

تأثیر رسوب‌های غنی از کروم بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن فریتی Fe-23Cr-2.4Mo

خدیدجه فرجام حاجی آقا^۱، علیرضا اکبری^۲، رقیه محمدزاده^۳

۱. کارشناس ارشد مهندسی مواد دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی سهند، kh_farjam@sut.ac.ir

۲. دانشیار دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی سهند akbari@sut.ac.ir

۳. استادیار گروه مهندسی مواد دانشکده مهندسی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان r_mohammadzadeh@sut.ac.ir

Cr-rich precipitates impact on microstructure and mechanical properties of Fe-23Cr-2.4Mo ferritic stainless steel

Kh. Farjam Hajiagha¹, A.R. Akbari², R. Mohammadzadeh³

1. Master of Science, Materials Engineering, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, E-Mail: kh_farjam@sut.ac.ir.

2. Associate Professor, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, E-Mail: akbari@sut.ac.ir.

3. Assistant Professor, Materials Engineering Group, Faculty of Engineering, Azarbayjan Shahid Madani University, E-Mail: r_mohammadzadeh@sut.ac.ir.

چکیده

در تحقیق حاضر تأثیر رسوب‌های غنی از کروم بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن فریتی Fe-23Cr-2.4Mo مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور نمونه‌های تهیه شده از این فولاد تحت عملیات همگن‌سازی در دمای 1100°C به مدت زمان ۴۸ ساعت قرار گرفتند و پس از اتمام عملیات همگن‌سازی در کوره سرد شدند. نتایج بررسی‌های ریزساختاری و ترمودینامیکی نشان داد که به علت پایین بودن سرعت سرمایش پس از عملیات همگن‌سازی رسوب‌های غنی از کروم در ساختار فولاد تشکیل می‌شوند. برای انحلال رسوب‌های تشکیل شده، تعدادی از نمونه‌های فوق تحت عملیات محلولی در دماهای 1100°C و 1150°C به مدت زمان ۵ ساعت قرار گرفتند و سپس در آب سرد شدند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که بعد از عملیات آنیل محلولی در دمای 1100°C همه رسوب‌های تشکیل شده حل نمی‌شوند ولی در دمای 1150°C تمامی رسوب‌ها در زمینه فریتی حل شده و به علت بالا بودن سرعت سرمایش پس از عملیات محلولی این رسوب‌ها دیگر تشکیل نمی‌شوند. نتایج حاصل از بررسی‌های فازی و ریزسختی سنجی نشان داد که انجام عملیات محلولی در دمای 1150°C باعث افزایش پارامتر شبکه فاز فریت از 2.880 \AA به 2.893 \AA و همچنین افزایش سختی آن از ۲۱۱ به ۳۱۷ ویکرز علی‌رغم افزایش اندازه دانه می‌شود. این نتایج انحلال رسوب‌ها در زمینه فریتی را تأیید می‌کند. واژه‌های کلیدی: فولاد زنگ‌نزن فریتی، رسوب‌های غنی از کروم، پارامتر شبکه، سختی، اندازه دانه.

Abstract

In this study, Influence of formation of Cr-rich precipitates on microstructure and mechanical properties of Fe-23Cr-2.4Mo ferritic stainless steel has been investigated. In this regard, samples of this steel were homogenized at 1100°C for 48 hours and then were cooled in furnace. Microstructure, phase composition, and hardness of the samples were investigated using optical and scanning electron microscopes, X-ray diffraction and micro-hardness measurements. Results of microstructural observations and thermodynamic evaluations showed that Cr-rich precipitates are formed in the steel microstructure due to slow cooling after homogenizing treatment. In order to dissolve the Cr-rich precipitates; formed during slow cooling, a number of samples were subjected to solution treatments at 1100°C , 1150°C for 5 hours and then were quenched in water. Results showed that at temperature of 1100°C precipitates are not dissolved entirely but at 1150°C they are dissolved completely. After solution treatment at 1150°C followed by water quenching no longer precipitation is took place due to the fast cooling rate. Results of phase analysis and microhardness measurements showed that solution treatment at 1150°C lead to increase of ferrite lattice parameter from 2.880 \AA to 2.893 \AA and also enhancement hardness from 211 to 317 Vickers despite an increase in ferrite grain size. These results confirm dissolution of Cr-rich precipitates in the ferrite matrix.

Keywords: Ferritic stainless steel, Cr-rich precipitates, Lattice parameter, Hardness, Grain size.

(کد: ۹۱۱۰۶۲)

با ضخامت ۲/۲ میلی متر افزایش یافته و در دمای 1100°C به طور کامل حل می‌شوند. این امر باعث بهبود مقاومت به خوردگی، افزایش تافنس ضربه از ۰ تا ۱۸۰ ژول بر سانتی متر مربع و کاهش سختی ماکروسکوپی از ۲۵۷ به ۲۰۵ برینل شده است (Qu et al., 2012).

فولادهای کروم و مولیبدن دار با ترکیب

Fe-(18-25)Cr-(1-2)Mo در کاربردهایی نظیر محفظه‌های احتراق، افشانک‌ها، کلاک دودکش‌ها، زه‌های اتومبیل و بست‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (Smith, 1993). مقاطع نازکی از فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی را می‌توان با عملیات نیتروژن‌دهی این فولادها تولید کرد. اما تشکیل فازهای غنی از کروم عمدتاً در نواحی مرز دانه ای باعث کاهش چقرمگی در کاربردهای مکانیکی و یا ایجاد مشکل در نیتراسیون این فولادها می‌شوند. هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر عملیات محلولی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن فریتی Fe-23Cr-2.4Mo و تعیین شرایط مناسب برای انحلال رسوب‌های غنی از کروم و اجتناب از تشکیل مجدد آنها است.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از فولاد زنگ‌نزن فریتی Fe-23Cr-2.4Mo استفاده شد که ترکیب شیمیایی آن (برحسب درصد وزنی) در جدول ۱ ارایه شده است. ابتدا این فولاد توسط ذوب القایی در اتمسفر آرگون تولید شد و سپس عملیات ذوب مجدد تحت سرباره الکتریکی 5° به منظور حصول ترکیب شیمیایی یکنواخت و حذف ناخالصی‌ها در شمش اولیه انجام شد (Mohammadzadeh, Akbari, 2013). ضخامت شمش تولید شده به ابعاد $8 \times 6 \text{ cm}$ با انجام عملیات نورد داغ در دمای 1100°C طی ۵ پاس به ۱ cm کاهش یافت. برای انجام عملیات همگن‌سازی نمونه‌هایی به ابعاد $1 \text{ cm} \times 1/5 \times 1/5$ از ورق فولادی برش داده شده و همگن‌سازی نمونه‌های مورد آزمایش با آنیل کردن در دمای 1100°C به مدت زمان ۴۸ ساعت انجام شد و پس از اتمام عملیات همگن‌سازی نمونه‌ها در کوره سرد شدند. در ادامه مقاله این نمونه‌ها با نماد H نامگذاری شده‌اند. سپس عملیات محلولی با آنیل کردن تعدادی از نمونه‌های H در دماهای 1100°C و 1150°C به مدت زمان ۵ ساعت انجام شد. پس از انجام عملیات محلولی به منظور جلوگیری از تشکیل رسوب‌ها در حین سرد کردن، نمونه‌ها در آب کوئنچ شدند. این نمونه‌ها به ترتیب با نماد SA-1100 $^{\circ}\text{C}$ و SA-1150 $^{\circ}\text{C}$ نامگذاری شده‌اند.

