



Investigating the Effect of Deformation Temperature on the Structure and Mechanical Properties of AISI 304 Stainless Steel

Sara Eskandarinezhad^{ID}, Alireza Mashreghi*^{ID} and Saeed Hasani^{ID}

Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

* Corresponding author, Email: amashreghi@yazd.ac.ir

(Received: 7 January 2025; Revised: 16 April 2025; Accepted: 19 April 2025; Available online: 30 July 2025)

ABSTRACT

Introduction and targets: AISI 304 austenitic stainless steel is widely recognized for its excellent corrosion resistance and mechanical properties, making it suitable for various industrial applications. However, the presence of non-equilibrium δ -ferrite phase can significantly compromise these properties. This study aims to optimize the hot deformation process to dissolve the residual δ -ferrite in AISI 304 stainless steel by adjusting the deformation temperature and the degree of reduction.

Materials and methods: The sheet was hot rolled at temperatures ranging from 1050 °C to 1150 °C. Hot rolling was performed with reductions in cross-sectional area of 30% and 60%. Phase percentage and grain size were analyzed using image analysis software, and the hardness and tensile properties of the hot-rolled samples were examined.

Results: Results of image analysis showed that the amount of ferrite in the rolled sample heated at 1150 °C and with a percentage reduction area of 60% reached its lowest level, namely 0.39%. Additionally, with decreasing rolling temperature and increasing the reduction of area, the average grain size became smaller and, as a result, the hardness of the samples increased. As a result, performing hot rolling at a temperature of 1150 °C with a 60% reduction of area led to decrease the grain size to the lowest value of 54.73 μm . The tensile test results also revealed that this sample had the highest yield stress of 345 MPa and the ultimate tensile strength of 653 MPa.

Conclusion: The results declared that the best conditions for ferrite removal were rolling at a temperature of 1150 °C with a percentage of cross-sectional area reduction of 60%.

Keywords: Austenitic stainless steel, AISI 304, Hot deformation, Delta ferrite (δ), Mechanical properties.

How to Cite: Eskandarinezhad S, Mashreghi A, Hasani S. Investigating the Effect of Deformation Temperature on the Structure and Mechanical Properties of AISI 304 Stainless Steel. J Adv Mater Eng. 2025;44(4):15-31. <https://doi.org/10.47176/jame.44.4.1103>

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by IUT press.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.



بررسی اثر دمای تغییر شکل بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد زنگ‌زن AISI 304

سارا اسکندری‌نژاد^{ID}، علیرضا مشرقی^{ID*} و سعید حسینی^{ID}

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران
* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: amashreghi@yazd.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸، بازنگری: ۱۴۰۴/۱/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۴/۱/۳۰، انتشار: ۱۴۰۴/۵/۸)

چکیده

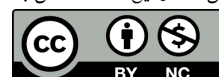
مقدمه و اهداف: فولاد زنگ‌زن آستینیتی AISI 304 به دلیل مقاومت عالی در برابر خوردگی و اکسیداسیون، کاربرد فراوانی در صنایع مختلف دارد. این در حالی است که وجود فاز مغناطیسی فریت δ در این فولاد، می‌تواند به شدت خواص آن را تضعیف کند. از این رو، در این پژوهش سعی شده است تا با بهینه‌سازی دما و میزان کاهش سطح مقطع در فرایند تغییر شکل گرم، فاز فریت δ باقیمانده حل شود.

مواد و روش‌ها: فولاد مورد نظر، در محدوده دمایی ۱۰۵۰ °C تا ۱۲۰۰ °C، تحت عملیات نورد گرم با دو درصد کاهش سطح مقطع ۳۰ و ۶۰ درصد قرار گرفت. سپس درصد فازهای موجود در نمونه‌ها و اندازه دانه‌ها اندازه‌گیری شد. همچنین سختی و رفتار کششی نمونه‌ها بررسی شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل از آنالیز تصویر نشان داد که میزان فریت موجود در ساختار نمونه نورد گرم‌شده در دمای ۱۱۵۰ °C و با درصد کاهش سطح مقطع ۶۰ درصد، به کم‌ترین میزان خود یعنی ۰/۳۹ درصد رسیده است. در حالی که با کاهش دمای نورد و افزایش میزان کاهش سطح مقطع میانگین اندازه دانه‌ها کوچک‌تر و در نتیجه میزان سختی نمونه‌ها افزایش یافت؛ بنابراین، انجام عملیات نورد گرم در دمای ۱۰۵۰ °C با کاهش سطح مقطع ۶۰٪، اندازه دانه به کمترین مقدار (۵۴/۷۳ μm) کاهش یافت. همچنین نتایج آزمون کشش نیز نشان داد که این نمونه بیشترین میزان تنش تسلیم برابر با ۳۴۵ MPa و استحکام نهایی برابر با ۶۵۳ MPa را دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که بهترین شرایط حذف فریت نورد در دمای ۱۱۵۰ °C و با درصد کاهش سطح مقطع ۶۰ درصد بوده است.

واژه‌های کلیدی: فولاد زنگ‌زن آستینیتی؛ AISI 304؛ تغییر شکل گرم؛ فریت δ، خواص مکانیکی.



۱- مقدمه

فولادهای زنگ‌زن آستنیتی، به‌عنوان دسته مهمی از فولادهای پرایلیژی در دمای محیط، مقاومت مطلوبی در برابر اکسیداسیون از خود نشان می‌دهند. عناصر آلیاژی اصلی این فولادها Cr و Ni است که به دلیل بهبود خواص خوردگی و مکانیکی به فولادهای زنگ‌زن آستنیتی اضافه می‌شوند؛ اما معمولاً ناپایداری در ریزساختار و دشواری در فرآیند تولید این نوع فولادها مشهود است (۲۰۱). فولاد زنگ‌زن آستنیتی AISI 304، به‌عنوان پرکاربردترین عضو گروه فولاد زنگ‌زن آستنیتی است که مقدار کروم آن ۱۸ تا ۲۰ درصد وزنی و مقدار نیکل آن ۸ تا ۱۲ درصد وزنی است و به همین دلیل، به فولاد زنگ‌زن ۸-۱۸ نیز معروف است. از ویژگی‌های بارز این فولاد، می‌توان به مقاومت در برابر خوردگی، قابلیت پاک‌سازی و تمیزکنندگی راحت، مقاومت در دمای بالا، قابلیت جوشکاری عالی، فرم‌پذیری بالا، استحکام مطلوب، قابلیت برش‌کاری و ماشین‌کاری خوب اشاره کرد. به همین دلیل از این نوع فولاد در پروژه‌های ساخت‌وساز، ساخت راکتورهای هسته‌ای، خطوط لوله، تجهیزات نیروگاهی، تجهیزات تحت فشار، تجهیزات از جنس فولاد زنگ‌زن نیازمند جوشکاری، صنایع هوایی، دیگ‌های بخار، مبدل‌ها، تجهیزات صنایع غذایی، تجهیزات آشپزخانه، حمام و غیره استفاده می‌شود (۳۰۱ و ۴۰۱).

فولادهای زنگ‌زن آستنیتی نسبت به سایر فولادهای آلیاژی، از نظر شیمیایی پیچیده‌تر هستند. این موضوع به دلیل حضور تعداد زیادی از عناصر آلیاژی در این فولادها، وقوع تغییرات وسیع در فازها و ساختار بلوری این دسته از فولادها است. در نتیجه، پیش‌بینی در مورد حضور فازها در این فولاد دشوار است. در حالت کلی، سه فاز اصلی موجود در فولادهای زنگ‌زن، فاز فریت، آستنیت و مارتنزیت هستند. به‌طور معمول، ساختار این فولادها در دمای اتاق و در حالت تعادل ترمودینامیکی، از فاز آستنیت تشکیل شده است. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که فاز فریت δ نیز به دلیل سینتیک کند استحاله پریتکتیک^۱، می‌تواند به صورت یک فاز غیر تعادلی در ساختار ظاهر شود که

در این شرایط خواص مکانیکی و خواص خوردگی فلز را تحت تاثیر قرار می‌دهد. فاز فریت δ همچنین دارای خاصیت مغناطیسی بوده و تاثیر نامطلوبی بر گستره استفاده از این آلیاژ، به‌دلیل مغناطیسی شدن آن، دارد. با این حال، با انجام عملیاتی ترمومکانیکی می‌توان ساختار این فولاد را کاملاً آستنیتی کرده و خاصیت مغناطیسی آن را به‌طور کامل از بین برد (۵).

