



بررسی رفتار تغییر شکل گرم فولاد دو فازی ۲۳۰۴

مریم خواجه جعفری^{۱*}، حمیدرضا عزت پور^۲، غلامرضا ابرهیمی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، نام دانشگاه حکیم سبزواری

۲- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه حکیم سبزواری

۲- استاد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

ایمیل نویسنده مسئول: r.ebrahimi@um.ac.ir

چکیده

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای بر رفتار گرم فولاد های دو فازی صورت گرفته است؛ هدف مطالعات انجام گرفته به منظور بررسی و رفتار تغییر شکل گرم این دسته از آلیاژها می‌باشد. با پیشرفت این دسته از آلیاژها و توسعه جدید از ترکیبات این آلیاژها بررسی‌های رفتار گرم به منظور تحلیل‌های رفتار سیلانی فولادها انجام پذیرفت؛ طی پژوهش حاضر رفتار تغییر شکل گرم فولاد دو فازی ۲۳۰۴ در سه دمای ۹۵۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۵۰°C و سه نرخ کرنش ۰/۰۱، ۰/۱ و ۱ s⁻¹ مورد بررسی قرار گرفت. انرژی فعال سازی لازم برای تغییر شکل فولاد دو فازی ۲۳۰۴ حدود ۲۳۱ کیلوژول محاسبه شد. آرایه نتایج، سازگاری مناسب را بین نتایج مکانیکی و ریزساختاری بیان می‌کند، به طوری که با افزایش درصد فاز آستنیت به عنوان یک فاز سخت و استحکام بالا سطح تنش لازم برای تغییر شکل افزایش می‌یابد و با کاهش درصد فاز آستنیت سطح تنش سیلان متقابلاً کاهش می‌یابد. رفتار نمودارهای تنش-کرنش حقیقی نشان داد که نمونه تغییر شکل یافته در دمای ۹۵۰°C و نرخ کرنش ۱ s⁻¹ ۰/۰۱ در مقایسه با دمای ۱۱۵۰°C و نرخ کرنش ۱ s⁻¹ دارای بیشترین سطح تنش بیشینه و با حدود ۵۰٪ فاز آستنیت دارای بیشترین درصد آستنیت تبلور یافته است.

واژه‌های کلیدی: فولاد دو فازی ۲۳۰۴، فشار گرم، تنش سیلان، آستنیت

مقدمه

فولادهای زنگ نزن دو فازی از جمله فولادهایی هستند که دارای خواص خوردگی به همراه استحکام و قابلیت تولید بالایی می‌باشند. خواص فیزیکی این فولادها حدفصل بین فولادهای زنگ نزن فریتی و آستنیتی بوده که بیشتر به فولادهای زنگ نزن فریتی شباهت دارند [۱]. مقاومت به خوردگی شیاری و حفره‌ای در این فولادها تابعی از مقدار کروم، مولیبدن، تنگستن و نیتروژن موجود در فولاد می‌باشد. تمامی فولادهای زنگ نزن دو فازی دارای مقاومت به خوردگی تنشی (در محیط کلریدی) بالاتری نسبت به فولادهای زنگ نزن آستنیتی سری ۳۰۰ بوده و همچنین استحکام بسیار بالاتری نسبت به فولادهای آستنیتی از خود نشان می‌دهند. به دلیل وجود مقادیر بالای عناصر آلیاژی در این فولادها، تولید آن‌ها نیازمند اتخاذ تدابیر ویژه‌ای می‌باشد به طوری که تولید آن‌ها در مقایسه با دیگر فولادها متفاوت بوده ولی پیچیده نمی‌باشد [۲].

فولاد ۲۳۰۴ حاوی تیتانیوم یکی از معروف‌ترین اعضای خانواده فولادهای زنگ نزن دو فازی است که به دلیل مقاومت به خوردگی عالی در بخش‌های

مختلف صنعت از جمله تأسیسات آب دریا، صنایع شیمیایی و پتروشیمی و نیروگاه‌های تولید برق کاربرد وسیعی دارد [۳].