سطح مقطع نمونه‌ها پس از سنباده زنی و پولیش با استفاده از محلول آکوا^۱ (۵۰ میلی لیتر اسید کلریدریک، ۲۵ میلی لیتر اسید نیتریک،

فولادهای زنگ‌نزن فریتی در بسیاری از فرآیندهای تولید در صنایع شیمی و پتروشیمی استفاده می‌شوند. مزیت اصلی این فولادها نسبت به فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی بالابودن مقاومت به خوردگی تنش‌ی این فولادها است (Tavares, Souza, Herculano, Abreu, Souza Jr, 2008). فولادهای زنگ‌نزن فریتی اساساً آلیاژهای آهن-کروم با بیش از ۱۲ درصد وزنی کروم می‌باشند و مقدار کربن آنها کمتر از ۰/۱۲ درصد وزنی است. این فولادها به علت نداشتن نیکل، ارزان‌تر از فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی هستند (Smith, 1993). اما، فولادهای زنگ‌نزن فریتی حساس به پدیده تردی ناشی از رشد دانه (Sello, Stumpf, 2010; Van Zwieten, Bulloch, 1993)، تشکیل رسوب‌هایی مانند فاز لاوز^۱ (Sello, Stumpf, 2010; Yamá-moto et al., 2002)، فاز چی^۲، فاز سیگما^۳ (Park, Ahn, 2006; Qu et al., 2012) و فاز آلفاپرایم^۴ (Chun, Polonis, 1992; Grobner, 1973) هستند. رسوب‌های فاز لاوز، چی و سیگما بسته به ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن فریتی در محدوده دمایی $600-900^{\circ}\text{C}$ تشکیل می‌شوند (Guimarães, Mei, 2004; Park, Ahn, 2006; Sello, Stumpf, 2011; Steigerwald, 1977). رسوب‌های مذکور علاوه بر ایجاد تردی باعث کاهش مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ‌نزن فریتی نیز می‌شوند (Park, Ahn, 2006; Qu et al., 2012).

نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که حل شدن رسوب‌های فاز لاوز، چی و سیگما با انجام عملیات محلولی مناسب باعث بهبود تافنس ضربه (Qu et al., 2012; Sawatani et al. 1982; Sello, Stumpf, 2010) و مقاومت به خوردگی (Qu et al., 2012) فولادهای زنگ‌نزن فریتی می‌شود. پارامترهای عملیات محلولی نظیر دما و زمان تأثیر زیادی در حل شدن رسوب‌ها در ساختار فولاد و خواص آن دارد. نتایج تحقیقات انجام شده بر روی فولادهای زنگ‌نزن فریتی مختلف (Guimarães, Mei, 2004; Qu et al., 2012; Sawatani et al., 1982; Sello, Stumpf, 2010) نشان می‌دهد که با افزایش دمای عملیات محلولی، حلالیت رسوب‌ها افزایش می‌یابد. در تحقیقی که بر روی فولاد زنگ‌نزن فریتی AISI 446 با ضخامت ۴ میلی متر صورت گرفته، نشان داده شده است که فاز سیگما در این فولاد با آنیل در دماهای 900°C و 950°C به ترتیب در مدت زمان‌های ۴ و ۲ ساعت حل می‌شوند (Guimarães, Mei, 2004). در تحقیق دیگری گزارش شده است که در اثر افزایش دمای عملیات محلولی از 950°C به 1100°C به مدت زمان نیم ساعت حلالیت رسوب‌های فاز سیگما و فاز چی موجود در فولاد زنگ‌نزن فریتی Fe-27.4Cr-3.8Mo-2.1Ni

- 1- Laves phase
- 2- Chi phase
- 3- Laves phase
- 4- α' phase

5- Electroslag remelting treatment
6- Aqua solution

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده

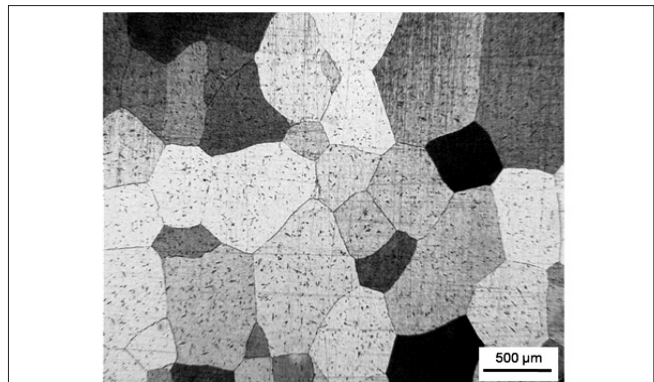
C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si
0.002≥	22/75	0.045	0.100	2/42	0.052
Cu	Al	N	P	S	Fe
0.50≥	0.05	0.030	0.010	0.007	balance

به منظور بررسی بیشتر ریزساختار نمونه H از نظر وجود رسوب، ریزساختار آن توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲ (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه H را نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که نمونه H شامل مقداری رسوب است که غالباً در مرزخانه‌ها توزیع شده‌اند. تصویر (ب) بزرگنمایی بالاتر قسمت مشخص شده از تصویر (الف) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در مرزخانه‌های این نمونه رسوب‌ها به صورت ناپیوسته تشکیل شده‌اند. (شکل ۲ (ب)). به منظور بررسی ترکیب شیمیایی این رسوب‌ها از آنالیز طیف نگاری توزیع انرژی استفاده شد. مشاهده می‌شود که این رسوب‌ها غنی از کروم بوده و حاوی ۷۷/۹۳ درصد کروم، ۱۷/۷۶ درصد وزنی آهن و ۴/۳ درصد مولیبدن می‌باشد (شکل ۳).