دیاگرام فازی آلیاژهای نیکل-کروم با مقدار ثابت ۳۰ درصد وزنی آهن، نشان می‌دهد که در فولاد AISI 304، فاز فریت δ در حین انجام تشکیل می‌شود و در صورت عدم کنترل مناسب ترکیب شیمیایی و یا عدم اجرای فرآیند عملیات ترمومکانیکی مناسب، این فاز تا دمای محیط باقی مانده و از بین نمی‌رود (۶ و ۷). برای کاهش یا حذف فاز فریت از ساختار این نوع فولادها، محققین مطالعات مختلفی انجام داده‌اند. در این راستا رضایت و همکاران (۸)، فولاد AISI 304 ریختگی را به مدت شش ساعت در دمای 1150°C تحت حرارت‌دهی قرار دادند و در نهایت شاهد کاهش میزان فریت δ از ۲۸/۲ به ۱۸/۱ درصد بودند. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دما و زمان انحلال، مقدار فریت δ کاهش بیشتری می‌یابد. همچنین در پژوهش دیگری، به بررسی رفتار پراکندگی فاز فریت δ در فولاد AISI 304 تحت نورد گرم در دمای 900°C پرداخته شد. نتایج این مطالعه نشان داد که مقدار فریت δ در این دما، با افزایش میزان کاهش سطح مقطع از صفر به ۷۵ درصد، افزایش یافته و همچنین با افزایش کاهش سطح مقطع، فاز σ به‌طور همگن در فریت‌های δ تبلور مجدد یافته، رسوب می‌کند (۹). ونگوپال و همکاران (۱۰)، در پژوهشی به بررسی تاثیر دما و سرعت کرنش بر سه نمونه متفاوت از فولاد AISI 304 پرداختند. آن‌ها دو نمونه از فولاد AISI 304 و AISI 304L که قبلاً تحت تغییر شکل گرم قرار گرفته بود را به همراه یک نمونه سوم AISI 304 که در شرایط ریختگی شده بود، تحت آزمون فشار گرم قرار داده و میزان فریت این نمونه‌ها را با روش مغناطش‌سنجی اندازه‌گیری کردند. آن‌ها برای حذف یا کاهش میزان فریت قبل از آزمایش، نمونه‌ها را در ابتدا به مدت ۴۵-۳۰ دقیقه تحت دمای 1150°C قرار دادند

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد AISI 304 (برحسب درصد وزنی)

Fe	Ti	Mo	P	S	Mn	Si	Ni	Cr	C
مابقی	۰/۰۷۵	۰/۵۷۳	۰/۰۲۳	۰/۰۳≤	۱/۹۷	۰/۳۴۲	۹/۰۷	۱۸/۳	۰/۰۳۳

داده شد و به جهت این که احتمال داده می شد نمونه ها از محل ها و بیلت های مختلف یک ذوب، استخراج شده باشند و به جهت نزدیک تر شدن ساختار تمام نمونه به یکدیگر در ابتدا نمونه ها مجدداً تحت عملیات همگن سازی قرار گرفتند. به این منظور، فولاد AISI 304 در دمای 1200°C به مدت دو ساعت تحت همگن سازی قرار گرفته و در نهایت در آب سرد، با سرعت سرد شد. سپس برای بررسی تاثیر پارامترهای تغییر شکل گرم بر ساختار، فولاد همگن شده به چهار نمونه تقسیم و سپس در دماهای 1050°C ، 1100°C ، 1150°C و 1200°C به مدت ۳۰ دقیقه پیشگرم و تحت نورد گرم با درصد کاهش سطح مقطع های ۳۰ و ۶۰ درصد قرار گرفتند. عملیات نورد نمونه ها در آزمایشگاه، با دستگاه نورد ۲۰ تن آزمایشگاهی انجام شده است. این دستگاه دارای غلطک هایی به قطر ۲۰ cm بود که با سرعت ۲۰ rpm در حال چرخش بودند. جدول (۲)، نمونه های مورد پژوهش و کد مربوط به هر نمونه را نشان می دهد.

پس از عملیات همگن سازی و نورد گرم، بخشی از نمونه ها به اندازه 1 cm^3 برای بررسی ریزساختار برش داده شدند. برای بررسی ریزساختار، از روش متالوگرافی استفاده شد. بدین منظور، نمونه ها در ابتدا مانت و سپس سنباده زنی و در نهایت با پودر آلومینا با اندازه ذرات $3\text{ }\mu\text{m}$ پولیش شدند. سپس نمونه ها با استفاده از محلول ماربل با ترکیب شیمیایی $10\text{ml HCL}+13\text{ml H}_2\text{O}+1\text{g CuSO}_4$ اچ شدند. پس از آماده سازی، از میکروسکوپ نوری با مشخصات Olympus BX60M، برای بررسی ریزساختار نمونه ها استفاده شد. همچنین با استفاده از نرم افزار پردازش تصویر MIP4، درصد فاز فریت و نرم افزار ImageJ، اندازه دانه ها محاسبه گردید.

سختی نمونه ها، مطابق با استاندارد ASTM E10 و با استفاده از دستگاه سختی سنج INSTRON و با روش برینل، تحت نیروی

و سپس آزمایش فشار در محدوده دمایی 1100°C - 1250°C و در سرعت های کرنش 0.01 s^{-1} - 0.1 s^{-1} انجام دادند. نتایج آن ها نشان داد که میزان فریت موجود در فولادها، به دما و سرعت کرنش بستگی داشته است؛ به طوری که میزان فریت با افزایش دما و سرعت کرنش، افزایش می یابد.

با وجود مطالعات فراوان در مورد تغییر شکل گرم فولاد زنگ نزن AISI 304 در منابع متعدد، اما اغلب آن ها در مورد اثر پارامترهای تغییر شکل گرم مثل دما، سرعت کرنش، میزان کاهش سطح مقطع، ترکیب شیمیایی و ... بر سینتیک تبلور مجدد دینامیکی و استاتیکی، مکانیزم تشکیل ترک ها حین تغییر شکل، اندازه دانه های ناشی از تبلور مجدد و اثر آن بر خواص مکانیکی نسل های مختلف فولادهای زنگ نزن انجام داده اند (۱۱-۱۵). این در حالی است که پژوهش های اندکی در ارتباط با اثر تغییر شکل گرم بر میزان فریت در این فولادها انجام شده است. از این رو و با توجه به اهمیت و کاربرد زیاد این نوع فولادها در صنعت، هدف از این پژوهش بررسی اثر پارامترهای تغییر شکل گرم بر میزان فریت و سپس بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد زنگ نزن AISI 304 است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304 ریختگی شده در شرکت فولاد آلیاژی ایران، استفاده شد که ترکیب شیمیایی آن در جدول (۱) آمده است. این فولاد بعد از ریختگی به مدت شش ساعت در دمای 1250°C همگن سازی شد و سپس در همان دما تحت عملیات نورد گرم سنگین در شرکت فولاد آلیاژی ایران قرار گرفته و سپس جهت مطالعه بیشتر در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

نمونه های نورد گرم سنگین شده، به ابعاد $10 \times 3 \times 2\text{ cm}^3$ برش

جدول ۲- نمونه‌های مورد بررسی در پژوهش

کد نمونه	درصد کاهش سطح مقطع	دمای همگن سازی (°C)	دمای پیشگرم و نورد (°C)
همگن شده	-	۱۲۰۰	
۱۲۰۰-۳۰	۳۰٪	۱۲۰۰	۱۲۰۰
۱۲۰۰-۶۰	۶۰٪	۱۲۰۰	۱۲۰۰
۱۱۵۰-۳۰	۳۰٪	۱۲۰۰	۱۱۵۰
۱۱۵۰-۶۰	۶۰٪	۱۲۰۰	۱۱۵۰
۱۱۰۰-۳۰	۳۰٪	۱۲۰۰	۱۱۰۰
۱۱۰۰-۶۰	۶۰٪	۱۲۰۰	۱۱۰۰
۱۰۵۰-۳۰	۳۰٪	۱۲۰۰	۱۰۵۰
۱۰۵۰-۶۰	۶۰٪	۱۲۰۰	۱۰۵۰

زمینه آستنیت و فاز دوم فریت δ است که به صورت غیر پیوسته در ساختار زمینه توزیع شده است که این ساختار مشابه با نتایج ارائه شده در سایر پژوهش‌های مشابه است (۱۶ و ۱۷). نکته حائز اهمیت دیگری که در تصاویر ارائه شده در شکل (۱-الف) و (۱-ب) مشاهده می‌شود، آن است که دانه‌های فریت δ در نمونه اولیه، به دلیل قرارگیری تحت فرایند نورد سنگین در راستای آن کشیده شده است. همچنین به نظر می‌رسد شکل ظاهری، پراکندگی و درصد فاز فریت در نقاط مختلف نمونه متفاوت است که ممکن است به دلیل سرعت سرد شدن متفاوت در نقاط مختلف نمونه باشد. در شکل (۱-ج) نیز درصد فریت موجود در این نمونه محاسبه شده است که همان گونه که مشاهده می‌شود مقدار آن ۲/۱۱ درصد است.

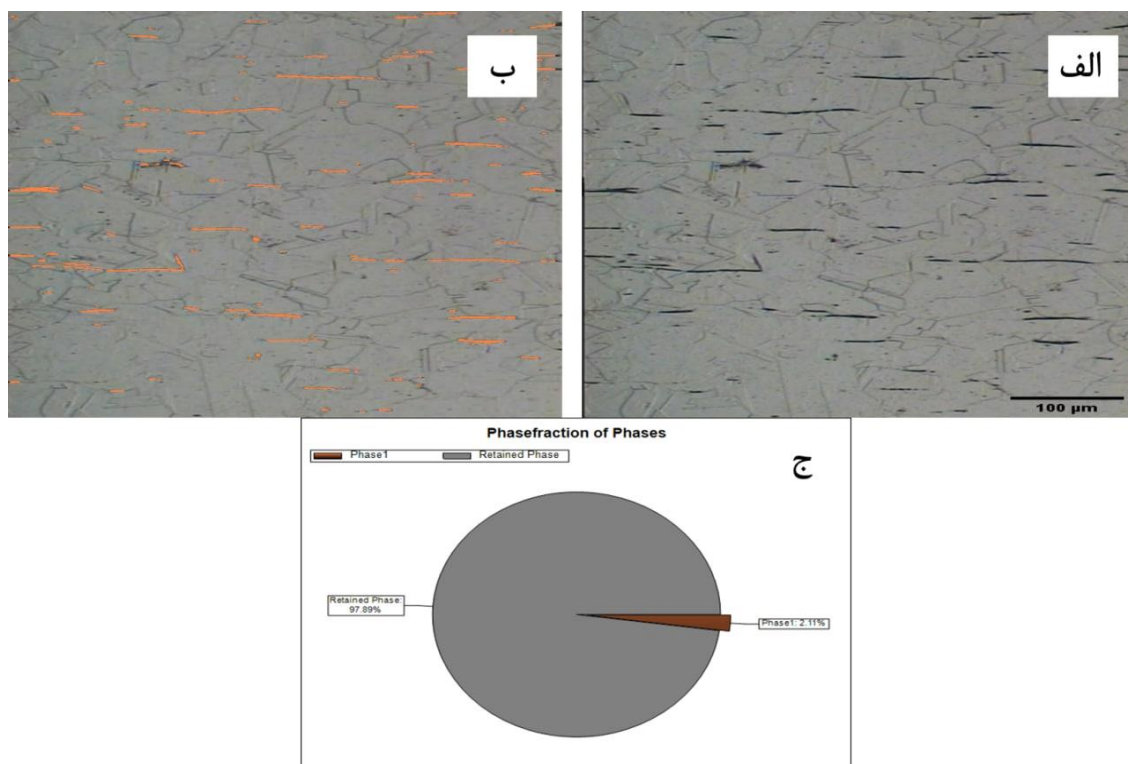
تصویر ارائه شده در شکل (۲-الف) و (۲-ب) نیز ریز ساختار نمونه همگن شده در دمای 1200°C به مدت دو ساعت را نشان می‌دهد. معمولاً در طی فرایند همگن سازی، فاز فریت کشیده شده در راستای کاهش انرژی سطحی فریت، به شکل کروی نزدیک می‌شود که این موضوع نیز با نتایج سایر تحقیقات تطابق دارد (۱۸ و ۱۹). همچنین درصد فریت موجود در این نمونه نیز ۰/۴۴