در آلیاژهای دو فازی با کسر حجمی نزدیک به هم، استحاله‌های فازی و فرآیندهای ترمیم که اغلب در طول عملیات ترمودینامیکی این آلیاژها رخ می‌دهند، به منظور ریز کردن ساختار به کار برده می‌شوند. به طور کلی توزیع کرنش بین دو فاز به نسبت کسر حجمی آن‌ها، اندازه فازها و استحکام آن‌ها بستگی خواهد داشت. رفتار تبلور مجدد آلیاژهای دو فازی تحت تاثیر این عوامل قرار می‌گیرند و این شرایط زمانی است که ساختار آلیاژهای دو فازی قبل از تغییر شکل در وضعیت تعادلی باشند و چنانچه عملیات ترمومکانیکی در شرایطی که ساختار در وضعیت تعادلی نیست انجام گیرد امکان انجام استحاله فازی نیز وجود دارد [۴، ۵، ۶]. در چنین شرایطی اندرکنش بین تغییر شکل، تبلور مجدد و استحاله فازی، شرایطی پیچیده را به وجود خواهد آورد. اگر تغییر شکل در دمایی بالاتر از استحاله فازی صورت گیرد، فرآیندهای ترمیم قبل از استحاله فازی صورت می‌گیرد که این شرایط در فرآیند شکل‌دهی گرم به وضوح دیده می‌شود. ولی چنانچه تغییر شکل در محدوده دمای استحاله انجام شود جهت مصرف انرژی ذخیره شده حاصل از تغییر شکل، بین فرآیندهای ترمیم و استحاله فازی رقابتی صورت می‌گیرد. در صورتی که تبلور مجدد قبل از استحاله فازی صورت بگیرد امکان انجام استحاله پس از آن با سرعت کمتری وجود خواهد داشت، اما چنانچه ابتدا استحاله فازی صورت بگیرد کل انرژی ذخیره شده در قطعه را مصرف نموده و نیروی محرکه جهت وقوع تبلور مجدد را کاهش می‌نماید [۷ و ۸]. فان و همکارانش [۹] در تحقیقی اثر پارامترهای تغییر شکل گرم (نرخ کرنش و دمای تغییر شکل گرم را بر روی رفتار و میکروساختار فولادهای زنگ نزن دو فازی در شرایط ریختگی) مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. ایشان پس از انجام آزمون فشار گرم به این نتیجه رسیدند که در فاز فریت در طی تغییر شکل گرم تنها تبلور مجدد دینامیکی رخ می‌دهد، در صورتی که فاز آستنیت دچار بازیابی دینامیکی می‌شود [۱۰].

دو پارامتر ترمومکانیکی مورد بررسی دما و نرخ کرنش تاثیر مستقیم بر رفتار تغییر شکل گرم دارند، تاثیر همزمان هر دو پارامتر ترمومکانیکی در رابطه (۱) زنر-هولمن نشان داده شده است [۳].

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

رابطه (۲) ارتباط تنش سیلان با دو پارامتر نرخ کرنش و ضریب حساسیت به نرخ کرنش را نشان می‌دهد [۳].

$$\sigma = K(\dot{\epsilon})^m \quad (2)$$



روش تحقیق

در تحقیق حاضر به منظور بررسی رفتار کار گرم آلیاژ ۲۳۰۴ از دستگاه Zwiek-Roell مدل Z250 برای انجام آزمون فشار گرم استفاده شده است. به همین جهت نمونه‌هایی با قطر ۱۰ میلی متر و ارتفاع ۱۲ میلی متر از شمش نورد شده تهیه شدند. آزمون‌های فشار گرم در دماهای ۹۵۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۵۰°C و نرخ کرنش‌های ۰/۰۱، ۰/۱ و ۱S⁻¹ انجام گرفت و بلافاصله بعد از انجام آزمون فشار گرم در آب به جهت حفظ ریز ساختار دما بالا کوینچ شدند. به منظور بررسی ریزساختار و تغییر و تحولات ساختاری نمونه‌ها متالوگرافی شدند. برای آماده سازی سطح نمونه‌ها، ابتدا نمونه‌ها سمباده زنی شده و سپس پولیش مکانیکی انجام شد و نمونه‌ها تحت تصویر برداری میکروسکوپ نوری و الکترون روبشی قرار گرفتند.