برای تعیین دقیق نوع رسوب تشکیل شده لازم است امکان تشکیل فازهای مختلف مطابق دیاگرام فازی در نظر گرفته شود. شکل ۴ نمودار فازی تعادلی سیستم آلیاژی Fe-2.4Mo-Cr که با نرم افزار ترموکلک رسم شده است را نشان می‌دهد. طبق این نمودار تنها فاز پایدار در محدوده دمایی ۸۵۰°C تا ۱۵۰۰°C فاز فریت است. با کاهش دما از ۸۵۰°C تا ۴۰۰°C فاز فریت ناپایدار شده و فاز سیگما رسوب می‌کند. در این محدوده دمایی فازهای فریت و سیگما دو فاز تعادلی می‌باشند. در دماهای زیر ۴۰۰°C فازهای تعادلی ممکن، فازهای فریت ۹، آلفاپرایم و مو ۱۰ هستند. با توجه به این نمودار می‌توان گفت که فاز غنی از کروم تشکیل شده در فولاد Fe-23Cr-2.4Mo مورد مطالعه در این تحقیق، فاز سیگما است.

نمونه فوق به دلیل اینکه بعد از خاتمه عملیات همگن‌سازی در دمای ۱۱۰۰°C به مدت زمان ۴۸ ساعت، در داخل کوره سرد شده است لذا وقت کافی برای تشکیل این رسوب‌ها به صورت تعادلی در آن فراهم بوده است. جهت اجتناب از تشکیل رسوب‌های فوق لازم است بعد از همگن‌سازی، این فولادها را سریع سرد کرد.

به منظور حل کردن رسوب‌های موجود در نمونه H عملیات آنیل محلولی انجام شد. دمای عملیات آنیل محلولی برای فولاد مورد مطالعه در این تحقیق طبق دیاگرام فازی ارائه شده در شکل ۴ در



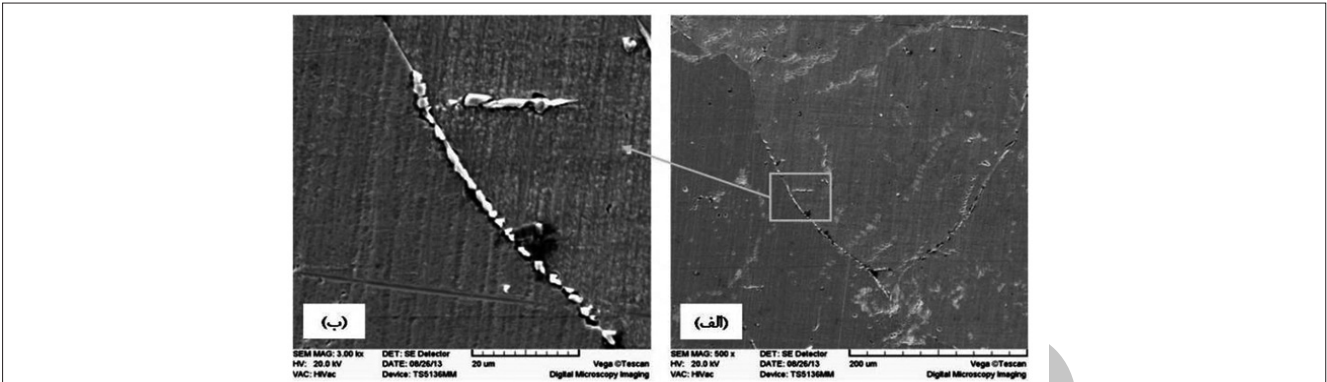
شکل ۱- تصویر ریزساختار میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی نمونه H.

۲۵ میلی لیتر آب) اچ شده و تحت بررسی ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل Olympus PMG3 و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۷ مدل CamScan MV2300 مجهز به سیستم آنالیز شیمیایی طیف نگاری توزیع انرژی^۸ مدل Oxford قرار گرفتند. آنالیز شیمیایی طیف نگاری توزیع انرژی به منظور شناسایی عناصر موجود در رسوب‌ها انجام گرفت. به منظور تعیین ساختار فازی نمونه‌ها از دستگاه پراش سنخ اشعه ایکس مدل Bruker advanced D8 استفاده شد. ثبت الگوهای پراش اشعه ایکس با استفاده از پرتو K_α با طول موج ۰.۱۵۴۰۶ Å تحت ولتاژ ۴۰ keV، جریان ۴۰ mA و سرعت روبش ۰/۰۵ درجه بر ثانیه از زاویه ۴۰ الی ۱۲۰ درجه انجام شد. با استفاده از الگوهای پراش اشعه ایکس پارامتر شبکه به روش نلسون - ریلی (Cullity, ریلی (Nelson - Riley) (1978) محاسبه شد، مقدار دقیق پارامتر شبکه با رسم تغییرات پارامتر شبکه بر حسب $\cos 2\theta$ و بدست آوردن محل تلاقی خط عبور از میان نقاط با محور عرض‌ها (عرض از مبدا نمودار $a - \cos 2\theta$) به دست آمد. برای تعیین دقیق نوع رسوب‌های تشکیل شده نمودار فازی تعادلی سیستم آلیاژی Fe-2.4Mo-Cr با نرم افزار ترموکلک (Thermocalc Software) رسم شد. به منظور اندازه گیری سختی نمونه‌ها از دستگاه ریزسختی سنخ مدل MDPEL-M400GL از نوع فرورونده و یکرز با بار اعمالی ۱۰۰ گرم و مدت زمان توقف ۱۵ ثانیه استفاده شد.