۱۸۷/۵N و قطر ساچمه $2/5\text{ mm}$ با سه بار تکرار، اندازه گیری شد. برای بررسی خواص کششی، مطابق با اندازه زیر استاندارد ASTM E8/E8M و با قطر 6 mm تراشکاری شدند. آزمون کشش توسط دستگاه یونیورسال SANTAM مدل STM-150 در دمای اتاق با سرعت 10 mm/min انجام شد. در نهایت، سطح شکست مربوط به نمونه‌های تست کشش، به منظور شکست نگاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ مدل SERON 2300C، مورد بررسی قرار گرفت.

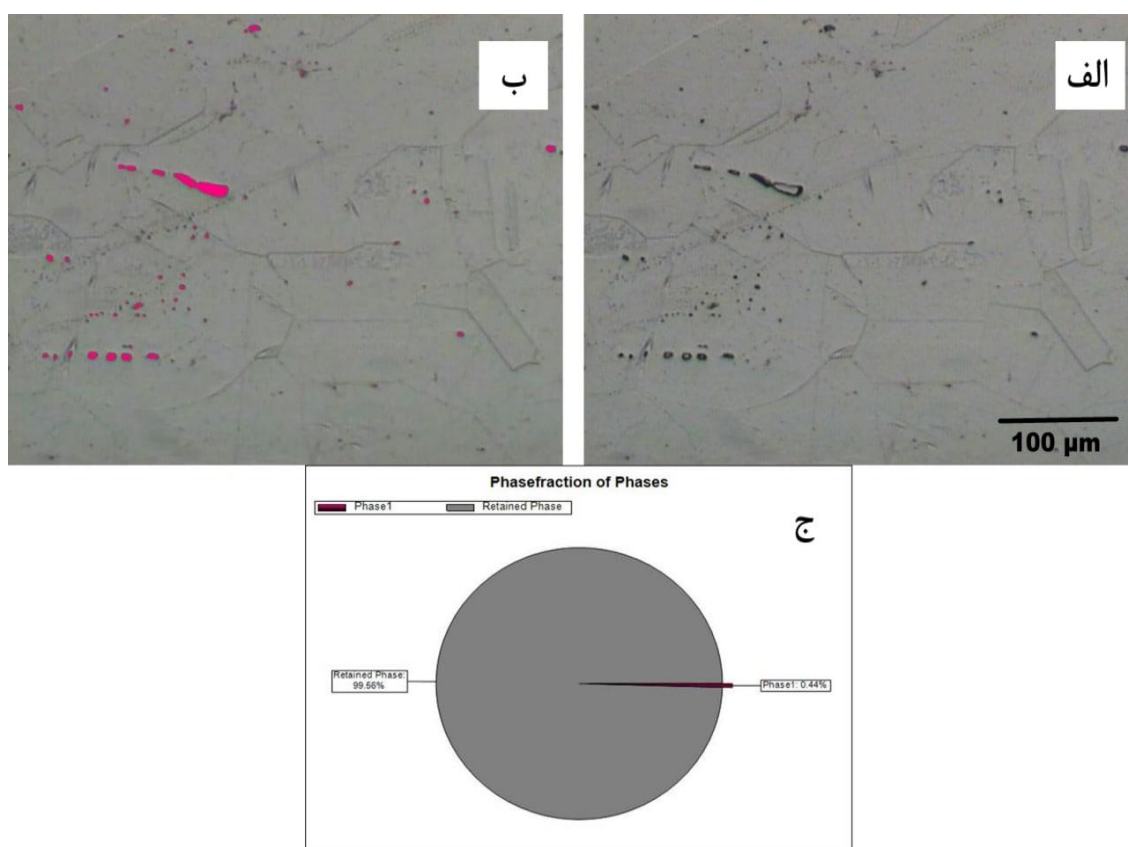
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریز ساختار نمونه‌ها و درصد فاز فریت

فولاد زنگ‌نزن AISI 304 به کاررفته در این پژوهش نیز همانند فرایند تولید سایر فولادها پس از تهیه مذاب، تحت ریخته‌گری قرار گرفته است؛ بنابراین، انتظار می‌رود که علاوه بر فاز آستنیت، فاز فریت نیز در این فولاد وجود داشته باشد. شکل (۱-الف) و (۱-ب)، تصویر ریز ساختاری نمونه شاهد (قبل از همگن سازی و نورد) را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، این نمونه شامل دو فاز آستنیت و فریت است، به گونه‌ای که در آن فاز



شکل ۱- الف) تصویر متالوگرافی نمونه شاهد، ب) تصویر مربوط به تشخیص فریت و ج) میزان فریت نمونه در نرم افزار MIP4.



شکل ۲- الف) تصویر متالوگرافی نمونه آنیل شده، ب) تصویر مربوط به تشخیص فریت و ج) میزان فریت نمونه در نرم افزار MIP4.

درصد تخمین زده شد که بیانگر انحلال مقداری از فاز فریت در حین همگن سازی است.

سلیمانی و همکاران (۲۰)، در مورد اثر نسبت کروم به نیکل معادل بر میزان انحلال فاز فریت در دو دمای 1200°C و 1250°C تحقیق کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در هر دو دمای فوق، با انجام آنیل، مقدار فریت کاهش می یابد ولی با اعمال تغییر شکل بعد از آنیل، درصد فریت مجدداً افزایش می یابد. تحقیق آن‌ها مشخص کرد که با افزایش نسبت کروم به نیکل، درصد بیشتری فریت در حین تغییر شکل تشکیل می گردد. نتایج پژوهش‌های تحقیق حاضر نیز مشابه با نتایج این گروه می باشد و تاییدی بر نتایج حاصل از این تحقیق است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در حالت مطلوب، لازم است فولاد زنگ‌نزن آستنیتی تنها شامل فاز آستنیت باشد، اما نتایج بررسی سایر محققان نشان می‌دهد که فریت δ تشکیل شده در حین فرایند ریخته‌گری پیوسته، در همان ابتدا و هم‌زمان از فاز مذاب در حین انجماد به وجود می‌آید و با ادامه سرد کردن بعد از انجماد، شکل ظاهری و درصد فاز فریت δ ، با توجه به نسبت کروم به نیکل، تغییر می‌کند (۲۱). از طرفی ممکن است در حین کار سرد، مقداری از فاز آستنیت ناپایدار به فاز مارتنزیت تبدیل شود که با افزایش اعمال کار سرد، تشکیل فاز مارتنزیت نیز افزایش می‌یابد (۲۲)؛ بنابراین ممکن است که در ساختار فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، علاوه بر فاز آستنیت، فاز فریت و مارتنزیت نیز وجود داشته باشد. نتایج پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که با اعمال عملیات حرارتی بر این دسته از فولادها، اغلب فاز فریت δ کاهش و فاز مارتنزیت حذف می‌شود (۲۳).

شکل (۳-الف)، تصویر ریزساختاری نمونه $30-1200^{\circ}\text{C}$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، نورد گرم باعث کشیده شدن فاز فریت در راستای نورد شده و شکل ظاهری آن را به صورت کرمی شکل نزدیک کرده است. همچنین درصد فریت موجود در این نمونه در حدود $7/89$ درصد تخمین زده شده است. نتایج مربوط به متالوگرافی این نمونه نشان می‌دهد که اعمال تغییر شکل گرم، باعث افزایش میزان فریت موجود در

ساختار و همچنین تغییر شکل ظاهری آن نسبت به نمونه آنیل شده در دمای 1200°C و نمونه شاهد می‌شود. شکل (۳-ب) نیز تصویر ریزساختاری نمونه $60-1200^{\circ}\text{C}$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، افزایش درصد کاهش سطح مقطع به 60 درصد، باعث کشیدگی بیشتر در فاز فریت شده است و مقدار آن را نیز تا حدود $8/32$ درصد افزایش داده است.

