد. در مجموع مشاهدات سطوح شکست نمونه‌ها پس از آزمون کشش نشان از چقرمگی شکست بالاتر نمونه‌ی بدون کروم نسبت به نمونه‌ی حاوی $3\%Cr$ دارد که این مشاهدات با نتایج حاصل از آزمایش کشش و محاسبات چقرمگی شکست، همخوانی دارد. همچنین شکست نگاری نمونه‌های آزمایش کشش نشان می‌دهد که در نمونه‌ی بدون کروم، میکرودیپل‌های ثانویه در فضای بین دیپل‌های اولیه حضور دارند که می‌توانند شکست را به تأخیر بیاورند. این میکرودیپل‌ها در اثر برهمکنش و برخورد لایه‌های میکروذوقلوبی و نیز ایجاد نانوسوبات کاربیدی در اثر پیرسازی کرنشی دینامیکی می‌توانند ایجاد شوند [۲۸].

این نوع شکست که به شکست فنجان - مخروط^۱ معروف است، پس از آزمایش ضربه شاری مشخص شد که نمونه‌ی بدون کروم و نمونه‌ی حاوی $3\%Cr$ برتیب بیشتری و کمترین انرژی ضربه را دارا هستند. شکل ۹ تصاویر SEM از سطح شکست هر دو نمونه‌ی بدون کروم و حاوی $3\%Cr$ را پس از آزمایش ضربه شاری نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود ترک ایجاد شده در نمونه‌ی حاوی $3\%Cr$ نسبت به نمونه‌ی بدون کروم، دارای طول بیشتری می‌باشد. در نمونه‌ی بدون کروم، در سطح شکست، ترک با طول کمتر مشاهده می‌گردد. اما در نمونه‌ی حاوی $3\%Cr$ ترک بصورت پیوسته به میزان زیادی رشد کرده است که این پدیده به علت تضعیف سهم کرنش ذوقلوبی در تغییر شکل مومسان آستنیت است. حضور کروم سبب کاهش غلظت کربن محلول در زمینه و کاهش اکتویته ذوقلوبی در تغییر شکل مومسان می‌شود.

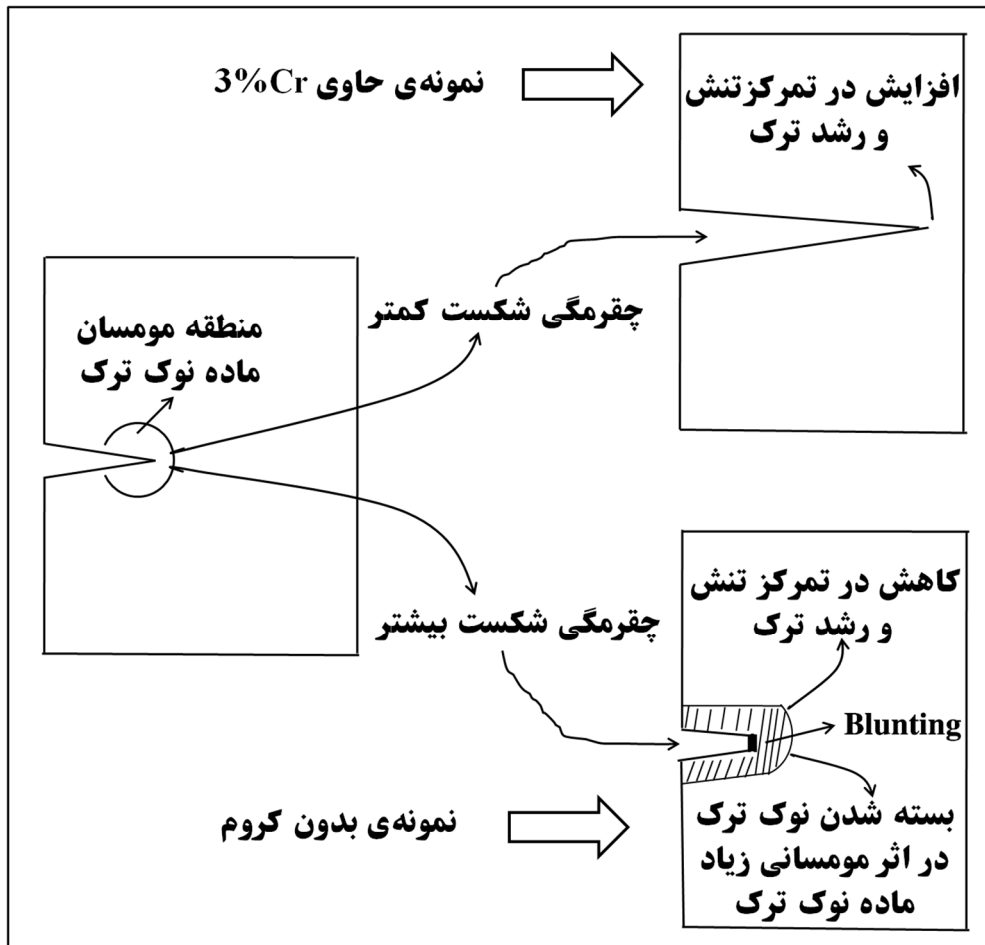
اما با وجود محاسبات طول ترک بحرانی برای هر سه نمونه، انتظار می‌رفت که در نمونه‌ی بدون کروم نسبت به نمونه‌ی حاوی $3\%Cr$ ، ترک به میزان بیشتری رشد کند (بدلیل طول ترک بحرانی بیشتر). اما با مشاهده‌ی تصاویر SEM، ملاحظه می‌گردد که ترک در نمونه‌ی بدون کروم به میزان کمی رشد کرده است. این پدیده در اثر چقرمگی بالاتر نمونه‌ی بدون کروم نسبت به نمونه‌ی حاوی $3\%Cr$ رخ داده است. یکی از مکانیسم‌های حفاظتی رأس ترک، بسته شدن دهانه‌ی ترک در اثر مومسانی می‌باشد (شکل ۱۰) [۲۷]. لذا چقرمگی بالاتر نمونه‌ی بدون کروم منجر به افزایش مومسانی منطقه‌ی جلوی نوک ترک شده و در نهایت منجر به بسته شدن دهانه ترک و توقف رشد ترک شده است.