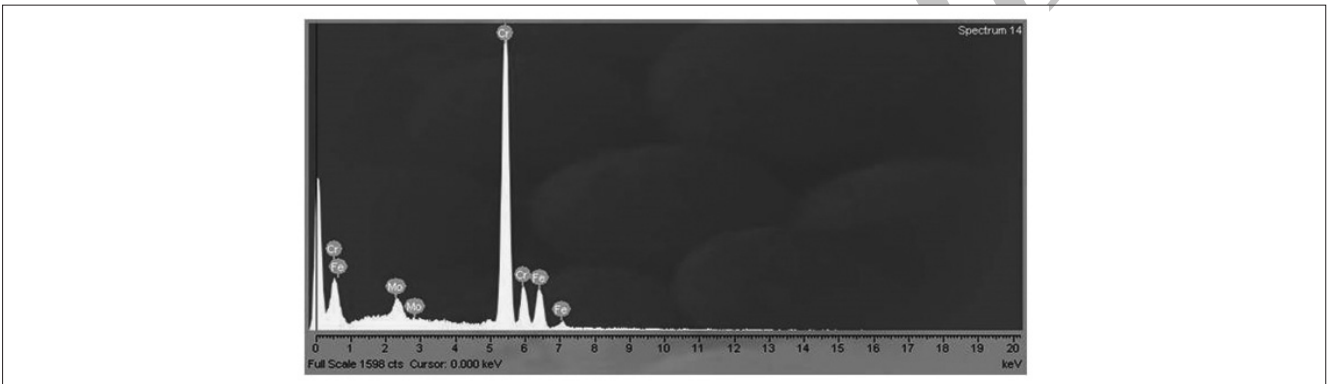
نتایج و بحث

شکل ۱ ریزساختار فولاد زنگ‌نزن فریتی Fe-23Cr-2.4Mo را پس از عملیات همگن‌سازی در دمای ۱۱۰۰°C به مدت زمان ۴۸ ساعت و سرد کردن آهسته در کوره (نمونه H) نشان می‌دهد. این ریزساختار شامل دانه‌های هم محور فریت با اندازه دانه متوسط ۴۵۰ میکرومتر است.

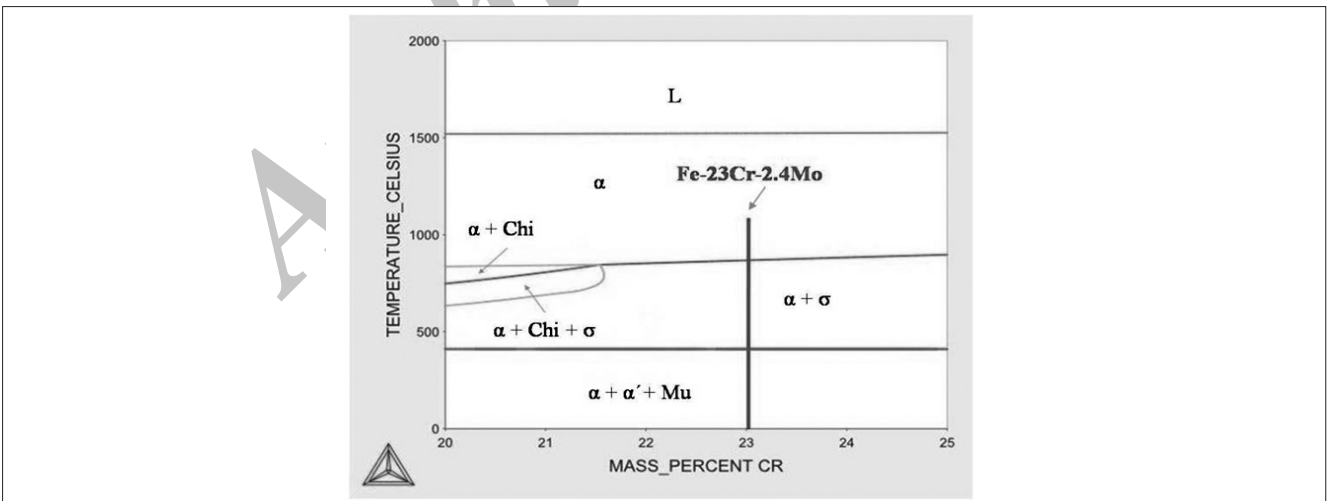
7- Scanning electron microscopy



شکل ۲- (الف) تصویر ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه H، (ب) بزرگنمایی بالاتر قسمت مشخص شده از تصویر (الف).

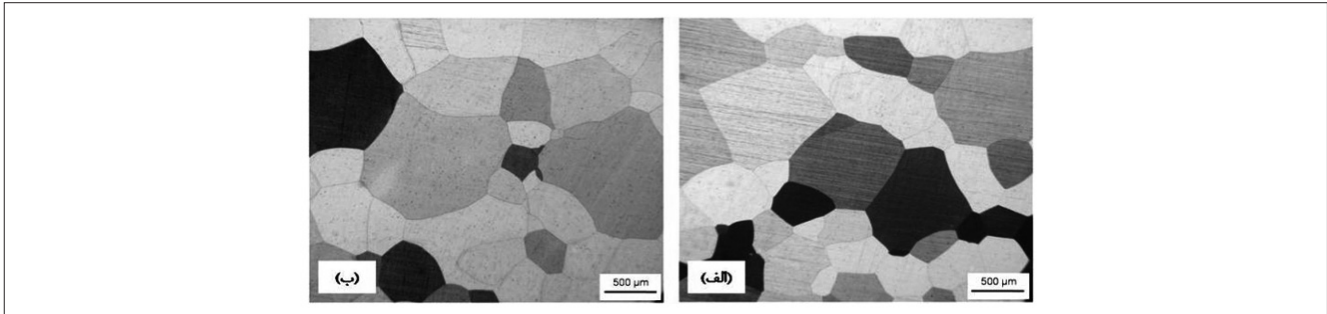


شکل ۳- آنالیز طیف نگاری توزیع انرژی از رسوب‌های تشکیل شده در ریزساختار نمونه H.