شکل (۳-ج)، تصویر ریزساختاری نمونه $30-1150^{\circ}\text{C}$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، کاهش دما از 1200°C به 1150°C تحت درصد کاهش سطح مقطع یکسان 30 درصد، باعث کاهش فاز فریت می‌شود ولی همچنان، درصد این فاز غیر تعادلی نسبت به نمونه آنیل شده بیشتر است. از نظر شکل ظاهری نیز فریت δ ، تغییر محسوسی نداشته است. درصد فریت موجود در این نمونه $5/14$ درصد تخمین زده شد. شکل (۳-د)، تصویر ریزساختار نمونه $60-1150^{\circ}\text{C}$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش درصد کاهش سطح مقطع از 30 به 60 درصد در طی فرایند نورد گرم در دمای 1150°C ، درصد فاز فریت به طور محسوسی کاهش یافته است. درصد فریت موجود در این نمونه، $0/39$ درصد تخمین زده شد که در مقایسه با نمونه آنیل شده در دمای 1200°C ، کمی کمتر و در مقایسه با نمونه نورد گرم شده در دمای 1200°C و تحت درصد کاهش سطح مقطع یکسان 60 درصد، میزان فاز فریت کاهش چشمگیری داشته است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کاهش دمای نورد، تاثیر قابل توجهی بر کاهش میزان فریت در ساختار دارد.

شکل (۳-ه)، تصویر ریزساختاری نمونه $30-1100^{\circ}\text{C}$ را نشان می‌دهد. درصد فریت موجود در این نمونه نیز محاسبه شده است که در حدود $4/09$ درصد تخمین زده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، کاهش دما از 1150°C به 1100°C تحت درصد کاهش سطح مقطع یکسان 30 درصد، باعث کاهش میزان فریت در نمونه شده است ولی درصد این فاز نسبت به نمونه آنیل بیشتر است. شکل (۳-و)، تصویر ریزساختار نمونه $60-1100^{\circ}\text{C}$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، با

جدول ۳- درصد فریت موجود در ساختار همه نمونه‌های آزمون

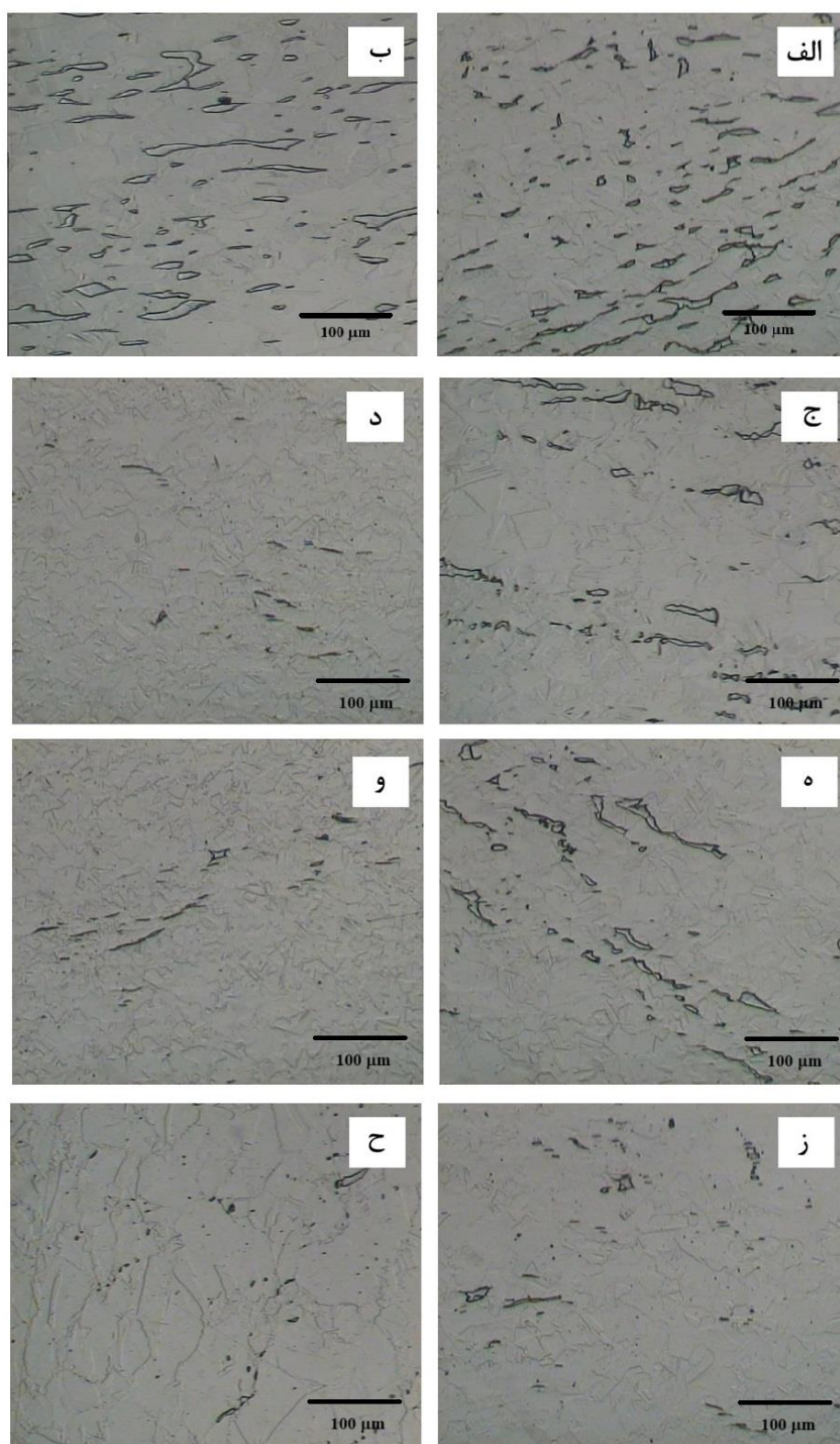
درصد فاز فریت δ در ۶۰ در صد کاهش سطح مقطع	درصد فاز فریت δ در ۳۰ درصد کاهش سطح مقطع	شرایط نمونه یادمای نورد °C
-	۲/۱۱	شاهد
۸/۳۲	۷/۸۹	۱۲۰۰
۰/۳۹	۵/۱۴	۱۱۵۰
۰/۶۵	۴/۰۹	۱۱۰۰
۰/۶۳	۱/۰۷	۱۰۵۰

افزایش درصد کاهش سطح مقطع از ۳۰ به ۶۰ درصد، تحت دمای نورد یکسان °C ۱۱۰۰، پراکندگی و کاهش فاز فریت محسوس است. همچنین کشیدگی و تغییر شکل ظاهری فاز فریت، به دلیل افزایش میزان درصد کاهش سطح مقطع نیز اتفاق افتاده است. از طرفی در مقایسه با نمونه آنیل شده در دمای °C ۱۲۰۰، کمی افزایش و در مقایسه با نمونه نورد گرم شده در دمای °C ۱۲۰۰ و تحت درصد کاهش سطح مقطع یکسان ۶۰ درصد، میزان فاز فریت، کاهش چشمگیر داشته است. این در حالی است که نسبت به نمونه نورد شده در دمای °C ۱۱۵۰ و تحت درصد کاهش سطح مقطع یکسان ۶۰ درصد، درصد فریت کمی افزایش داشته است. فریت موجود در این نمونه به میزان ۰/۶۵ درصد محاسبه شده است.

شکل (۳-ز)، تصویر ریزساختاری نمونه ۳۰-۱۰۵۰ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، کاهش دما از ۱۱۰۰ به °C ۱۰۵۰، تحت درصد کاهش سطح مقطع یکسان ۳۰ درصد، تاثیر محسوسی بر پراکندگی و شکل ظاهری فاز فریت داشته است؛ به گونه‌ای که فریت از شکل خطوط غیر پیوسته هم‌محور به شکل نقاط منطقه‌ای پراکنده تبدیل شده است. همچنین درصد فاز فریت موجود در این نمونه، با استفاده از نرم‌افزار MIP4 محاسبه شده است که در حدود ۱/۰۷ درصد تخمین زده می‌شود. نتایج مربوط به متالوگرافی این نمونه نشان می‌دهد که با کاهش دمای نورد از ۱۱۰۰ به °C ۱۰۵۰، تحت درصد کاهش سطح مقطع یکسان ۳۰ درصد، میزان درصد فریت به اندازه ۳ درصد

کاهش می‌یابد که میزان قابل توجهی است. همچنین در مقایسه با نمونه نورد شده در دماهای °C ۱۱۵۰ و °C ۱۲۰۰، در درصد کاهش سطح مقطع یکسان ۳۰ درصد نیز، میزان فاز فریت کاهش یافته است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش دما در درصد کاهش سطح مقطع یکسان، درصد فریت ساختار نمونه کاهش می‌یابد. شکل (۳-ح)، تصویر ریزساختاری نمونه ۶۰-۱۰۵۰ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش درصد کاهش سطح مقطع از ۳۰ به ۶۰ درصد، تحت دمای نورد یکسان °C ۱۰۵۰، تغییر محسوسی در پراکندگی و شکل ظاهری فاز فریت δ مشاهده نمی‌شود، اما به نظر می‌رسد که میزان فاز فریت در این شرایط کاهش یافته است. همچنین درصد فریت موجود در این نمونه ۰/۶۳ درصد تخمین زده شده است. نتایج مربوط به متالوگرافی این نمونه نشان می‌دهد که با افزایش درصد کاهش سطح مقطع از ۳۰ به ۶۰ درصد، در دمای نورد یکسان °C ۱۰۵۰، مقدار فریت به اندازه ۰/۴۴ درصد کاهش می‌یابد.