شکل ۸- تصاویر SEM از سطح شکست نمونه‌ها پس از آزمون کشش: الف) نمونه‌ی A، ب) نمونه‌ی C



شکل ۹- تصاویر SEM از سطح شکست نمونه‌ها پس از آزمایش ضربه شاریپی: الف) نمونه‌ی A، ب) نمونه‌ی C



شکل ۱۰- طرحواره از نحوه تأثیر میزان چقرمگی ماده نوک ترک بر تمرکز تنش و رشد ترک (مکانیسم بسته شدن ترک در اثر مومسانی) [۲۵]

۶- نمادها

انرژی ضربه (J)	CVN
تنش مهندسی (MPa)	Eng. Stress
کرنش مهندسی (%)	Eng. Strain
چقرمگی شکست $(Mpa(m)^{0.5})$	K _{IC}
طول ترک بحرانی (m)	a _c

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, Metall. Res. Technol., Vol. 111, 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.

[۵] نجف آبادی و، مناجاتی زاده ح. و امینی ک، بررسی تأثیر تیتانیوم بر بهبود خواص فولاد هادفیلد ASTM A128-C، فصلنامه علمی پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۷، شماره اول، صفحات ۵۴ - ۴۵، ۱۳۹۲.

[6] Srivastava A. K. and Das K., In-situ Synthesis and Characterization of TiC-Reinforced Hadfield Manganese

۳- مشاهدات SEM از سطح شکست نمونه‌ها پس از آزمایش ضربه شاری مشخص نمود که استفاده از کروم در ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد، شرایطی را برای رشد پیوسته و سریع ترک فراهم می‌کند. در مقابل در نمونه‌ی بدون کروم بدلیل داشتن قابلیت بیشتر تغییر شکل مومسان ماده نوک ترک، ترک به میزان کمتری رشد کرده بود و مکانیسم بسته شدن ترک در اثر مومسانی زیاد اتفاق افتاد. همچنین مشاهدات SEM از سطح شکست نمونه‌ها پس از آزمایش کشش نشان داد که افزایش کروم در ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد، مود شکست را از حالت نرم به حالت ترد تبدیل می‌کند.

۴- الگوهای پراش پرتو ایکس نشان دادند که کروم هم میزان کاربیدی را افزایش می‌دهد و هم منجر به تولید کاربیدهای کمپلکس $(Fe,Mn,Cr)_{23}C_6$ می‌شود.

