



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Effect of As Cast Microstructure on Recrystallization and Recovery Processes of 2304 Duplex Stainless Steel

Alinejad Hossein^{1*}, Korojy Bahman²

1. PhD Student, Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology.

2. Assistant Professor, Department of Materials and Polymer Engineering, Hakim Sabzevari University.

Received: 18 September 2019

Accepted: 14 November 2019

Abstract:

In this research, the effect of cast microstructure on the recovery and recrystallization process of 2304 duplex stainless steel has been investigated. The specimens were hot-formed at low temperatures of 850°C and 950 °C and high temperatures of 1050 and 1150°C by using hot compression test machine at strain rates of 0.001 to 1 s⁻¹. The microstructure changes were studied using optical microscopy equipped by image analyzer. In addition, the apparent activation energies were determined based on the stress-strain hot compression curves. The results show that during of hot deformation of 2304 two-phase stainless steel, the restoration mechanisms in two phase are different, it is performed by dynamic recovery in the ferrite phase and by recrystallization process in the austenite phase. The apparent activation energy Q of the cast microstructure at 850 °C and 1150°C temperatures of hot working is 325 and 150 kJ/mol respectively, which is lower than the applied wrought microstructure.

Keywords:

Cast duplex stainless steel,
Recrystallization,
Recovery,
Apparent activation energy,
Hot working

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

Please cite this article using:

Alinejad H., Korojy B., Effect of as cast microstructure on recrystallization and recovery processes of 2304 duplex stainless steel, in Persian, Founding Research Journal, 2018, 2(3) 201-209.

DOI: 10.22034/FRJ.2018.150953.1053

* Corresponding Author:

Alinejad Hossein, Ph.D. Student

Address: Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Iran

P.O. Box 47148-71167, Tel.: +98 11 35501802, Fax: +98 11 35501801.

E-mail: Alinejad.ho@gmail.com



انجمن علمی ریخته‌گری ایران

فصل‌نامه علمی پژوهشی

پژوهش‌نامه ریخته‌گری

تأثیر ریزساختار ریختگی بر فرایندهای بازیابی و تبلور مجدد فولاد زنگ‌نزن دو فاز ۲۳۰۴

حسین علی‌نژاد^{۱*}، بهمن کروجی^۲۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران، Alinejad.ho@gmail.com (نویسنده مکاتبه کننده)۲- استادیار، گروه مهندسی مواد و پلیمر، دانشگاه حکیم سبزواری، b.korojy@hsu.ac.ir

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۱۱

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۱

در این پژوهش، اثر ریزساختار ریختگی بر فرایند بازیابی و تبلور مجدد فولاد زنگ‌نزن دو فاز ۲۳۰۴ مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌هایی با ریزساختار اولیه ریختگی در دماهای پایین کارگرم ۸۵۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد و دمای بالایی کارگرم ۱۰۵۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد و در سرعت کرنش‌های مختلف ۰/۰۱، ۰/۱، ۰/۱ و ۱ (بر ثانیه) با استفاده از آزمون فشار گرم مورد تغییر شکل قرار گرفتند. تغییرات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری مجهز به سیستم آنالیز تصویر مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین میزان انرژی فعال‌سازی ظاهری کارگرم بر اساس داده‌های تنش-کرنش آزمون فشار گرم تعیین شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که ساز و کار ترمیم در شکل‌دهی گرم فولاد زنگ‌نزن دو فاز ۲۳۰۴، در دو فاز متفاوت است به گونه‌ای که در فاز فریت به وسیله فرایند بازیابی و در فاز آستنیت، توسط فرایند تبلور مجدد رخ می‌دهد. همچنین میزان انرژی فعال‌سازی ظاهری کارگرم برای این فولاد با ریزساختار اولیه ریختگی، در دماهای ۸۵۰ و ۱۱۵۰°C کارگرم به ترتیب ۳۲۵ و ۱۵۰ کیلو ژول بر مول است که نسبت به حالت کار شده، مقادیر پایین‌تری را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی:
فولاد زنگ‌نزن دو فاز
ریختگی،
تبلور مجدد،
بازیابی،
انرژی فعال‌سازی ظاهری،
کارگرم،

۱- مقدمه

منحنی تنش-کرنش حقیقی همراه با یک پیک تنش خواهد بود و سپس با افزایش کرنش، میزان تنش به حالت پایداری می‌رسد در حالی که در فرایند تبلور مجدد دینامیکی، با افزایش میزان کرنش، تنش افزایش یافته و بعد از رسیدن به نقطه پیک، مقداری کاهش در میزان تنش بوجود آمده و سپس با افزایش میزان کرنش به یک حالت پایدار رسیده و تا انتهای تغییر شکل، ثابت می‌ماند. از آنجایی که فرایندهای ترمیم تأثیر بسیار زیادی بر خواص مکانیکی و فیزیکی و همچنین ریزساختار فولادها می‌گذارد، لذا بررسی رفتار کارگرم فولادهای دو فاز در دماهای بالا از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار خواهد بود [۵،۴].