جدول (۳)، درصد فریت موجود در ساختار همه نمونه‌های مورد آزمون را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در مرحله اول و با همگن‌سازی (آنیل کردن نمونه در دمای °C ۱۲۰۰)، میزان فریت نمونه نسبت به نمونه شاهد، به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین در مراحل بعدی نیز با کاهش دمای نورد از °C ۱۲۰۰ تا °C ۱۰۵۰ و با افزایش میزان درصد کاهش سطح مقطع از ۳۰ به ۶۰ درصد، میزان فریت متغیر است و در ساختار نمونه ۶۰-۱۱۵۰ به حداقل مقدار خود (۰/۳۹ درصد) می‌رسد.



شکل ۳- تصاویر متالوگرافی مربوط به نمونه‌های (الف) ۳۰-۱۲۰۰، (ب) ۶۰-۱۲۰۰، (ج) ۳۰-۱۱۵۰، (د) ۶۰-۱۱۵۰، (ه) ۳۰-۱۱۰۰، (و) ۶۰-۱۱۰۰، (ز) ۳۰-۱۰۵۰ و (ح) ۶۰-۱۰۵۰ نمونه.

جدول ۴- میانگین اندازه دانه‌های نمونه‌های مختلف

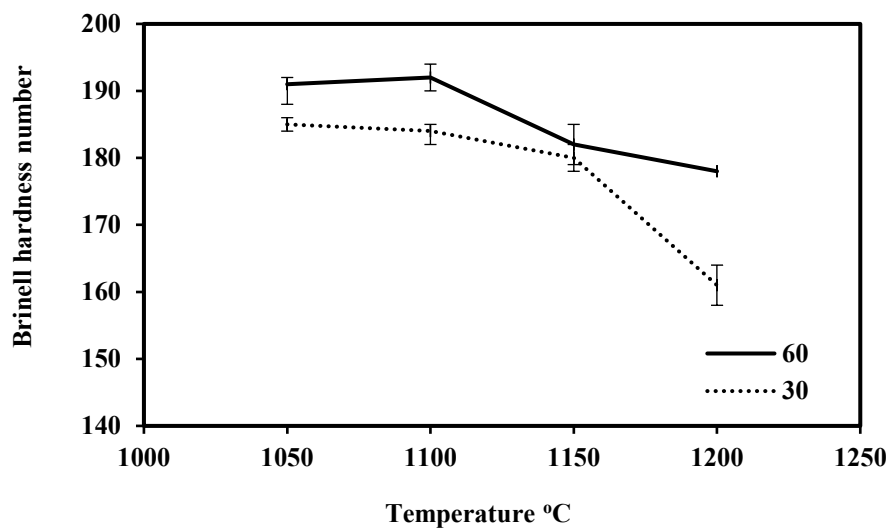
کد نمونه	شاهد	همگن شده	۳۰-۱۲۰۰	۶۰-۱۲۰۰	۳۰-۱۱۵۰	۶۰-۱۱۵۰	۳۰-۱۱۰۰	۶۰-۱۱۰۰	۳۰-۱۰۵۰	۶۰-۱۰۵۰
اندازه دانه (μm)	۷۵/۸۴	۱۴۵/۳۴	۶۳/۵۴	۶۱/۷۲	۶۱/۰۲	۵۷/۱۳	۵۷/۳۲	۵۵/۰۸	۶۱/۲۷	۵۴/۸۳

و همواره مقدار کمی فریت در ساختار وجود خواهد داشت. در مورد نمونه‌های ۶۰ درصد و مقایسه آن با نمونه‌های ۳۰ درصد در یک دمای ثابت، مشاهده می‌شود که در دمای 1200°C ، فریت افزایش می‌یابد ولی در بقیه دماها فریت به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. علت این پدیده می‌تواند اعمال کرنش بیشتر بر نمونه باشد که شرایط را برای نفوذ بیشتر فراهم می‌کند. اعمال کاهش سطح مقطع بیشتر موجب می‌شود که چگالی نقائص شبکه، با اعمال کرنش بیشتر افزایش یابد و شرایط برای نفوذ اتمی بیشتر مهیا شود. در دمای 1200°C که مطابق دیاگرام فاز فریت δ باید افزایش یابد، مقدار این فاز زیاد می‌شود و در سایر دماها مطابق دیاگرام، درصد این فاز کاهش می‌یابد.

۳-۲- محاسبه میانگین اندازه دانه‌ها

میانگین اندازه دانه‌ها علاوه بر این که بر استحکام تاثیر گذار هستند، بر نفوذ مرزدانه‌ای و امکان انحلال یا تشکیل فاز فریت نیز موثر هستند. استحاله فازی از فاز فریت به آستنیت، همراه با نفوذ عناصر کروم و نیکل می‌باشد. در واقع نیکل از فاز فریت به بیرون و کروم به داخل آن، نفوذ می‌کند. در نتیجه فاز فریت ناپایدار شده و حذف می‌گردد. چون نفوذ مرزدانه‌ای با سهولت بیشتری نسبت به داخل دانه انجام می‌شود، لذا هرچه دانه‌ها کوچک‌تر و مرزدانه‌ها بیشتر باشد، استحاله سریع‌تر رخ خواهد داد (۲۴). از این رو اندازه‌گیری میانگین اندازه دانه‌های آستنیت نیز در این پژوهش، مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر متالوگرافی نمونه‌ها توسط نرم‌افزار ImageJ بررسی و میانگین اندازه دانه‌ها محاسبه شد. جدول (۴)، میانگین اندازه دانه‌های هر نمونه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، میانگین اندازه دانه‌های نمونه شاهد پس از همگن‌سازی، درشت‌تر شده

اطلاعات جدول (۳)، به خوبی نشان می‌دهد که اعمال ۳۰ درصد کاهش سطح مقطع روی نمونه همگن‌شده در تمام دماها، موجب افزایش فاز فریت نسبت به نمونه همگن می‌شود. هرچه دما افزایش می‌یابد، سینتیک نفوذ اتمی بیشتر و در نتیجه مقدار فاز فریت نیز افزایش می‌یابد. مقایسه مقدار فریت موجود در نمونه‌های ۶۰ درصد با ۳۰ درصد در دماهای مختلف، نشان می‌دهد که افزایش اعمال کار گرم بیشتر در دمای ثابت، موجب کاهش بیشتر فاز فریت δ می‌شود. علاوه بر این، در نمونه‌های ۶۰ درصد، شرایط بهینه‌ای برای حذف فریت وجود دارد در این شرایط ابتدا با کاهش دما، مقدار فریت تشکیل شده کاهش می‌یابد ولی کاهش بیشتر دما مجدداً موجب افزایش ناچیز مقدار فریت می‌شود. برای تحلیل رفتار نمونه‌ها، می‌توان از دیاگرام فازی مربوط به این سیستم استفاده کرد که در شکل (۱) مرجع (۲۱) ارائه شده است. فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 304 در این دیاگرام، به‌طور تخمینی ترکیب ۲۰-۱۰ را دارا است و این ترکیب از مرز ناحیه γ و $\delta+\gamma$ عبور می‌کند. به همین جهت در این آلیاژ نسبت کروم به نیکل معادل، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و در صورتی که این نسبت کمتر از ۲ باشد، هیچگاه فاز فریت δ به‌طور کامل قابل حذف نیست. علاوه بر این، طبق این دیاگرام، در محدوده دمایی 1000°C تا 1200°C با کاهش دما، درصد فاز فریت نیز کاهش می‌یابد. از این رو باید انتظار کاهش فریت با کاهش دمای نورد را داشت. در پژوهش حاضر نیز دیده می‌شود که در نمونه‌های ۳۰ درصد کاهش سطح مقطع با کاهش دمای نورد گرم از 1200°C به 1050°C ، میزان فریت مرتباً کاهش می‌یابد اما مقدار آن به صفر نمی‌رسد. یکی از دلایل این موضوع می‌تواند کم‌تربودن نسبت واقعی کروم به نیکل معادل در این فولاد باشد. در این شرایط، ترکیب شیمیایی فولاد، در ناحیه $\alpha+\gamma$ قرار می‌گیرد



شکل ۴- مقایسه تغییرات سختی نمونه‌ها در دماهای نورد مختلف و تحت درصد کاهش سطح مقطع ۶۰ و ۳۰ درصد.

همچنین، همان‌طور که در جدول (۴) مشخص شده است، با کاهش دمای نورد، میانگین اندازه دانه‌های ساختار نیز کاهش می‌یابد که در مقایسه با تغییرات سختی می‌توان نتیجه گرفت که این افزایش سختی نمونه‌ها با کاهش اندازه دانه‌ها، در طی کاهش دمای نورد نیز تطابق دارد. همچنین سختی نمونه‌ها، با کاهش دمای نورد از ۱۱۰۰ تا ۱۰۵۰ °C، تغییرات چشمگیری نداشته است؛ همان‌طور که اندازه دانه‌ها نیز به‌ویژه برای کاهش سطح مقطع ۳۰ درصد چندان متفاوت نبود.

نمودار ارائه‌شده در شکل (۴)، تغییرات سختی نمونه‌ها، تحت هر دو درصد کاهش سطح مقطع ۳۰ و ۶۰ درصد را برای مقایسه بهتر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در دمای نورد یکسان، سختی تمامی نمونه‌هایی که تحت درصد کاهش سطح مقطع ۶۰ درصد قرار گرفته‌اند نسبت به نمونه‌های تحت درصد کاهش سطح مقطع ۳۰ درصد، کمی بیشتر است. یکی از دلایلی که باعث افزایش سختی نمونه‌های تحت درصد کاهش سطح مقطع ۶۰ درصد می‌شود، ریزدانه‌تر شدن دانه‌ها تحت درصد کاهش سطح مقطع بیشتر است.