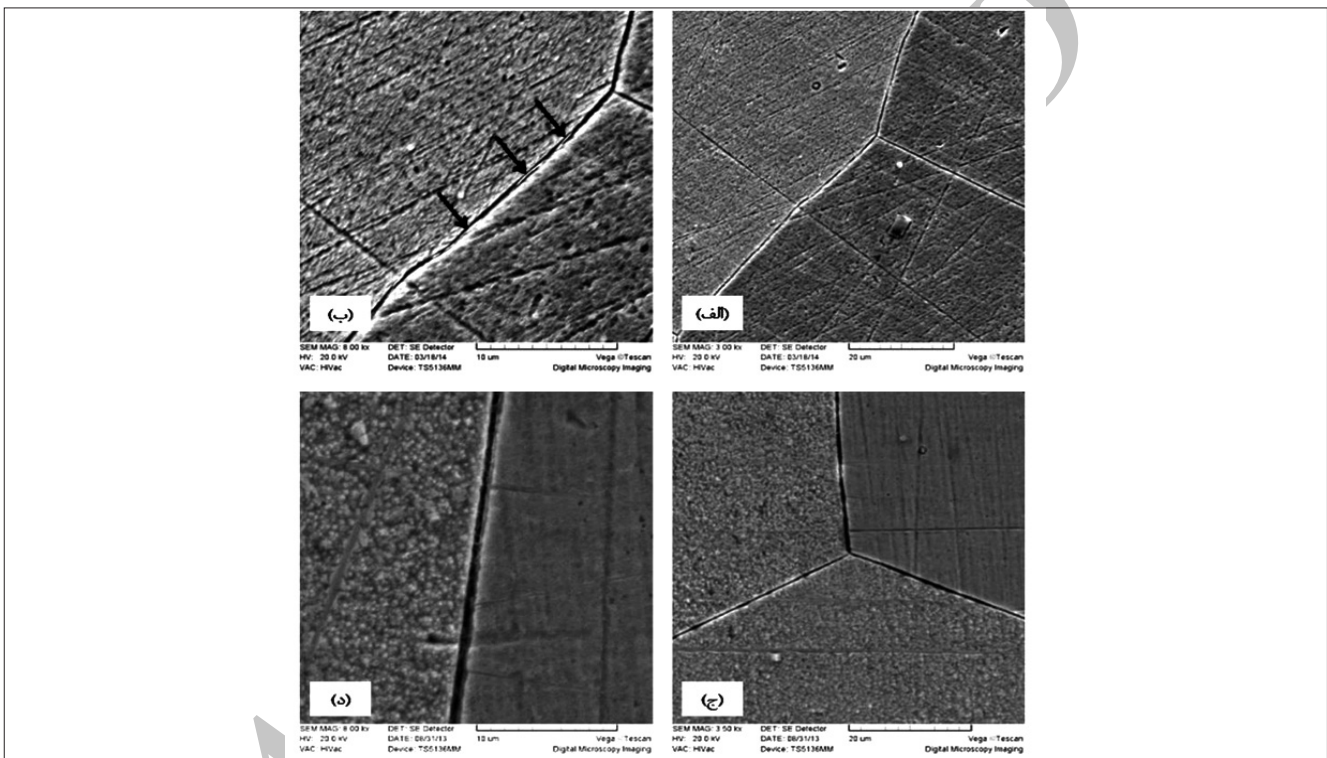


شکل ۴- نمودار فازی تعادلی رسم شده توسط نرم افزار ترموکلیک برای سیستم آلیاژی Fe-2.4Mo-Cr.

گستره دمایی ۸۵۰ تا ۱۵۰۰°C است. شکل ۵ ریزساختار نمونه H را پس از عملیات آنیل محلولی در دماهای (الف) ۱۱۰۰°C و (ب) ۱۱۵۰°C به مدت زمان ۵ ساعت و سرد کردن سریع در آب میکرومتر افزایش یافته است. با توجه به اینکه در دماهای بالاتر،



شکل ۵- تصویر ریزساختار میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی نمونه‌های (الف) . SA-1150°C، (ب) SA-1100°C