ارائه نتایج و بحث

تأثیر نرخ کرنش بر رفتار تغییر شکل گرم فولاد ۲۳۰۴

با توجه به نمودارهای تنش حقیقی - کرنش حقیقی (شکل‌های ۱، ۲ و ۳) منطقه اول در ناحیه الاستیک می باشد که تنش به صورت خطی در حال افزایش است، در این ناحیه نیروی متمرکز و اصلی فاز فریت را که استحکام کمتری نسبت به فاز آستنیت دارد شامل می‌شود و مجدداً با افزایش تنش و کرنش ماده وارد منطقه پلاستیک شده و بعلافت شدت تنش، تنش حاکم از فاز فریت (نرمتر) به فاز آستنیت (سخت تر) جهت مقاومت در برابر تنش وارده، انتقال پیدا کرده که منطقه دوم را شامل می‌شود. ناحیه سوم بعد از تنش ماکزیمم می باشد که بعلافت رخ داد پدیده‌های متالورژیکی نظیر بازیابی دینامیکی و شروع تبلور مجدد دینامیکی تنش در ماده کاهش یافته و در یک تنش ثابت و پایدار تا اتمام کرنش نهایی مورد نظر ادامه پیدا می‌کند [۸]. مقایسه نمودارهای تنش حقیقی بر حسب کرنش حقیقی در دسه دمای ۹۵۰°C، ۱۰۵۰°C و ۱۱۵۰°C نشان می‌دهند، که با افزایش نرخ کرنش، همزمان سه پارامتر تنش سیلان، تنش ماکزیمم و تنش حالت پایدار نیز افزایش پیدا می‌کنند. افزایش تنش سیلان به جهت افزایش دانسیته نابجایی‌ها می‌باشد که متقابلاً افزایش در میزان کار سختی را به همراه دارد، بعد از تنش ماکزیمم تنش سیلان ماده حالت ثابت و پایدار خود را حفظ کرده و افزایش تنش وجود ندارد که پدیده‌ی قالب را می‌توان بازیابی دینامیکی معرفی نمود؛ این پدیده در اثر منظم شدن سریع نابجایی‌ها بعلافت وجود دو نیرو محرکه دما و تنش رخ می‌دهد که تشکیل شدن دانه‌های کم زوایه را به همراه دارد [۹].

منحنی‌های تنش حقیقی - کرنش حقیقی در دماهای ۱۰۵۰°C و ۱۱۵۰°C به ترتیب افزایش دما یک روند خاص را در رفتار گرم منحنی‌های تنش کرنش نشان می‌دهند. با افزایش دما سطح تنش سیلان در تمام دماها کاهش یافته، تنش پایدار و تنش بیشینه نیز رفتار مشابه کاهشی را به همراه دارد. در هر دو دما مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ کرنش رفتار تنش در حالت پایدار نسبت به تنش‌های پایین‌تر تغییرات محسوس کرده و در سرتاسر کرنش ناحیه پایدار ثابت نبوده و با افزایش نرخ کرنش تغییرات ناحیه پایدار بیشتر شده است. با افزایش دما و افزایش نرخ کرنش تغییرات در رفتار ناحیه پایداری بیشتر شده و شرایط ثابتی را به خود اختصاص نداده که علت تغییرات رفتار را می‌توان به دو عامل مهم افزایش دما و کاهش سد انرژی برای جوانه زنی و تبلور مجدد و هم چنین افزایش دانسیته نابجایی‌ها در نرخ

رابطه (۳) جهت دستیابی به ضریب حساسیت به نرخ کرنش با دیفرانسیل گیری از دو طرفه رابطه و فرض ثابت بودن k رابطه جدید (۳) را ارائه می‌دهد.