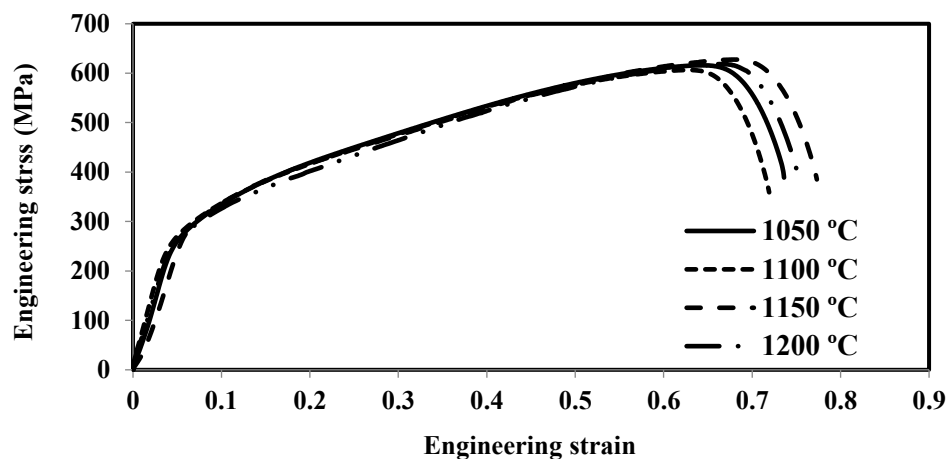
۳-۴- بررسی تغییرات خواص کششی نمونه‌ها

استحکام کششی، یکی از خواص مکانیکی مهم دیگر مواد است

اما پس از اینکه تحت نورد گرم قرار گرفته به‌طور قابل‌توجهی کوچک‌تر شده است. از طرفی در هر مرحله از آزمون، با کاهش دمای نورد و افزایش میزان درصد کاهش سطح مقطع، میانگین اندازه دانه‌ها کوچک‌تر می‌شود. این در حالی است که با کاهش دما از ۱۱۰۰ به ۱۰۵۰ °C در نمونه ۳۰ درصد کاهش سطح مقطع یافته، این اختلاف غیرمعمول و قابل‌توجه است و خطای احتمالی آزمایش است.

۳-۳- بررسی تغییرات سختی نمونه‌ها

تغییرات سختی نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش در نمودار شکل (۴) آورده شده است. همان‌طور که در نمودار شکل (۴) مشخص است، با کاهش دمای نورد از ۱۲۰۰ تا ۱۰۵۰ °C، در هر مرحله، میزان سختی نمونه‌ها افزایش یافته است. در دماهای بالاتر به‌علت سینتیک بیشتر بازیابی و تبلور مجدد، پدیده رشد دانه و کاهش چگالی نابجایی‌ها اتفاق می‌افتد و این موضوع موجب کاهش سختی فولاد می‌شود. بررسی ارتباط بین اندازه دانه و سختی انواع فولاد در پژوهش‌های زیادی انجام شده است و نتایج اکثر تحقیقات نشان می‌دهد که تاثیر اندازه دانه کاملاً مستقل از ترکیب فولاد بوده و با افزایش دمای کار گرم، اندازه دانه افزایش یافته و در نتیجه سختی فولاد کاهش می‌یابد (۲۵).

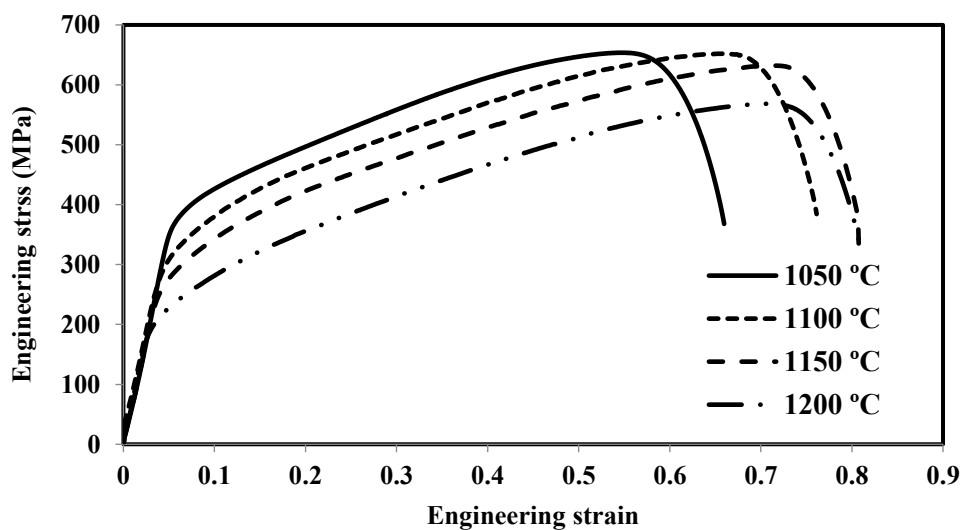


شکل ۵- نمودار تنش- کرنش همه نمونه‌های نورد شده تحت درصد کاهش سطح مقطع ۳۰ درصد و دماهای مختلف.

تسلیم و درصد افزایش طول نمونه‌هایی که در دماهای مختلف آزمایش شده‌اند با اندازه دانه در آنها، نشان می‌دهد با کاهش اندازه دانه، استحکام تسلیم و نهایی افزایش یافته، ولی درصد کاهش سطح مقطع کمتر شده است. در مورد اثر درصد فاز فریت بر استحکام، انتظار می‌رود به دلیل کم‌تر بودن استحکام فاز فریت در مقایسه با فاز آستنیت در دماهای مذکور، با افزایش درصد فاز فریت استحکام نیز کاهش یابد؛ اما نتایج روند مشخصی را نشان نمی‌دهد. دلیل این پدیده می‌تواند وجود اختلاف ناچیز بین این دو فاز باشد. هرچند که با مقایسه نتایج آزمون کشش و آزمون سختی سنجی می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش دما و افزایش درصد کاهش سطح مقطع نورد گرم، استحکام و سختی در نمونه بیشتر می‌شود. نتایج این تحقیق بسیار شبیه نتایج ایماتایا و همکاران (۲۶) است. آن‌ها نیز در مورد اثر دمای تغییر شکل و میزان کاهش سطح مقطع بر خواص مکانیکی فولاد زنگ نزن AISI 304 پرداخته‌اند. آن‌ها بر روی این فولاد از دمای ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ °C در درصدهای کاهش سطح مقطع مختلف، تغییر شکل گرم انجام دادند. آن‌ها متوجه شدند که در یک کاهش سطح مقطع ثابت، با کاهش دمای تغییر شکل، استحکام نهایی و تنش تسلیم در این فولاد افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در یک دمای ثابت با افزایش میزان کاهش سطح مقطع، استحکام نیز زیاد می‌شود.

که در این پژوهش مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون‌های کشش نشان داد که تقریباً در تمام دماهای نورد، درصد افزایش طول، استحکام تسلیم و نهایی نمونه‌های فولادی تحت درصد کاهش سطح مقطع ۶۰ درصد بیشتر از نمونه‌های تحت درصد کاهش سطح مقطع ۳۰ درصد هستند.

شکل (۵)، نمودار تنش-کرنش همه نمونه‌های نورد گرم شده تحت درصد کاهش سطح مقطع ۳۰ درصد و از دمای نورد ۱۰۵۰ تا ۱۲۰۰ °C را به منظور مقایسه بهتر، نشان می‌دهد. مطابق با این نمودار، می‌توان نتیجه گرفت که استحکام همه نمونه‌ها نزدیک به هم هستند و با افزایش دمای نورد از ۱۰۵۰ تا ۱۲۰۰ °C، میزان استحکام و σ_{UTS} تغییر محسوسی ندارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تغییر دما در درصد کاهش سطح مقطع یکسان ۳۰ درصد، تاثیری بر نمودار تنش-کرنش و میزان استحکام نمونه‌ها ندارد. شکل (۶) نیز نمودار تنش-کرنش همه نمونه‌های نورد گرم شده، تحت درصد کاهش سطح مقطع ۶۰ درصد و از دمای نورد ۱۰۵۰ تا ۱۲۰۰ °C را به منظور مقایسه بهتر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در این درصد کاهش سطح مقطع، اختلاف در استحکام و درصد افزایش طول در دماهای مختلف مشهودتر است. نمونه نورد گرم شده در دمای ۱۲۰۰ °C، کمترین استحکام و نمونه نورد گرم شده در دمای ۱۰۵۰ °C، بیشترین میزان استحکام تسلیم و σ_{UTS} را دارد. مقایسه استحکام نهایی، استحکام



شکل ۶- نمودار تنش-کرنش همه نمونه‌های نورد شده تحت درصد کاهش سطح مقطع ۶۰ درصد و دماهای مختلف.

جدول ۵- نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های نورد گرم شده

نمونه	σ_y (MPa)	σ_{uts} (MPa)	%El	%RA
۱۲۰۰-۳۰	۲۲۰	۶۱۸	۴۹	۷۵
۱۲۰۰-۶۰	۱۷۵	۵۶۸	۵۸	۷۸
۱۱۵۰-۳۰	۲۴۰	۶۲۷	۵۳	۶۹
۱۱۵۰-۶۰	۲۳۵	۶۳۲	۶۰	۷۳
۱۱۰۰-۳۰	۲۲۰	۶۰۶	۵۳	۷۳
۱۱۰۰-۶۰	۲۶۵	۶۵۲	۵۷	۷۵
۱۰۵۰-۳۰	۲۲۵	۶۱۵	۵۱	۷۶
۱۰۵۰-۶۰	۳۴۵	۶۵۳	۵۲	۷۹

حاصل از آزمون کشش این نمونه‌ها، با نتایج حاصل از اندازه دانه و نتایج سختی سنجی تطابق داشته و بیانگر این موضوع است که با افزایش درصد کاهش سطح مقطع نورد گرم، اندازه دانه کاهش و در نتیجه سختی و استحکام نمونه افزایش می‌یابد.