در طول تغییر شکل گرم، رفتار مواد در دماهای بالا، پیچیده و متفاوت است که این وابسته به تغییرات و فرایندهای همچون دما و سرعت کرنش است و به علت بالا بودن درجه حرارت در حین کار گرم، فرایند ترمیم نیز هم‌زمان با آن و

فولادهای زنگ‌نزن دو فاز از نظر ریزساختاری شامل دو فاز فریت و آستنیت هستند که وجود این دو فاز در کنار هم، باعث می‌شود که فولادهای دو فاز دارای خواص خوبی نسبت به فولادهای تک فاز باشند. فولادهای دو فاز دارای چقرمگی بالا، جوش‌پذیری خوب و مقاومت به خوردگی عالی در مقایسه با حالت تک فاز فریتی یا آستنیتی است [۱]. وقتی که یک فولاد دو فاز در دماهای بالا تغییر شکل داده می‌شود، رفتار کارگرم آن به وسیله عواملی همچون خواص مکانیکی، حساسیت به نرخ کرنش، مورفولوژی، پراکندگی و اندازه فازهای ثانویه کنترل خواهد شد [۳،۲].

فرایند ترمیم دینامیکی اتفاق افتاده در فولادهای زنگ‌نزن دو فاز توسط دو میکرومکانیزم مهم بازیابی دینامیکی و تبلور مجدد دینامیکی انجام می‌شود. در بازیابی دینامیکی

ریختگی با ارتفاع ۱۵ میلیمتر و قطر ۱۰ میلیمتر (نسبت ارتفاع به قطر ۳ به ۲) برای انجام آزمون فشار گرم برشکاری و تهیه شد. ترکیب شیمیایی فولاد با استفاده از دستگاه کوانتومتر با دقت بالا اندازه‌گیری شد که میزان عناصر آلیاژی موجود در این فولاد در جدول (۱) بر حسب درصد وزنی آمده است.

برای انجام آزمون فشار گرم از دستگاه یونیورسال کشش-فشار، مدل Roll-Zwick با ظرفیت ۲۵ تن موجود در آزمایشگاه دانشگاه سبزوار استفاده شد. این دستگاه مجهز به کوره مقاومتی با دقت دمایی $\pm 5^{\circ}\text{C}$ که حداکثر تا 1300°C همراه با اتمسفر کنترل شده است، جهت عملیات ترمومکانیکال استفاده شد. تصویر دستگاه آزمون فشار در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی شمش ریختگی فولاد زنگ‌نزن دو فازی ۲۳۰۴ (درصد وزنی)

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Fe
0.06	0.65	0.71	21.03	4.80	0.17	0.028	0.004	Bal.



شکل ۱- دستگاه یونیورسال آزمون فشار مواد

تمام نمونه‌ها قبل از انجام آزمون فشار گرم تحت انجام عملیات هموژن‌سازی در دمای 1200°C و مدت زمان نگهداری ۳۰ دقیقه قرار گرفتند و سپس جهت حفظ ریزساختار همگن شده، سریع در آب خنک شدند. برای انجام آزمون فشار گرم، هر کدام از نمونه‌ها قبل از انجام آزمون، در دمای 1200°C و به مدت ۱۵ دقیقه نگهداری شده و سپس نمونه‌ها به فک دستگاه جهت آزمون کار گرم انتقال داده می‌شوند. بعد از نگهداری به مدت ۳ دقیقه

به طور دینامیک اتفاق می‌افتد [۶]. از آنجایی که رفتار کارگرم یک فولاد دو فازی متأثر از هر کدام از فازهای تشکیل دهنده آن است، لذا فرایند ترمیمی که در این فولادها نسبت به فولادهای تک فاز فریت و آستنیت اتفاق می‌افتد، بسیار پیچیده و متفاوت خواهد بود [۸،۷].

اطلاعات و پژوهش‌های زیادی بر روی رفتار کارگرم فولادهای زنگ‌نزن دو فازی در حالت کار شده انجام گرفته است. در حالی که در حالت ریختگی تحقیقات کمتری انجام شده است. به خوبی مشخص است که تفاوت‌های زیادی بین ریزساختار ریختگی و کار شده وجود دارد که می‌توان به مواردی همچون پراکندگی عناصر آلیاژی (ریزجدایش‌ها و درشت جدایش‌ها)، اندازه دانه و مورفولوژی ریزساختار ریختگی نسبت به حالت کار شده اشاره نمود [۹]. این تفاوت‌ها می‌تواند تغییرات زیادی در رفتار این فولادها در دماهای بالایی کارگرم در حالت ریختگی نسبت به حالت کار شده ایجاد نماید و همچنین سبب تفاوت در میزان انرژی مورد نیاز برای شکل‌دهی در حالت گرم (انرژی اکتیواسیون کارگرم) شود [۱۰].

فولاد ۲۳۰۴ از خانواده فولادهای زنگ‌نزن دو فازی است که شامل دو فاز فریت و آستنیت با کسر حجمی نزدیک به هم که در آن فاز زمینه، فریت است و جزایر فاز آستنیت در داخل آن کشیده شده‌اند و دارای مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی بالایی است [۱۱].