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \quad (3)$$

افزایش دما افزایش حساسیت به نرخ کرنش را به همراه دارد. فاز فریت در دمای بالا مکانیزم بازیابی دینامیکی را نشان می‌دهد، هر چه دما افزایش پیدا کند، سینتیک بازیابی دینامیکی در فاز فریت افزایش پیدا می‌کند و بعلافت افزایش کرنش موضعی در این ناحیه و عدم ادامه تغییر شکل، جابجایی تمرکز تنش و نیرو از فاز فریت بر فاز آستنیت (فازی سخت) انجام می‌گیرد؛ همانطور که مورد بررسی قرار گرفت دمای بالا اساس و پایه تحلیل قبل است که حساسیت به نرخ کرنش را افزایش داده و رفتار ماده را در تحمل نیرو حساس‌تر خواهد کرد [۳].

در دمای بالا تسریع در منظم شدن نابجایی‌ها در فاز فریت وجود دارد و مکانیزم قالب به انجام پدیده‌ی بازیابی و تکمیل آن در این فاز کمک می‌کند. تحرک بالای نابجایی‌ها فاز فریت را به عنوان یک فاز کارپذیر با حساسیت به نرخ کرنش بالا (m) در دمای بالا معرفی می‌کند. سرعت انجام بازیابی در فاز آستنیت نسبت به فاز فریت کمتر است. با افزایش نرخ کرنش دانسیته نابجایی‌ها افزایش پیدا کرده به طوری که در دمای بالا زمان کافی برای حذف نابجایی‌ها وجود ندارد و کاهش ضریب حساسیت را به همراه دارد [۵]. معادله ۴ پارامتر زئر-هولمن را بر اساس سینوس هایپربولیک آلفا سیگما معرفی می‌کند؛ رابطه ۵ وابستگی انرژی فعال سازی را به پارامتر آلفا و دما به خوبی نشان می‌دهد. پارامتر آلفا توسط رابطه ۶ قابل تحلیل خواهد بود [۷].

$$Z = A [\sinh \alpha \sigma_p]^n \quad (4)$$

$$Q = \frac{\partial \ln \sinh \alpha}{\partial RT} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\beta}{n'} \quad (6)$$

مجهول‌های مورد بررسی با توجه به رابطه‌های ۵ و ۶ پارامترهای n ، β و n' هستند [۷].

ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m) با پارامتری به نام n' قابل تعریف است که رابطه معکوس نسبت به هم دارند یعنی $m = 1/n'$ برقرار است و با کمک رابطه ۳ می‌توان n' را به صورت رابطه ۷ تعریف کرد.

$$n' = \frac{\partial \ln \sigma_0}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \quad (7)$$

پارامتر n' برای فولاد دو فازی ۲۳۰۴ با کمک رابطه ۳ و تغییرات لگاریتم نرخ کرنش بر حسب تغییرات لگاریتم تنش قابل تعریف است، پارامتر n' برای فولاد دو فازی ۲۳۰۴ با کمک اطلاعات تنش-کرنش و همچنین روابط تعریف شده در دماهای ثابت قابل محاسبه است.

بیان مسئله، نوآوری و ذکر اهداف

فولاد ۲۳۰۴ در کمپانی‌های متفاوت صنعتی به روش فورج تولید می‌شود، دستیابی به پارامترهای میزان کرنش، دمای کاری، تنش اعمالی و ... جزئی از دغدغه‌های مهم صنعتی کاران است، لذا در پژوهش حاضر در نظر است تا به کمک طراحی آزمون فشار گرم در دماها و نرخ کرنش‌های متفاوت رفتار فولاد دو فازی ۲۳۰۴ مورد سنجش و ارزیابی قرار گیرد و رفتار دقیق تبلور مجدد در آلیاژ مورد نظر به جهت دستیابی به چقرمگی بالا مورد بررسی قرار گیرد.