جدول (۵)، نتایج مربوط به پارامترهای حاصل از آزمون کشش، از جمله تنش تسلیم (σ_y)، استحکام کششی (σ_{uts})، درصد افزایش طول (%El) و درصد کاهش سطح مقطع (%RA) را برای همه نمونه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده

مقایسه نمودارهای دو شکل (۵) و (۶)، نشان می‌دهد که در یک دما ثابت در تمام محدوده‌های کرنش، استحکام نمونه ۶۰ درصد، اندکی بیشتر از نمونه ۳۰ درصد شده است. البته میزان این اختلاف در دماهای مختلف کمی متفاوت است. همچنین مشخص است که افزایش درصد کاهش سطح مقطع نورد گرم در نمونه ۶۰ درصد، باعث افزایش محسوس σ_{uts} در این نمونه شده که به دلیل کاهش اندازه دانه و همچنین افزایش چگالی نابجایی در نمونه تحت درصد کاهش سطح مقطع بیشتر است. نتایج

می‌شود، نمونه ۶۰-۱۰۵ بیشترین تنش تسلیم و تنش نهایی را دارد که نشان‌دهنده بیشترین استحکام در بین نمونه‌ها است. مقایسه درصد افزایش طول و کاهش سطح مقطع نمونه‌های مختلف نیز نشان می‌دهد که در یک دمای ثابت نمونه‌های ۶۰ درصد نسبت به ۳۰ درصد، درصد افزایش طول و کاهش سطح مقطع بیشتری دارند. نمونه ۶۰-۱۱۵ بیشترین درصد افزایش طول و نمونه ۶۰-۱۰۵ بیشترین کاهش سطح مقطع را دارد و بیانگر شکل‌پذیری بیشتر این نمونه‌ها است. همچنین مقایسه نتایج حاصل از آزمون کشش با نتایج اندازه دانه و نتایج سختی‌سنجی، نشان می‌دهد که نمونه‌های دارای اندازه دانه کوچک‌تر از استحکام بالاتری برخوردار بوده‌اند. همچنین از آنجاکه اعمال درصد کاهش سطح مقطع بیشتر در طی نورد گرم، موجب کوچک‌تر شدن اندازه متوسط دانه‌ها می‌شود، در نتیجه سختی و استحکام نمونه‌های ۶۰ درصد بیشتر است. استحکام و سختی یک فلز به سهولت در جابه‌جایی نابجایی‌ها بستگی دارد. با اعمال کرنش بیشتر، این نابجایی‌ها ممکن است به دلیل تداخل با نابجایی‌های دیگر و اجزای محلول، به شکل پین شده درآیند و بر استحکام تاثیر گذارند. از طرفی، اندازه دانه نیز بر تجمع نابجایی‌ها و در نتیجه بر استحکام ماده تاثیر می‌گذارد. دانه‌ای که اندازه بزرگ‌تری دارد، امکان حرکت راحت‌تر نابجایی‌ها را فراهم می‌آورد و لذا ممانعت کمتری در برابر حرکت نابجایی‌ها ایجاد می‌کند؛ بنابراین نیروی مورد نیاز برای به حرکت درآوردن نابجایی در دانه‌های بزرگ نسبت به دانه‌های کوچک، کمتر است و این موضوع باعث ایجاد تنش تسلیم کمتر در مواد درشت‌دانه می‌شود. به همین دلیل است که برای بهبود خواص مکانیکی ماده، از مکانیزم‌هایی همچون کارسختی، کاهش اندازه دانه و غیره که مانع حرکت نابجایی‌ها می‌گردد، استفاده می‌شود (۲۷ و ۲۸).

نمونه با توجه به جنس ماده، می‌تواند نرم یا سخت (ترد) باشد. شکست نرم به صورت حفره‌ای و همراه با رسوبات بوده و همچنین سطح شکست نسبت به قطر اصلی نمونه کوچک‌تر می‌باشد، زیرا نمونه در مرحله گلوپی شدن کشیده می‌شود. اما شکست ترد، در مواد سخت رخ داده و گلوپی شدن نیز در آن رخ نمی‌دهد، همچنین در این نوع شکست، رخ‌برگی شدن یا دانه‌دانه شدن نمونه مشاهده می‌شود.

سطح شکست نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش نیز پس از آزمون کشش، تحت شکست‌نگاری قرار گرفته و شکل (۷)، به ترتیب، تصاویر SEM با بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰ برابر را برای الف) (نمونه ۳۰-۱۲۰، ب) (نمونه ۶۰-۱۲۰، ج) (نمونه ۳۰-۱۱۵، د) (نمونه ۶۰-۱۱۵، ه) (نمونه ۳۰-۱۱۰، و) (نمونه ۶۰-۱۱۰، ز) (نمونه ۳۰-۱۰۵ و ح) (نمونه ۶۰-۱۰۵) نشان می‌دهد.

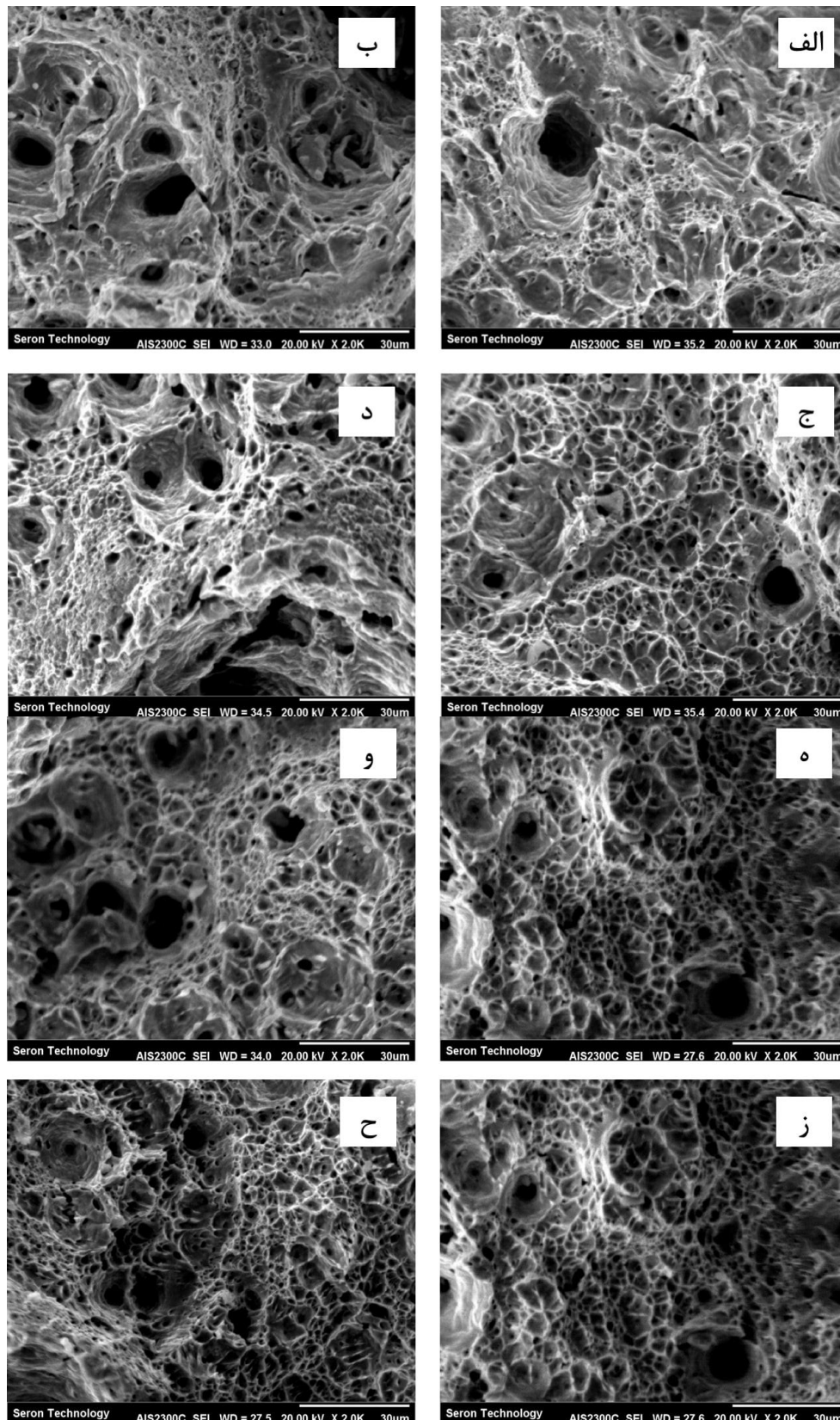
باتوجه به گلوپی شدن نمونه‌ها در حین آزمایش کشش، وجود حفرات ریز و درشت و آثار رسوبات در سطح این نمونه‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که در همه نمونه‌های فولاد آستنیتی AISI 304، شکست نرم رخ داده است. شکست نرم با تغییر شکل پلاستیک زیاد همراه است. در این نوع شکست، ترک‌هایی از فصل مشترک ناخالصی‌ها و زمینه جوانه زده و در راستای تنش اعمالی به نمونه رشد و در نهایت منجر به پارگی ماده در مقطع شکست می‌شود. در نتیجه، در این شرایط حفراتی در مقطع شکست مشاهده می‌شود که در عمق آن‌ها ناخالصی وجود دارد. معمولاً در شکست نرم، انرژی کرنشی بیشتری (نسبت به شکست ترد) لازم است، چراکه مواد نرم چقرمگی بیشتری دارند. فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 304، علاوه بر مقاومت بالا در برابر خوردگی و حرارت، به دلیل داشتن شبکه کریستالی FCC، دارای درصد افزایش طول مطلوبی نیز به علت چقرمه بودن هست.