هدف از این پژوهش، بررسی رفتار فولاد زنگ‌نزن دو فازی ۲۳۰۴ با ریزساختار اولیه ریختگی و تاثیر آن بر روی فرایندهای ترمیم بازیابی دینامیکی و تبلور مجدد دینامیکی در دماهای بالا و پایین کارگرم است که توسط یک سری فرایندهای تئوری در فرایند کارگرم صورت می‌گیرد. همچنین از روی آنها به محاسبه میزان انرژی اکتیواسیون کارگرم در شرایط ریختگی برای این فولاد در دماهای مختلف کارگرم با استفاده از معادله سینوس هایپربولیکی پرداخته می‌شود.

۲- مواد و روش تحقیق

برای بررسی اثر ریزساختار اولیه بر روی رفتار کارگرم و مکانیزم‌های ترمیم اتفاق افتاده در فولاد ۲۳۰۴، مواد اولیه مورد آزمایش از شمش ۲ تنی از سری محصولات مجتمع فولاد اسفراین در دسترس قرار گرفت. مواد پژوهش در یک قالب فلزی ریخته‌گری شد و سپس نمونه‌ها با ریزساختار

کسر حجمی فازها با استفاده از نرم‌افزار آنالیز تصویری، حدود ۴۵ درصد فریت و ۵۵ درصد آستنیت به دست آمده است که در شکل (۳) تصویر متالوگرافی آن نشان داده شده است. بیشتر ذرات فاز آستنیت به صورت تقریباً کروی کشیده شده در داخل زمینه فاز فریت پراکنده شده‌اند.

۳- نتایج و بحث

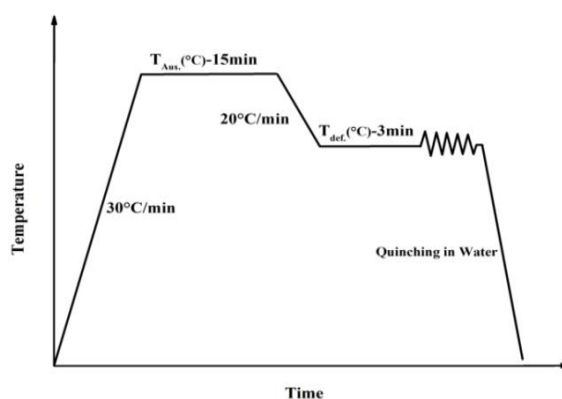
۳-۱- نمودارهای تنش- کرنش

در شکل (۴)، اثر دمای کارگرم و نرخ کرنش بر منحنی‌های سیلان (تنش حقیقی-کرنش حقیقی) فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۳۰۴ نشان داده شده است. به خوبی از منحنی‌های سیلان در دماهای پایین تغییرشکل گرم دیده می‌شود که تنش سیلان تا تنش بیشینه‌ای به سرعت افزایش یافته و سپس با افزایش کرنش، تغییر محسوسی در آن صورت نگرفته است. از طرف دیگر وقتی دمای تغییر شکل گرم افزایش می‌یابد (دمای ۱۰۵۰ و ۱۱۵۰°C)، یک پیک تنش تکی در منحنی‌ها مشاهده می‌شود که در پی کاهش تدریجی تا کرنش حدود ۰/۷ ایجاد خواهد شد. این موارد نشان می‌دهد که یک رابطه‌ای بین منحنی‌های تنش سیلان و کرنش با مکانیزم‌های بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی وجود دارد. می‌توان از این منحنی‌ها استنباط کرد که تنش پیک با افزایش درجه حرارت، کاهش یافته و کرنش در نقطه‌ای که تنش بیشینه است با افزایش دما، کاهش می‌یابد.

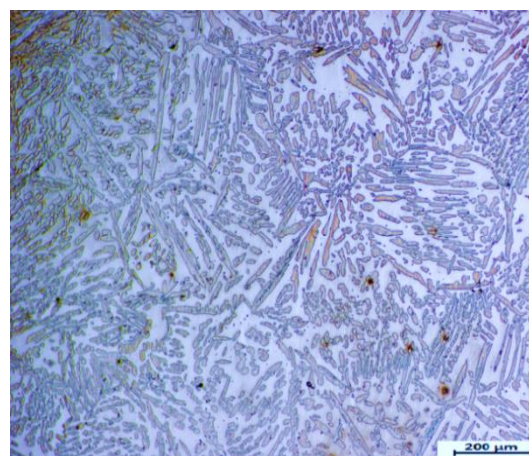
بالا رفتن سریع تنش در منحنی‌های سیلان با افزایش چگالی نابجایی‌ها و وقوع پدیده کارسختی همراه است که این حاصل انجام هم‌زمان کارسختی و بازیابی دینامیکی در طول تغییرشکل گرم است [۱۱، ۹]. وقتی که مقدار کرنش به یک مقدار بیشینه می‌رسد، شکل منحنی به دو صورت نمایان می‌شود: یکی اینکه بعد از انباشتگی و از بین رفتن نابجایی‌ها به یک تعادل دینامیکی می‌رسند و تنش سیلان به مقدار تنش اشباع شده خواهد رسید. نوع دیگر به این صورت است که بعد از کرنش پیک، تنش سیلان به میزان مشخصی کاهش می‌یابد تا این که به حالت تنش اشباع شده برسد و سپس بدون تغییر در میزان تنش ادامه پیدا می‌کند. در ضمن چگالی نابجایی‌ها موضعی در نمونه‌ها به مقدار کافی تا رسیدن به پیک کرنشی افزایش می‌یابد که این می‌تواند یک نیروی محرکه لازم برای تشکیل جوانه‌های تبلور مجدد دینامیکی باشد [۱۱، ۱۲].