است؛ به این صورت که افزایش چگالی نابیایی‌ها با افزایش میزان تنش و هم چنین حذف نابیایی‌ها با نیرو محرکه دما توسط تشکیل دانه‌های عاری از کرنش (تبلور مجدد یافته) همراه است و به تعادل رسیده و تنش سیلان ماده ثابت می‌ماند و یک شرایط پایدار را تا انتهای کرنش نهایی حفظ می‌کند، رفتار دوم مربوط به افزایش تنش تا یک مقدار حداکثر است و سپس کاهش یافته و به تنش پایدار میل پیدا کرده است؛ افزایش موضعی دانسیته نابیایی-ها به عنوان نیروی لازم برای شکستن سد انرژی جوانه زنی (تبلور مجدد) عامل تاثیر گذار بر رفتار دوم از منحنی‌های تنش-کرنش است [۷ و ۸].

تاثیر دما بر رفتار تغییرشکل گرم فولاد ۲۳۰۴

با تکیه بر مباحث نظری؛ در نرخ کرنش ثابت با افزایش دما سطح تنش سیلان کاهش پیدا کرده و تنش حالت پایداری و تنش بیشینه نیز کاهش پیدا می‌کنند؛ نمودارهای تنش حقیقی بر حسب کرنش حقیقی در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نیز این تئوری را تایید می‌کنند.

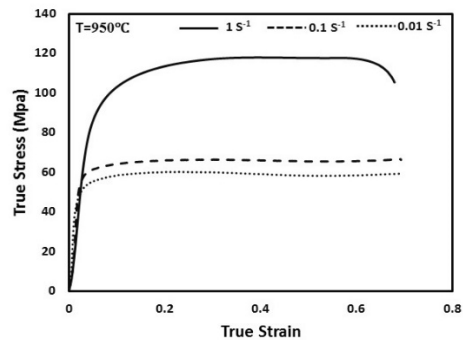
مقایسه نمودارهای کرنش ثابت، کاهش تنش سیلان و کاهش کرنش ناحیه پایدار را در برابر افزایش دما نشان می‌دهد. علت کاهش کرنش ناحیه پایدار افزایش دما می‌باشد که سد انرژی برای به تعادل رسیدن سیستم را (حذف و تولید نابیایی‌ها) نسبت به دماهای پایین تر راحت می‌شکند و شروع تعادل سیستم (ناحیه پایداری) در کرنش‌های پایین‌تری رخ می‌دهد و نمودار تنش کرنش در اثر افزایش دما به سمت چپ میل پیدا می‌کند.

با در نظر گرفتن ثابت بودن نرخ کرنش در اثر کاهش دما میزان تنش سیلان بیشینه افزایش یافته که متقابلاً کرنش تنش متناظر نیز افزایش داشته و بعد از تنش بیشینه سطح تنش کاهش پیدا کرده و در یک مقدار ثابت تا کرنش نهایی ادامه می‌یابد که علت کاهش سطح تنش افزایش نابیایی‌ها و افزایش دما حذف نابیایی‌ها و رخ دادن پدیده تبلور مجدد دینامیکی و دانه‌های عاری از کرنش را به همراه دارد که غلبه کار نرمی بر کار سختی را نشان می‌دهد [۸].