۴- نتیجه‌گیری

- نتایج حاصل از بررسی ریزساختاری نمونه‌ها نشان داد که ساختار نمونه‌ها شامل آستنیت و فریت δ بوده و با کاهش دمای نورد از ۱۲۰۰ تا ۱۰۵۰ °C و با افزایش میزان درصد

۳-۵- بررسی سطح مقطع شکست نمونه‌ها با SEM

سطح مقطع شکست نمونه‌های فولادی را می‌توان با استفاده از SEM بررسی و اطلاعاتی در رابطه با ساختار مواد، نوع شکست و تحلیل رفتار مواد در شرایط مختلف به دست آورد. شکست



شکل ۷- تصویر شکست نگاری الف) نمونه ۳۰-۱۲۰۰، ب) نمونه ۶۰-۱۲۰۰، ج) نمونه ۳۰-۱۱۵۰،
د) نمونه ۶۰-۱۱۵۰، ه) نمونه ۳۰-۱۱۰۰، و) نمونه ۶۰-۱۱۰۰، ز) نمونه ۳۰-۱۰۵۰ و ح) نمونه ۶۰-۱۰۵۰.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از شرکت فولاد آلیاژی ایران بخاطر تامین آلیاژ مورد نیاز مراتب تشکر و قدردانی را به جای می آورند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافع با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

سهم نویسندگان

سارا اسکندری نژاد: جمع آوری داده ها، مدیریت منابع، تحلیل و تفسیر داده ها. علیرضا مشرقی: طراحی و ایده پردازی مطالعه، تحلیل و تفسیر داده ها، اعتبارسنجی نتایج، راهنمایی پروژه، نوشتن مقاله. سعید حسینی: اعتبارسنجی نتایج، راهنمایی پروژه، نوشتن مقاله.

کاهش سطح مقطع از ۳۰ به ۶۰ درصد، میزان فریت در هر مرحله تغییر می کند؛ به گونه ای که در نمونه ۶۰-۱۱۵۰، درصد فریت موجود در ساختار نمونه به حداقل مقدار خود، یعنی ۰/۳۹ درصد، می رسد.

- نتایج مربوط به بررسی میانگین اندازه دانه ها مشخص کرد که نمونه آنیل شده با اندازه دانه $145/34 \mu m$ ، دارای بزرگ ترین و نمونه ۶۰-۱۰۵۰ با اندازه دانه $54/73 \mu m$ ، دارای کوچک ترین اندازه دانه هستند.
- نتایج حاصل از سختی سنجی نمونه ها نیز مشخص کرد که نمونه آنیل شده با HB ۱۳۸، کمترین و نمونه ۶۰-۱۰۵۰ با HB ۱۹۲، بیشترین سختی را در بین نمونه ها دارد.
- نتایج حاصل از آزمون کشش نشان داد که نمونه ۶۰-۱۰۵۰، بیشترین استحکام و نمونه ۶۰-۱۱۵۰، بیشترین شکل پذیری را در بین نمونه ها دارد.
- نتایج شکست نگاری نمونه ها نیز نشان داد که شکست همه نمونه های مورد بررسی، در شرایط نرم اتفاق می افتد.

واژه نامه

1. peritectic transformation

2. scanning electron microscope (SEM)

مراجع

1. Yao S, Zhang H, Ma F, Liu P, Song L, Li W, et al. Effects of various grain boundary engineering processing on microstructure and corrosion behaviors of 304 stainless steel analyzed with a fractal model. *J Mater Res Technol*. 2023;25:13–24. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.175>
2. Eguchi K. Quantitative analysis of initiation site of pitting corrosion on type 304 austenitic stainless steel. *Corros Sci*. 2023;221:111312. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111312>
3. Sun YT, Kong X, Wang ZB. Superior mechanical properties and deformation mechanisms of a 304 stainless steel plate with gradient nanostructure. *Int J Plast*. 2022;155:103336. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2022.103336>
3. Kumar A, Sharma R, Kumar S, Verma P. A review on machining performance of AISI 304 steel. *Mater Today Proc*. 2022;56:2945–51. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.003>
4. Naghizadeh M, Sohrabi MJ, and Mirzadeh H. Ultrafine grained Fe-Cr-Ni austenitic stainless steels by cold rolling and reversion annealing: A review of progress in Iran. *Ultrafine Grained Nanostructured Mater*. 2020;53(2):210–23. <https://doi.org/10.22059/jufgnsm.2020.02.13>
6. Pugh JW, Nisbet JD. A study of the iron-chromium-nickel ternary system. *JOM*. 1950;2(2):268–76. <https://doi.org/10.1007/BF03399000>
7. Tseng CC, Shen Y, Thompson SW, Mataya MC, Krauss G. Fracture and the formation of sigma phase, M23C6, and austenite from delta-ferrite in an AISI 304L stainless steel. *Metall Mater Trans A*. 1994;25(6):1147–58. <https://doi.org/10.1007/BF02652290>
8. Rezayat M, Mirzadeh H, Namdar M, Parsa MH. Unraveling the Effect of Thermomechanical Treatment on the Dissolution of Delta Ferrite in Austenitic Stainless Steels. *Metall Mater Trans A*. 2016;47(2):641–8. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3242-4>
9. Hsieh CC, Lin DY, Wu W. Dispersion strengthening

- behavior of σ phase in 304 modified stainless steels during 1073 K hot rolling. *Met Mater Int*. 2007; 13(5):359–63. <https://doi.org/10.1007/BF03027868>
10. Venugopal S, Mannan SL, Prasad Y. Influence of strain rate and state-of-stress on the formation of ferrite in stainless steel type AISI 304 during hot working. *Mater Lett*. 1996;26(3):161–5. [https://doi.org/10.1016/0167-577X\(95\)00215-4](https://doi.org/10.1016/0167-577X(95)00215-4)
 11. Han J, Wang Z, Jiang L. Properties of a 304 Austenitic Stainless Steel Hot Strip by TMCP. *J Iron Steel Res Int*. 2007;14(5):282–7.
 12. Campbell GT, Abrahamson EP, Grant NJ. The Recrystallization Behavior of an Austenitic Stainless Steel Ingot Structure Due to Hot Deformation. *Metall Trans*. 1974;5(8):1875–81. <https://doi.org/10.1007/BF02644154>
 13. Bywater KA, Gladman T. Influence of composition and microstructure on hot workability of austenitic stainless steels. *Met Technol*. 1976;3(1):358–65. <https://doi.org/10.1179/030716976803392169>
 14. Niikura M, Takahashi K, Ouchi C. Microstructural change of austenite in hot working with a very high reduction. *Trans Iron Steel Inst Japan* 1987;27(6):485–91. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.27.485>
 15. Asghari Rad P, Nili Ahmadabadi M, Shirazi H. Microstructural evolution of semi-solid AISI 304 stainless steel after severe plastic deformation. *Metall Eng*. 2016;19:94–108. <https://doi.org/10.22076/me.2017.46691.1086>
 16. Kokawa H, Kuwana T, Yamamoto A. Crystallographic characteristics of delta-ferrite transformations in a 304L weld metal at elevated temperatures. *Weld J*. 1989;68(3).
 17. Saied M. Experimental and numerical modeling of the dissolution of delta ferrite in the Fe-Cr-Ni system: application to the austenitic stainless steels. Université Grenoble Alpes (ComUE); 2016.
 18. Ghaderi S, Karimzadeh F, Ashrafi A, Hosseini SH. Effect of pressure, temperature and homogenization on the dissolution behavior and mechanical properties of IN718/AISI 304 during transient liquid phase bonding. *J Manuf Process*. 2020;60:213–26. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.047>
 19. Jia J, Liu Z, Cheng X, Du C, Li X. Development and optimization of Ni-advanced weathering steel: A review. *Corros Commun*. 2021;2:82–90. <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2021.09.003>
 20. Soleymani S, Ojo OA, Richards N. Effect of Composition on the Formation of Delta Ferrite in 304L Austenitic Stainless Steels During Hot Deformation. *J Mater Eng Perform*. 2015;24(1):499–504. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1290-3>
 21. Fu JW, Yang YS, Guo JJ. Formation of a blocky ferrite in Fe–Cr–Ni alloy during directional solidification. *J Cryst Growth*. 2009;311(14):3661–6. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.05.007>
 22. Xu D, Wan X, Yu J, Xu G, Li G. Effect of Cold Deformation on Microstructures and Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel. *Metals (Basel)* 2018;8(7):522. <https://doi.org/10.3390/met8070522>
 23. Plaut RL, Herrera C, Escriba DM, Rios PR, Padilha AF. A Short review on wrought austenitic stainless steels at high temperatures: processing, microstructure, properties and performance. *Mater Res*. 2007;10(4):453–60. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392007000400021>
 24. Kim SH, Moon HK, Kang T, Lee CS. Dissolution kinetics of delta ferrite in AISI 304 stainless steel produced by strip casting process. *Mater Sci Eng A*. 2003;356(1–2):390–8. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00152-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00152-7)
 25. Mitchell BS. An introduction to materials engineering and science for chemical and materials engineers. John Wiley & Sons; 2004. <https://doi.org/10.1002/0471473359>
 26. Mataya MC, Brown EL, Riendeau MP. Effect of hot working on structure and strength of type 304L austenitic stainless steel. *Metall Trans A*. 1990;21(7):1969–87. <https://doi.org/10.1007/BF02647245>
 27. Haidemenopoulos GN. *Physical Metallurgy*. CRC Press; 2018.
 28. Huda Z. *Metallurgy for Physicists and Engineers*. CRC Press; 2020.