۵- با بررسی مقادیر طول ترک بحرانی در هر سه نمونه‌ی حاوی ۰،۵، ۱/۵ و ۳٪Cr، مشخص شد که بیشترین طول ترک بحرانی به ترک دایره‌ای و کمترین طول ترک بحرانی به ترک سطحی تعلق دارد.

۵- سپاس‌گزاری

بدینوسیله نویسندگان این مقاله مراتب سپاسگزاری را از باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان واحد دزفول بدلیل حمایت‌های مالی که از این پروژه انجام داده است را بجا می‌آورند.

[26] Lee Y.K. and Choi C.S., Driving force for $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensitic transformation and stacking fault energy of γ in Fe-Mn binary system, Metall. Mater. Trans. A, Vol. 31, No. 2, pp. 355-360, 2000.

[27] Astafev A.A., 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.

[28] عباسی م. و همکارانش، ارزیابی مکانیزم شکست در فولاد هادفیلد، مجموعه مقالات ششمین همایش مشترک انجمن مهندسیین متالورژی و انجمن علمی ریخته گری ایران، تهران، ایران، ص ۹-۱، ۱۳۹۱.

Austenitic Steel Matrix Composite, Iron and Steel Institute of Japan Int., 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, O. J. Metal, Vol. 5, No. 2, pp. 11-17, 2015.

[۸] خیاط م.، خیراندیش ش. و عباسی م.، تاثیر آلومینیم 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 ریخته گری ایران، سمنان، ایران، ص ۵-۱، 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, J. Mater. Sci. Technol., Vol. 12, No. 5, pp. 369-372, 1996.

[10] Hosseini SH. And et al., Optimization of heat treatment due to austenising temperature, time and quenching solution in Hadfield steels, World Academy Sci. Eng. Technol., Vol.7, No. 7, pp. 1940-1943, 2013.

[11] 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, No. 10, pp. 1421-1424, 2011.

[12] Moghaddam E.G., Varahram N. and Davami P., On the comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of high-vanadium austenitic manganese steels with the Hadfield steel, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 532, No. 35, pp. 260-266, 2011.

[13] 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, J. Miner. Mater. Charact. Eng., Vol. 1, No. 1, pp. 24-28, 2013.

[14] Lindroos M. and et al., The deformation, strain hardening, and wear behavior of chromium-alloyed Hadfield steel in abrasive and impact conditions, Tribol. Lett., Vol. 57, No. 24, pp. 1-11, 2015.

[15] El-Mahallawi I., Abdel-karim A. 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.

[16] Lindroos M. and et al., The Deformation, Strain Hardening, and Wear Behavior of Chromium-Alloyed Hadfield Steel in Abrasive and Impact Conditions, Tribol Lett Vol. 57, No. 24, pp.1-11, 2015.

[17] Tęcza G., Sobula S., Effect of Heat Treatment on Change Microstructure of Cast High-manganese Hadfield Steel with Elevated Chromium Content, archives of foundry engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 67-70, 2014.

[18] Salemi Golezani A., The Effect of Microstructure on Estimation of the Fracture Toughness (K_{IC}) Rotor Steel Using Charpy Absorbed Energy (CVN), J. Advan. Mater. Proces., Vol. 1, No. 3, pp. 11-17, 2013.

[19] Kim S.H. and et al., Estimation of fracture toughness transition curves of RPV steels from Charpy impact test data, Nuclear Eng. Des., Vol. 212, pp. 49-57, 2002.

[20] Annual book of ASTM 128 A / 128 M, Standard specification for steel castings, austenitic manganese, Engineered Casting Solutions Since, Vol. 1, pp. 1-3, 1980.

[21] Annual book of ASTM E92-82, Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials, ASTM International, pp. 1-9, 2003.

[22] Annual book of ASTM E8 / E8M-15a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, Vol. 03.01, 2015.

[23] Annual book of ASTM A370-14, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM International, Vol. 20-29, 2014.

[24] Barsom J.M., Rolfe S.T., Correlations between K_{IC} and Charpy V-notch test results in the transition-temperature range, ASTM STP 466, pp. 281-302, 1970.

[۲۵] هرتزبرگ ر. د.، اکرامی ع.ا. (مترجم)، تغییر شکل و مکانیک شکست مواد و آلیاژهای مهندسی، چاپ اول، دانشگاه صنعتی شریف، موسسه انتشارات علمی، ۱۳۸۲.