(جهت یکنواخت شدن دمای فک دستگاه و نمونه) در دماهای ۸۵۰ الی ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد و سرعت کرنش‌های مختلف ۰/۰۰۱، ۰/۰۱، ۰/۱ و ۱ (بر ثانیه) آزمون فشار انجام شد که شماتیک انجام عملیات ترمومکانیکال در شکل (۲)، نشان داده شده است. تمام نمونه‌ها تا کرنش ۰/۷ تغییرشکل یافته، بعد از انجام آزمایش، در داخل آب سریع خنک‌کاری شدند.

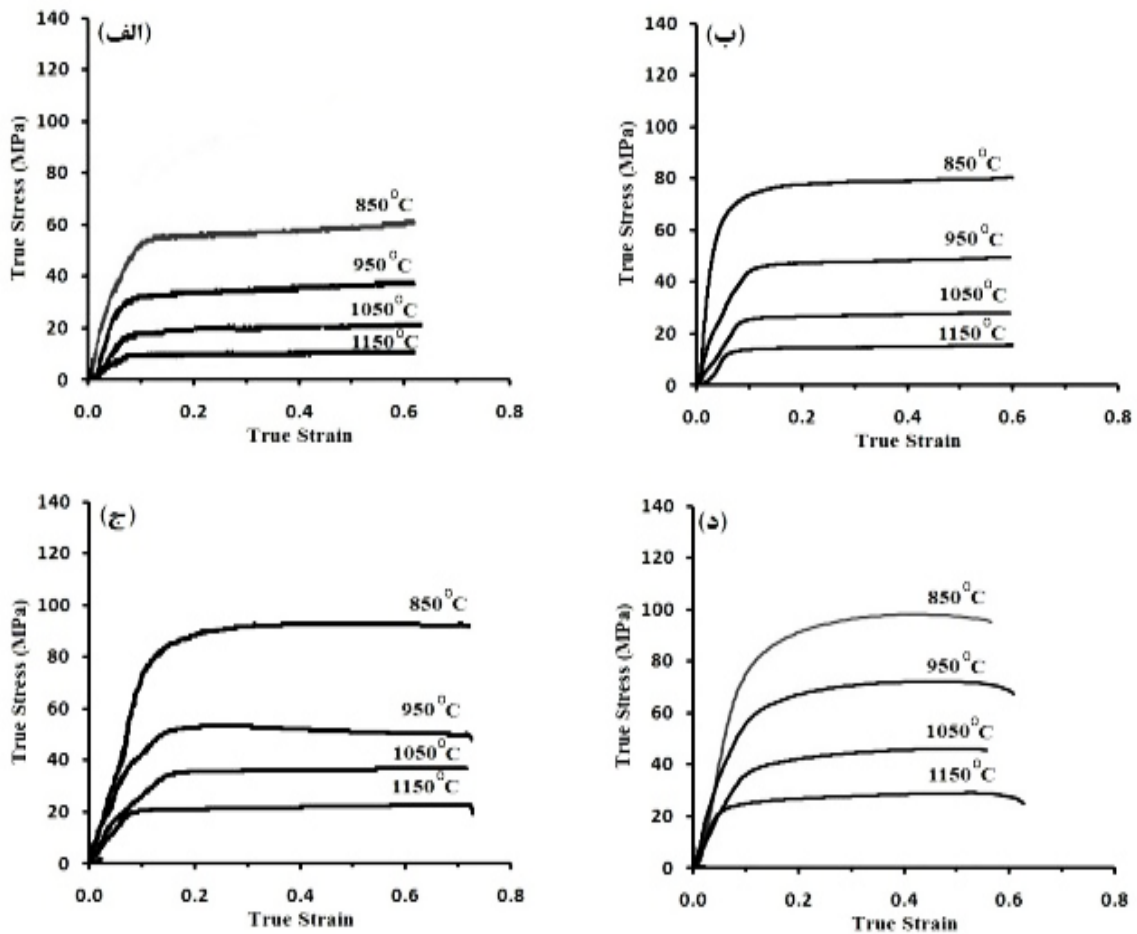
برای بررسی‌های ریزساختاری از میکروسکوپ نوری مجهز به دوربین دیجیتال و سیستم آنالیز تصویر استفاده شد. نمونه‌ها در جهت عمود بر محور فشار برش‌کاری شدند و آماده‌سازی توسط سنباده‌زنی و پولیش‌کاری صورت گرفت و برای حکاکی، نمونه‌ها در محلول ۴۰ درصد اسید نیتریک الکترواچ شدند که در انجام این آزمایش میزان ولتاژ ۳ ولت و در مدت زمان نگهداری در داخل محلول حدود ۱۵ ثانیه در نظر گرفته شد.