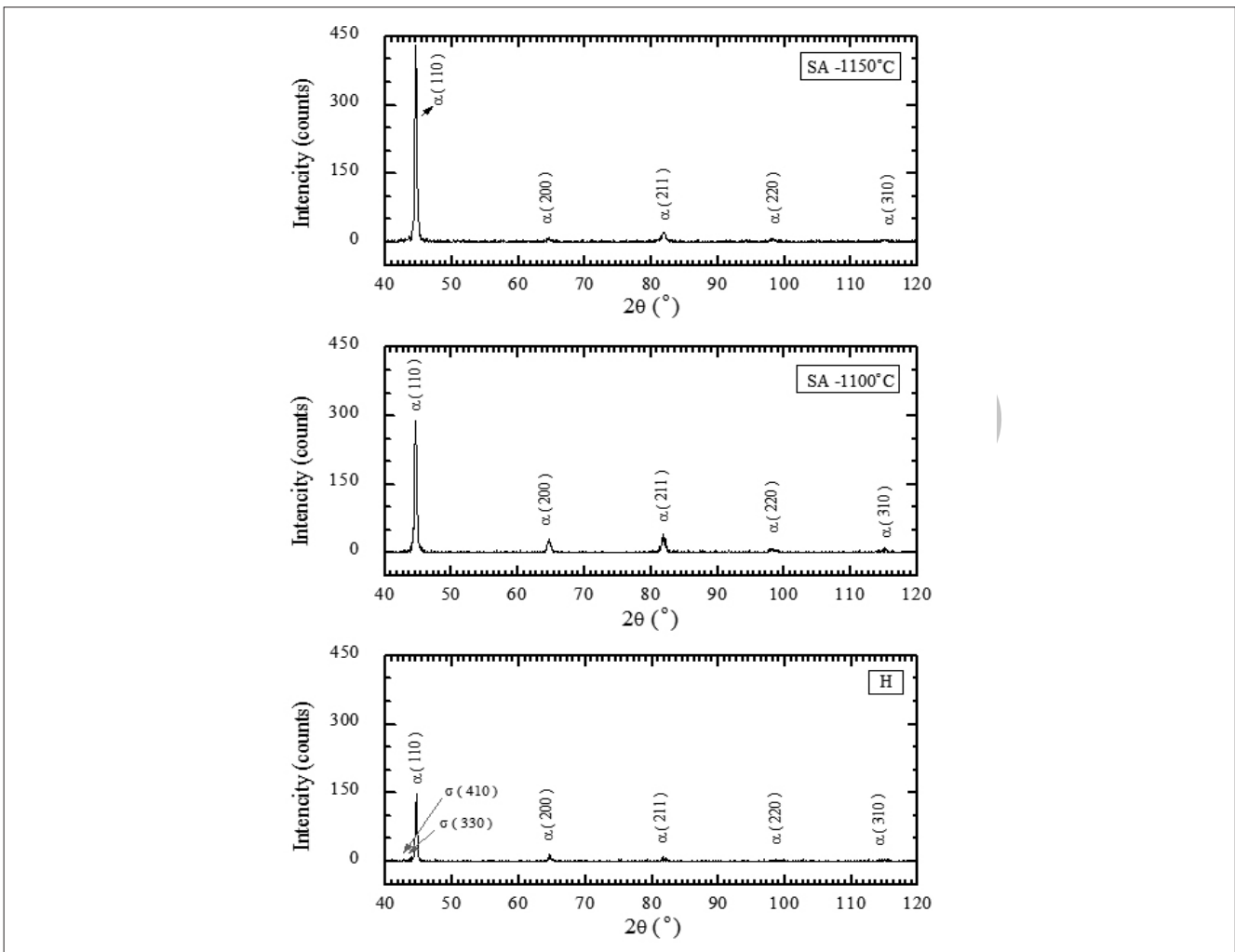


شکل ۶- تصاویر ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های (الف) SA-1100°C، (ج) SA-1150°C، (ب) و (د) بزرگنمایی‌های بالاتر تصاویر (الف) و (ج).

ولی عملیات آنیل محلولی در دمای 1150°C باعث حل شدن کامل رسوب‌ها شده و مرزدانه‌ها عاری از هر گونه رسوب است (شکل ج و د). حلالیت کامل رسوب‌ها در دمای 1150°C در مقایسه با 1100°C می‌تواند به علت افزایش حلالیت رسوب‌های غنی از کروم با افزایش دمای عملیات محلولی باشد. به نظر می‌رسد که بالابودن دما و زمان حلالیت کامل رسوب‌های موجود در تحقیق حاضر نسبت به تحقیقات دیگر (Guimarães, Mei, 2004; Qu et al., 2012) به علت ضخامت زیاد نمونه (۱۰ میلی متر) و بالابودن مقدار کروم موجود در این رسوب‌ها (۷۷/۹۳ درصد وزنی کروم) باشد. با افزایش مقدار کروم، حل شدن رسوب‌های فاز سیگما در فولادهای زنگ‌نزن

دانه‌ها انرژی بیشتری برای رشد دریافت می‌کنند افزایش دما منجر به افزایش متوسط اندازه دانه می‌شود.

برای بررسی بیشتر نمونه‌های SA-1100°C و SA-1150°C از نظر وجود رسوب، ریزساختار این نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی در شکل ۶ ارائه شده است. با مقایسه تصاویر ارائه شده در این شکل دیده می‌شود که عملیات آنیل محلولی در دمای 1100°C باعث حل شدن بسیاری از رسوب‌ها شده و مقداری رسوب در داخل دانه (الف) و همچنین در مرزدانه‌ها باقیمانده است. رسوب‌های باقیمانده در مرزدانه‌ها با فلش در شکل (ب) نشان داده شده است.



شکل ۷- الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های SA-1100°C و SA-1150°C، H.

زنگ‌زن فریتی (Guimarães, Mei, 2004) AISI 446 است. این نتیجه مطابق با مشاهدات ریزساختاری (شکل ۲) و نمودار فازی فولاد مورد مطالعه (شکل ۴) است. الگوهای پراش نمونه‌های SA-1100°C و SA-1150°C فقط حضور فاز فریت را در ساختار نشان می‌دهند. درحالی‌که تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه

SA-1100°C مقدار کمی فاز سیگما را در ساختار نشان می‌دهد (شکل ۶). علت عدم حضور فاز سیگما در الگوهای پراش نمونه‌های SA-1100°C و SA-1150°C به ترتیب کم بودن مقدار فاز سیگما باقیمانده و حل شدن کامل رسوب‌های فاز سیگما در این نمونه‌ها است.

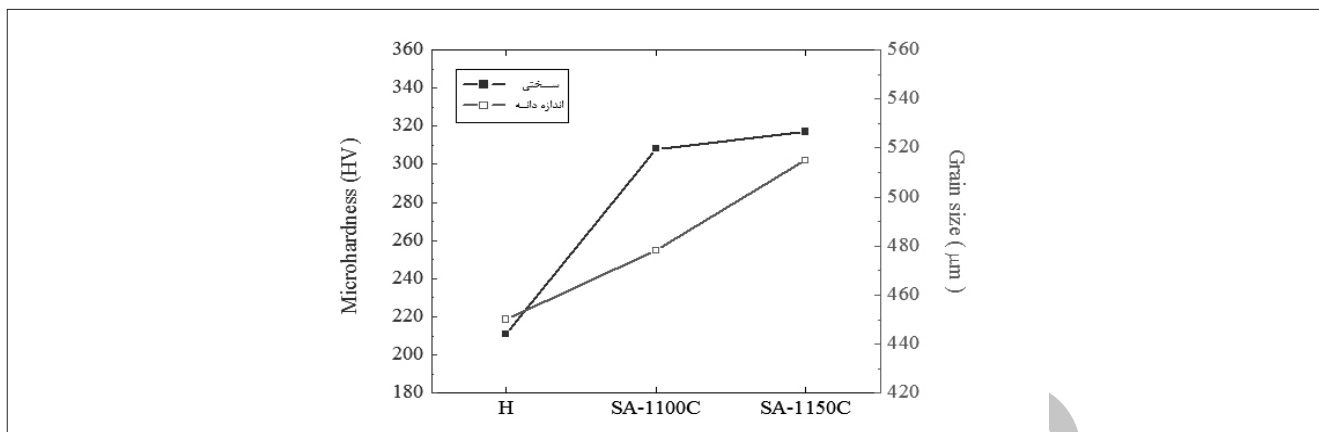
جدول ۲ پارامترهای شبکه محاسبه شده با استفاده از الگوهای پراش ارایه شده در شکل ۷ را نشان می‌دهد. با مقایسه پارامتر شبکه قبل و پس از عملیات محلولی چنین بر می‌آید که در اثر انجام

جدول ۲- پارامتر شبکه نمونه‌های SA-1100°C، H و SA-1150°C

نمونه	H	SA-1100°C	SA-1150°C
پارامتر شبکه (Å)	۲/۸۸۰	۲/۸۸۹	۲/۸۹۳

سخت‌تر شده و دمای حلالیت کامل این رسوب‌ها به دماهای بالاتر انتقال می‌یابد (Qu et al., 2012).