شکل ۲- شماتیک عملیات ترمومکانیکال



شکل ۳- ریزساختار نمونه همگن شده بعد از ریخته‌گری



شکل ۴- منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی حاصل از تغییر شکل گرم در دماهای مختلف در نرخ کرنش‌های الف) ۰/۰۰۱، ب) ۰/۰۱، ج) ۰/۱ و د) ۱s⁻¹

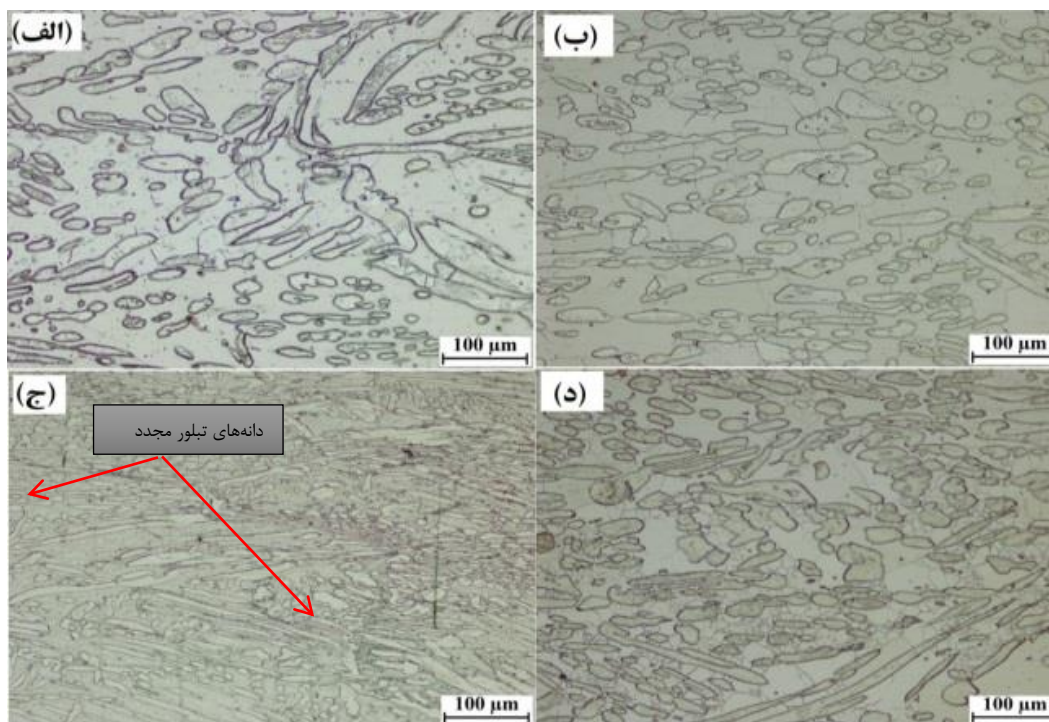
ریزساختار نمونه‌ها بعد از تغییر شکل گرم و در دماهای مختلف آزمون فشار گرم در شکل‌های (ب-۵)، (ج-۵) و (د-۵) نشان داده شده است. با مقایسه شکل (الف-۵) با شکل‌های (ب-۵)، (ج-۵) و (د-۵) به وضوح دیده می‌شود که کسر حجمی فازهای فریت و آستنیت، بعد از تغییر شکل گرم تغییر کرده است. در شکل (ب-۵) به خوبی دیده می‌شود که شکل فاز آستنیت به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نکرده است، ولی اندازه آن نسبت به حالت قبل از تغییر شکل گرم، درشت‌تر شده است. در حالی که از شکل‌های (ج-۵) و (د-۵) مشاهده می‌شود که شکل فاز آستنیت به صورت منطقی از حالت کروی به حالت کشیده شده در آمده است. همچنین ذرات کوچک فاز فریت تشکیل شده است که می‌توان گفت که یک فرایند تبلور مجدد دینامیکی در طول تغییر شکل گرم در فاز فریت اتفاق افتاده است.

پیک کرنش، یک کرنش بحرانی برای انجام و شروع تبلور مجدد است که به دما و سرعت کرنش تغییر شکل گرم، بستگی دارد.

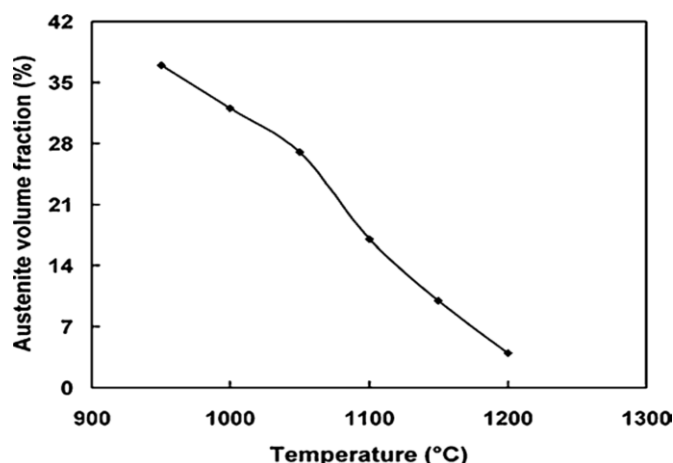
نمودارهای تنش سیلان در شکل (۴) نشان می‌دهند که در دماهای پایین و نرخ کرنش‌های بالا، نشانه و دلیلی از انجام آهسته بازیابی دینامیکی در فاز فریت وجود دارد ولی در فاز آستنیت تبلور مجدد دینامیکی به صورت جزئی اتفاق می‌افتد. در حالی که در دماهای بالا و نرخ کرنش‌های پایین و از روی منحنی‌های سیلان، مشاهده می‌شود که بازیابی دینامیکی در فاز فریت مشخص و غالب است.

۲-۳- ریزساختار

ریزساختار نمونه‌ها قبل و بعد از تغییر شکل گرم در شکل (۵) آمده است. در شکل (الف-۵) ریز ساختار قبل از انجام کار گرم و در حالت ریختگی نشان داده شده است که ذرات و جزایر فاز آستنیت به صورت یکنواخت در داخل زمینه فریت پراکنده شده‌اند و شکل اکثر آنها کروی است.



شکل ۵- ریزساختار فولاد زنگ‌نزن دوفازی: الف) قبل از تغییر شکل گرم و بعد از تغییر شکل گرم در نرخ کرنش $0.1s^{-1}$ و کرنش ۰/۶ در دماهای، ب) $950^{\circ}C$ ، ج) $1050^{\circ}C$ و د) $1150^{\circ}C$



شکل ۶- کسر حجمی فاز آستنیت در دماهای مختلف کار گرم

مجدد در این فازها نسبت به ساختارهای دیگر به آسانی انجام شود.

یکی از عوامل دیگری که روی تبلور مجدد فازها تاثیر می‌گذارد، حرکت مرزدانه‌ها است که توسط رابطه آرینیوسی بیان می‌شود (رابطه ۱). افزایش دما باعث افزایش حرکت مرزدانه‌ها خواهد شد و از طرف دیگر منجر به کاهش چگالی نابجایی‌های بحرانی جهت انجام تبلور مجدد خواهد شد و این درست همان کاهش مقدار کرنش پیک را نشان می‌دهد [۱۳، ۱۲].

تصاویر نشان می‌دهند که ریزساختار قبل از کارگرم، چون دارای ساختار ریختگی (جزایر کشیده شده آستنیت در زمینه فریتی) است و در جهت کاهش درجه حرارت ریزساختار و دانه بندی آن شکل می‌گیرد (جهت انجمادی)، لذا دارای کمترین انرژی فصل مشترکی بین دو فاز فریت و آستنیت است. از طرفی با توجه به تصاویر متالوگرافی نمونه‌ها نشان داده شده در شکل (۴)، چون شکل فازها به صورت کروی است و فصل مشترک کروی در این شکل کمترین انرژی مرز دانه است و این باعث می‌شود که تبلور

$$Z = \varepsilon^{\circ} \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) = A[\text{Sinh}(\alpha \cdot \sigma)]^n \quad (2)$$

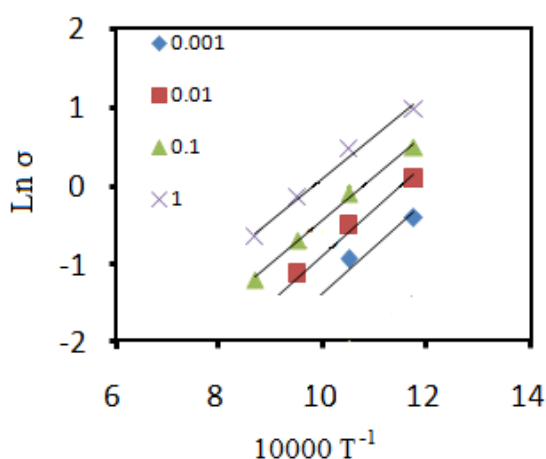
رفتار تغییرشکل گرم مواد فلزی در دماهای بالا، توسط انرژی اکتیواسیون حرارتی کارگرم کنترل می‌شود که مقدار آن به وسیله روابط قانون انرژی به دست می‌آید. مقدار انرژی اکتیواسیون کارگرم را از روی رابطه (۳) و شیب نمودار تغییرات لگاریتم تنش بر حسب معکوس دمای مطلق $(\text{Ln}(\sigma) - 10000/T)$ که در شکل (۷) نشان داده شده است را می‌توان محاسبه نمود.

$$Q = R/m \cdot (\partial \text{Ln} \sigma / (\partial (1/T))) \quad (3)$$

همان‌طور که مشخص است، با افزایش دمای تغییرشکل گرم، مقدار انرژی فعال‌سازی از مقدار ۳۲۸ کیلوژول بر مول در دمای ۸۵۰°C به مقدار ۱۵۰ کیلوژول بر مول در دمای ۱۱۵۰°C کاهش یافته است. مقدار میانگین انرژی تغییرشکل گرم جهت استفاده در رابطه بالا، ۲۳۷ کیلوژول بدست آمد. مقادیر بدست آمده برای انرژی فعال‌سازی تغییرشکل گرم در دماهای مختلف کارگرم بر حسب کیلوژول بر مول در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲- مقادیر انرژی تغییر شکل گرم در دماهای مختلف