در شکل ۷ الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های SA-1100°C، H و SA-1150°C ارایه شده است. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه H حضور فاز فریت و همچنین رسوب‌های فاز سیگما را در ساختار نشان می‌دهد. موقعیت پیک‌های فاز سیگما به دست آمده در این الگوی پراش نزدیک به موقعیت این پیک‌ها در الگوی پراش فولاد



شکل ۸- نمودار سختی-اندازه دانه نمونه‌های H، SA-1100°C و SA-1150°C.

رسوب‌ها، حذف شدن رسوب‌های فاز سیگما با سختی بالا گزارش شده است (Qu et al., 2012). از طرف دیگر افزایش سختی و استحکام با حل شدن رسوب‌های کاربید کروم، نیتريد کروم و فاز لاوز نیز گزارش شده است (Chun, Polonis, 1992; Sawatani et al., 1982). نتایج حاصل از تحقیق انجام شده بر روی فولاد زنگ‌نزن فریتی نیویوم و تیتانیوم دار نشان داده است که با افزایش دمای آنیل به علت افزایش حلالیت رسوب‌ها، مقدار نیویوم در محلول افزایش می‌یابد و باعث افزایش استحکام از طریق استحکام دهی محلول جامد می‌شود (Sawatani et al., 1982). در این تحقیق نیز به نظر می‌رسد که با افزایش دما به علت افزایش حلالیت رسوب‌های غنی از کروم، مقدار کروم در محلول جامد افزایش می‌یابد و باعث استحکام دهی محلول جامد می‌شود. در نتیجه سختی افزایش می‌یابد.

نتیجه گیری

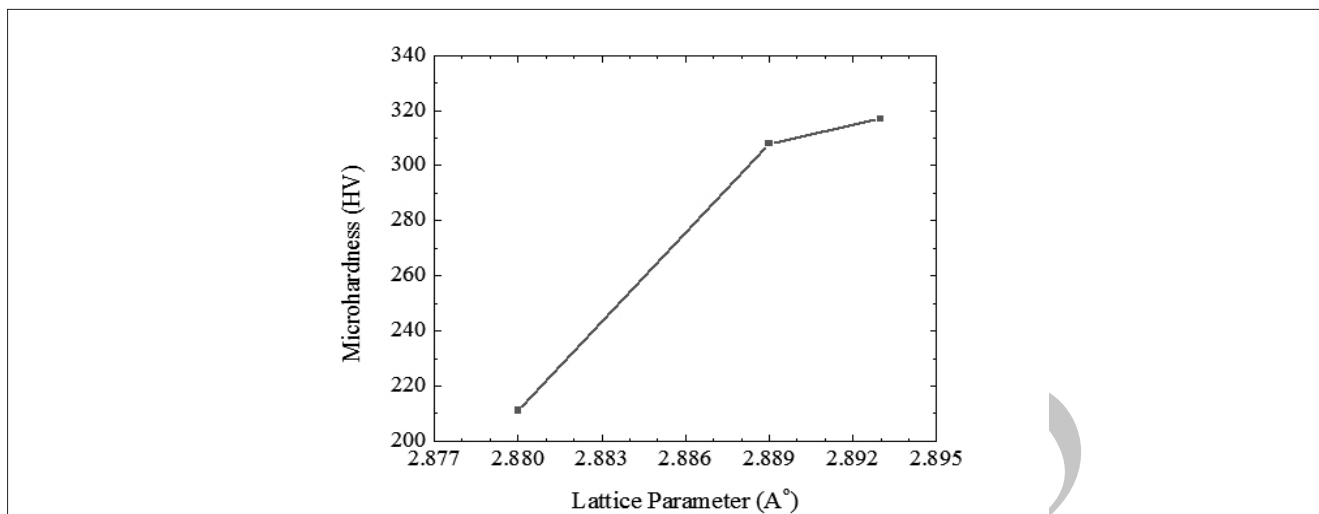
در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر رسوب‌های غنی از کروم بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن فریتی Fe-23Cr-2.4Mo، ابتدا نمونه‌هایی از این فولاد تحت عملیات همگن‌سازی در دمای ۱۱۰۰°C به مدت زمان ۴۸ ساعت قرار گرفتند و پس از اتمام عملیات همگن‌سازی در کوره سرد شدند. سپس عملیات محلولی در دماهای ۱۱۰۰°C و ۱۱۵۰°C به مدت زمان ۵ ساعت انجام شد و پس از انجام عملیات محلولی نمونه‌ها در آب کوئنچ شدند. نتایج حاصل به صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱. در فولاد Fe-23Cr-2.4Mo رسوب‌های فاز غنی از کروم به علت پایین بودن سرعت سرمایش پس از عملیات همگن‌سازی تشکیل می‌شوند.

۲. با انجام عملیات آنیل محلولی می‌توان رسوب‌های غنی از

عملیات محلولی به علت حل شدن رسوب‌های فاز سیگما مقدار کروم در محلول جامد افزایش یافته و در نتیجه پارامتر شبکه بزرگتر می‌شود. افزایش پارامتر شبکه با افزایش دمای عملیات محلولی به علت افزایش حلالیت رسوب‌های فاز سیگما با افزایش دما و در نتیجه افزایش مقدار کروم در محلول جامد است.