درجه حرارت °C (T)				
1150	1050	950	850	
انرژی تغییرشکل گرم (Q) KJ/mol				
150	202	268	328	



شکل ۷- تغییرات انرژی تغییرشکل گرم (شیب نمودار) در نرخ کرنش‌های متفاوت

$$m = m_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (1)$$

در ادامه و در محدوده دمایی انجام آزمون‌های فشار گرم، عملیات آنیل انحلالی در دماهای مختلف از ۹۰۰ درجه سانتیگراد تا ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد بر روی نمونه‌ها صورت گرفت و سپس با انجام متالوگرافی نمونه مشخص شد که با افزایش دما کسر حجمی فاز فریت نسبت به فاز آستنیت افزایش می‌یابد و به نسبت کسر حجمی آستنیت کم می‌شود که در شکل (۵) نشان داده شده است.

به علت اینکه فاز فریت نسبت به آستنیت نرم‌تر است و با افزایش کسر حجمی فاز نرم نسبت به فاز سخت‌تر (آستنیت) در دماهای بالای تغییرشکل گرم (دمای ۱۰۵۰ و ۱۱۵۰°C)، فرایند ترمیم افزایش خواهد یافت، لذا تاثیر شرایط تغییرشکل گرم در شکل (۴) نشان می‌دهد که میزان کرنش منتقل شده به فازها به درجه حرارت و نرخ کرنش اعمالی دارد به طوری که در نرخ کرنش‌های پایین چون فاز فریت نرم‌تر از فاز آستنیت است، لذا این مقدار کرنش کم در فاز فریت اعمال می‌شود و میزان کرنش انتقال داده شده به فاز آستنیت کمتر بوده و شرایط برای جوانه‌زنی دانه‌های تبلور مجدد در آستنیت مهیا نمی‌شود. اما در نرخ کرنش‌های اعمالی بالا، میزان کرنش انتقالی از فاز نرم‌تر فریت به فاز آستنیت بیشتر بوده و در نمودارها، پیک مورد نظر ناشی از جوانه‌زنی دانه‌های ریز تبلور مجدد در ریزساختار بوجود می‌آید. همان‌طور که مشخص است فرایند ترمیم فاز فریت در فولادهای زنگ‌نزن دو فازی، منجر به تشکیل یک شبکه پیچیده‌ای از مرز دانه‌های کوچک زاویه می‌شود (شکل ۵-ج). در فاز فریت هیچ‌گونه تبلور مجدد مشخص و واحدی اتفاق نیفتاده است و به عبارت دیگر تبلور مجدد در فاز آستنیت که دارای انرژی نقص چیدمان پایینی است، اتفاق می‌افتد. شکل (۴-ج) و (۴-د) نشان می‌دهد که فاز آستنیت، دارای دانه‌های محوری کوچکی است که ریزساختار با چنین شرایطی نیاز به انجام مکانیزم ترمیم توسط تبلور مجدد خواهد بود [۱۳]. از آنجایی که تنش جریان، حساسیت کمتری به میزان کرنش دارد، و تغییرات آن با درجه حرارت و نرخ کرنش اعمالی را می‌توان با استفاده از معادله سینوس‌های پیروبولیکی و پارامتر زنگ-هولمن نشان داده شده در رابطه (۲) بیان نمود [۱۴، ۱۵].

- می‌نمایند. افزایش دمای تغییرشکل گرم و کاهش نرخ کرنش اعمالی، وقوع تبلور مجدد دینامیکی در فولاد را سرعت می‌بخشند.
- ۲- ریزساختار اولیه تاثیر زیادی بر روی رفتار تغییرشکل فولاد زنگ‌نزن دوفازی می‌گذارد و مکانیزم‌های ترمیم اتفاق افتاده در هر فاز را تحت تاثیر قرار می‌دهد.
- ۳- تصاویر میکروسکوپی نشان می‌دهند که بازبازی دینامیکی در تمام دماها و نرخ کرنش‌ها رخ می‌دهد، در حالی تبلور مجدد در فاز آستنیت فقط در دماهای بالا و نرخ کرنش‌های بالا اتفاق می‌افتد.
- ۴- از معادله فازی سینوس‌هایریبولیکی برای تعیین ارتباط بین منحنی‌های جریان و پارامتر زبر-هولمن برای فولاد دوفازی ۲۳۰۴ استفاده شد.
- ۵- انرژی اکتیواسیون تغییرشکل گرم برای فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۳۰۴، مقدار ۲۳۷ کیلوژول در شرایط ریختگی بدست آمد که نسبت به حالت کارشده مقدار کمتری را نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] Cizek P., Wynne B.P., A mechanism of ferrite softening in a duplex stainless steel deformed in hot torsion, *Materials Science and Engineering A*, 1997, 230 (1-2) 88-94.
- [2] Mao P., Yang K., Su G., Hot deformation behavior of an as-cast duplex stainless steel, *Materials Science and Technology*, 2003, 19, 379-381.
- [3] Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels, Published by the International Molybdenum Association (IMOA), London, UK. 1999.
- [4] Maehara Y., Effect of microstructure on hot deformation in duplex stainless steels, *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1992, 26(11) 1701-1706.
- [5] Johansson P., Liljas M., A new lean duplex stainless steel for construction purposes, *Proceedings of 4th European Stainless steel Conference Science and Market*, Paris 2002.
- [6] Maehara Y., Fujino N., Kunitake T.: *Trans. ISIJ*, 1983, 23, 247.
- [7] Wei Z., Laizhu J., Jincheng H., Hongmei S., Study of mechanical and corrosion properties of a duplex stainless steel, *Materials Science and Engineering A*, 2008, 497, 501-504.
- [8] Martins M., L.C. Casteletti, Microstructural characteristics and corrosion behavior of a super duplex stainless steel casting, *Materials Characterization*, 2009, 60(2) 150-155.
- [9] Martins M., Casteletti L.C., Sigma phase morphologies in cast and aged super duplex stainless steel under hot working conditions, *Materials Characterization*, 2004, 24, 1-10.
- [10] Cizek P., Wynne B.P., A mechanism of ferrite softening in a duplex stainless steel deformed in hot

مقادیر انرژی فعال‌سازی جدول (۲) نشان می‌دهد که این میزان در دماهای بالا و پایین با هم یکسان نیست و تابعی از این است که کدام مکانیزم ترمیم (بازبازی و تبلور مجدد) در طول فرایند کارگرم مکانیزم غالب است که می‌تواند به عنوان یک شاخص مقاومت در برابر تغییرشکل در مواد مختلف در نظر گرفته شود. در مواد با انرژی نقص چیدمان بالا مانند فریت، مکانیزم لغزش متقاطع و صعود نابجای‌ها به طور مشخص در دماهای بالا اتفاق می‌افتد. بنابراین مکانیزم حذف نابجایی‌ها و آرایش مجدد آنها (بازبازی) در جاهایی که مقاومت در برابر تغییر شکل کمتر است و میزان انرژی فعال‌سازی کم‌تری دارد، رخ می‌دهد. این در حالی است که در آستنیت با انرژی نقص چیدمان پایین، مکانیزم لغزش متقاطع نابجایی‌ها و حذف و آرایش مجدد نابجایی‌ها در دماهای بالاتری صورت می‌گیرد سرعت پایین بازبازی دینامیکی باعث تجمع کرنش در ساختار شده که منجر به رخ دادن تبلور مجدد دینامیکی می‌شود. بنابراین انرژی فعال‌سازی Q برای تبلور مجدد در آستنیت، بالاتر از بازبازی دینامیکی در فریت است [۱۱]. همچنین می‌توان بیان کرد که پایین آمدن انرژی فعال‌سازی با افزایش درجه حرارت به این دلیل است که با افزایش دما، کسر حجمی فاز فریت افزایش و کسر حجمی فاز آستنیت کاهش می‌یابد، که در شکل (۶) به خوبی نشان داده شده است [۱۵].

علت کاهش میزان انرژی فعال‌سازی در پژوهش حاضر در مقایسه با نتایج منابع دیگر [۱۱] به نظر می‌رسد به دلیل ریزساختار اولیه ریختگی آلیاژ فوق است. در حالت ریختگی به دلیل ریزساختارهای اتفاق افتاده در فضاهای بین‌دندریتی، ساختار انجمادی و ناهمگنی عناصر آلیاژی در آن است. با بالا رفتن دما این ریزساختارها در ریزساختار حل شده و مکان‌های لازم برای جوانه‌زنی تبلور مجدد کاهش می‌یابد و ریزساختار کمتر تحت فرایند تبلور مجدد قرار می‌گیرد. علاوه بر این، همان‌طور که در بالا نیز به آن اشاره شد، با افزایش دما جهت انجام کارگرم بر روی آلیاژ فوق، کسر حجمی فریت افزایش می‌یابد و این هم به نوبه خود باعث کاهش انرژی فعال‌سازی تغییرشکل گرم می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

۱- متغیرهای موثر بر تغییرشکل گرم مانند دما و نرخ کرنش، رفتار مواد را در حین تغییر شکل گرم مشخص

- torsion. *Materials Science and Engineering A*, 1997, 230 (1-2) 88-94.
- [11] Duprez L., De Cooman B.C., Akdut N., Flow stress and ductility of duplex stainless steel during high-temperature torsion deformation, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002, 33(7) 1931-1938.
- [12] Farniush H., Momeni A., Dehghani K., Aghazadeh J. Mohandesi, Keshmiri H., Hot deformation characteristics of 2205 duplex stainless steel based on the behavior of constituent phases, *Materials and Design*, 2012, 311, 220-226.
- [13] Humphreys F.J., Hatherly M., *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, Pergamon Press, 2004.
- [14] Luo J., Effect of the strain on the deformation behavior of isothermally compressed Ti-6Al-4V alloy, *Materials Science and Engineering A*, 2009, 505(1-2) 88-95.
- [15] Bruschi S., Workability of Ti-6Al-4V alloy at high temperatures and strain rates, *Materials Letters*, 2004. 58(27-28) 3622-3629.