در شکل ۸ نمودار سختی-اندازه دانه نمونه‌های H و SA-1100°C و SA-1150°C ارائه شده است. همانطور که در این نمودار دیده می‌شود با انجام عملیات محلولی، اندازه دانه از ۴۵۰ به ۵۱۵ میکرومتر و سختی از ۲۱۱ به ۳۱۷ ویکرز افزایش یافته است. این نتیجه برخلاف پیش‌گویی رابطه هال-پچ است که مطابق آن سختی با کاهش اندازه دانه افزایش می‌یابد (Dieter, 1988). نتایج تحقیقات انجام شده بر روی فلزات مختلف نشان می‌دهند که سختی و استحکام فلزات در اندازه دانه‌های متداول از رابطه هال-پچ پیروی می‌کند (Song, Ponge, Raabe, Speer, Matlock, 2006). افزایش سختی با انجام عملیات محلولی می‌تواند به علت افزایش مقدار کروم در محلول جامد در اثر حل شدن رسوب‌های غنی از کروم (فاز سیگما) موجود در فولاد مورد استفاده در این تحقیق باشد. افزایش پارامتر شبکه با انجام عملیات محلولی بر اساس جدول ۲ می‌تواند دلیلی برای افزایش مقدار کروم در محلول جامد در اثر حل شدن رسوب‌های غنی از کروم باشد. شکل ۹ تغییرات سختی را به صورت تابعی از پارامتر شبکه نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که با افزایش پارامتر شبکه سختی افزایش یافته است. نتیجه تحقیق انجام شده بر روی فولاد زنگ‌نزن فریتی Fe-27.4Cr-3.8Mo-2.1Ni نشان داده است که حل شدن رسوب‌های فاز سیگما موجود در این فولاد در اثر افزایش دمای عملیات محلولی از ۹۵۰°C به ۱۱۵۰°C باعث کاهش سختی از ۲۵۷ به ۲۰۵ برینل شده است. علت کاهش سختی با حل شدن



شکل ۹- تغییرات سختی به صورت تابعی از پارامتر شبکه.

less steels. Metallurgical Transactions, Vol. 4, Pp. 251-260.

5- Guimarães, A. A., & Mei, P. R. (2004). Precipitation of carbides and sigma phase in AISI type 446 stainless steel under working conditions. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 155, Pp. 1681-1689.

6- Mohammadzadeh, R., & Akbari, A. (2013). Effect of pressurized solution nitriding on phase changes and mechanical properties of ferritic Fe-22.7Cr-2.4Mo stainless steel. Materials Science and Engineering A, Vol. 81, Pp. 239-243.

7- Park, C.-J., & Ahn, M.-K. (2006). Influences of Mo substitution by W on the precipitation kinetics of secondary phases and the associated localized corrosion and embrittlement in 29% Cr ferritic stainless steels. Materials Science and Engineering A, Vol. 418, Pp. 211-217.

8- Qu, H. P., Lang, Y. P., Chen, H. T., Rong, F., Kang, X. F., Yang, C. Q., & Qin, H. B. (2012). The effect of precipitation on microstructure, mechanic properties and corrosion resistance of two UNS S44660 ferritic stainless steels. Materials Science and Engineering A, Vol. 534, Pp. 436-445.

9- Sawatani, T., Minamino, S., & Morikawa, H. (1982). Effect of laves phase on the properties of Ti and Nb stabilized low C, N-19%Cr-2%Mo stainless steel sheets. Transactions ISI Journal, Vol. 22, Pp. 172-180.

10- Sello, M. P., & Stumpf, W. E. (2010). Laves phase embrittlement of the ferritic stainless steel type AISI 441.

11- Materials Science and Engineering A, Vol. 527, Pp. 5194-5202.

12- Sello, M.P., & Stumpf, W.E. (2011). Laves phase precipitation and its transformation kinetics in the ferritic stainless steel type AISI 441. Materials Science and Engineering A, Vol. 528, Pp. 1840-1847.

13- Smith, W. F. (1993). Structure and properties of engineering alloys. New York: McGraw-Hill.

14- Song, R., Ponge, D., Raabe, D., Speer, J. G., & Matlock, D. K. (2006). Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels. Materials Science and Engineering A, Vol. 441, Pp. 1-17.

15- Steigerwald, R.F. (1977). The effect of metallic second phases in stainless steels. Corrosion, Vol. 33, Pp. 338-343.

16- Tavares, S. S. M., Souza, J. A. de., Herculano, L. F. G., Abreu, H. F. G. de, & Souza Jr, C. M. de. (2008). Microstructural, magnetic and mechanical property changes in an AISI 444 stainless steel aged in the 560°C to 800°C range. Materials Characterization, Vol. 59, Pp. 112 – 116.

17- Van Zwieten, A. C. T. M., & Bulloch, J. H. (1993). Some considerations on the toughness properties of ferritic stainless steels - a brief review. International Journal Press Vessels and Piping, Vol. 56, Pp. 1-31.

18- Yamamoto, K., Kimura, Y., Wei, F.-G., & Mishima, Y. (2002). Design of laves phase strengthened ferritic heat resisting steels in the Fe-Cr-Nb(-Ni) system. Materials Science and Engineering A, Vol. 329-331, Pp. 249-254.

کروم را در زمینه فریتی حل نمود. با افزایش دمای عملیات محلولی از ۱۱۰۰°C به ۱۱۵۰°C حلالیت رسوبها افزایش یافته و در دمای ۱۱۵۰°C به طور کامل حل می‌شوند. جهت اجتناب از تشکیل مجدد رسوبهای غنی از کروم لازم است بعد از عملیات آنیل محلولی نمونه‌ها سریع (در آب) سرد شوند.

۳. انحلال رسوبهای غنی از کروم باعث افزایش مقدار کروم فاز فریت شده و منجر به افزایش پارامتر شبکه فریت از ۲/۸۸۰Å به ۲/۸۹۳Å و همچنین افزایش سختی آن از ۲۱۱ به ۳۱۷ ویکرز علی رغم رشد دانه فریت می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

1. Laves phase
2. Chi phase
3. Laves phase
4. α phase
5. Electroslog remelting treatment
6. Aqua solution
7. Scanning electron microscopy
8. Energy dispersive x-ray spectroscopy
9. α phase
10. Mu phase

منابع و مراجع

- 1- Chun, C. H., & Polonis, D. H. (1992). Metallurgical stability and the fracture behavior of ferritic stainless steel. Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 1(3), Pp. 371-382.
- 2- Cullity, B.D. (1978). Elements of x-ray diffraction. London: Addison-Wesley.
- 3- Dieter, G. E. (1988). Mechanical metallurgy. London: McGraw-Hill.
- 4- Grobner, P. J. (1973). The 885°F (475 °C) embrittlement of ferritic stain-