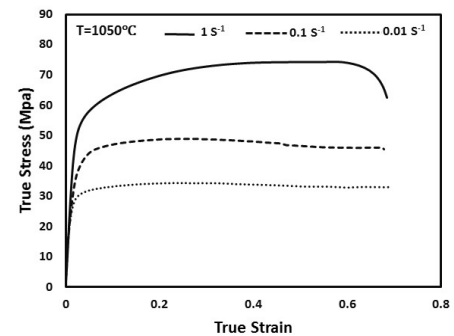
منحنی‌های فشار گرم بررسی شده اختلاف سطح تنش سیلان در فاز فریت و آستنیت را در میزان کسر حجمی فاز فریت و آستنیت معرفی می‌کنند. در دماهای بالا فاز فریت درصد بیشتری نسبت به فاز آستنیت و میزان سختی پایین‌تری را نسبت به فاز آستنیت به خود اختصاص می‌دهد [۹]. کرنش اعمال شده ابتدا در فاز فریت متمرکز می‌شود و این فاز بین کار نرمی و کار سختی تعادل برقرار می‌شود تا انتقال بار به فاز آستنیت انجام گیرد. بازیابی دینامیکی در سرعت‌های کرنش پایین و دماهای بالا از سینتیک بالایی برخوردار است که با در نظر گرفتن شرایط مدنظر، نمودارها به دیگرام‌های فریتی نیز نزدیک‌تر است. اعمال شرایط قالب بر فاز آستنیت نرخ کرنش‌های بالا و دماهای پایین می‌باشد، شروع اعمال نیرو بر فاز آستنیت صورت می‌گیرد و کار سختی رخ می‌دهد که در دیگرام‌های تنش کرنش فشار گرم در نرخ کرنش‌های بالا و دماهای پایین ناحیه پایداری و کاهش تنش سیلان محسوس نیست.

خروجی دیگر از نمودارهای تنش کرنش شناخت منطقه فازی آستنیت می‌باشد که در سرعت‌های کرنش بالا پس از کارسختی اولیه منطقه‌ای با سرعت کار سختی کمتری مشاهده می‌شود که به مقدار پیک منحنی، محدود می‌شود. این منطقه را کارسختی در فاز آستنیت معرفی می‌کنند. رسیدن به پیک و کاهش تنش سیلان شروع تبلور مجدد را معرفی می‌کند [۵ و ۶].

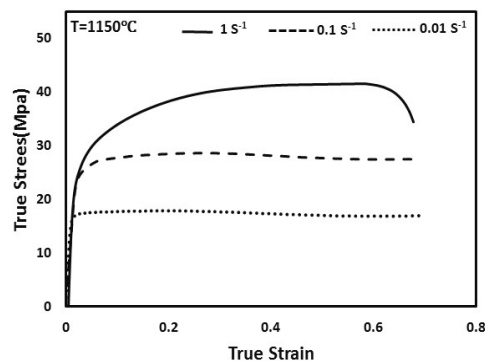
کرنش‌های بالاتر اشاره کرد؛ تغییرات بررسی شده را می‌توان به وجود فاز آستنیت نسبت داد، از آنجایی که فاز آستنیت دارای انرژی نقص چیدمان کم است؛ سرعت بازیابی دینامیکی هم در این آلیاژ کم است و این عامل باعث افزایش دانسیته نابیایی‌ها شده است. در حقیقت تاثیر دو عامل افزایش نرخ کرنش و فاز آستنیت دانسیته نابیایی‌ها را افزایش داده و رفتار منحنی را دچار تغییرات کرده‌اند. رسیدن عامل مورد بررسی به یک مقدار معین بحرانی وقوع تبلور مجدد دینامیکی را به همراه خواهد داشت، بازیابی دینامیکی و تبلور مجدد دو فرآیند کاملاً رقابتی هستند [۱۰].



شکل ۱: منحنی تنش حقیقی بر حسب کرنش حقیقی دما ثابت ۹۵۰°C.

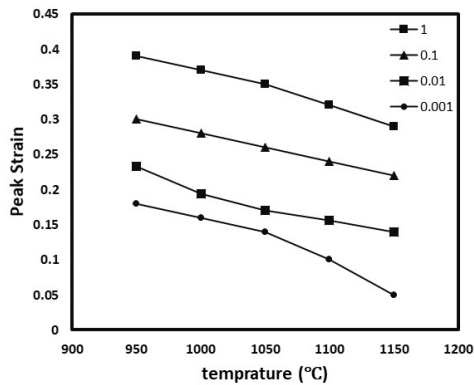


شکل ۲: منحنی تنش حقیقی بر حسب کرنش حقیقی دما ثابت ۱۰۵۰°C.



شکل ۳: منحنی تنش حقیقی بر حسب کرنش حقیقی دما ثابت ۱۱۵۰°C.

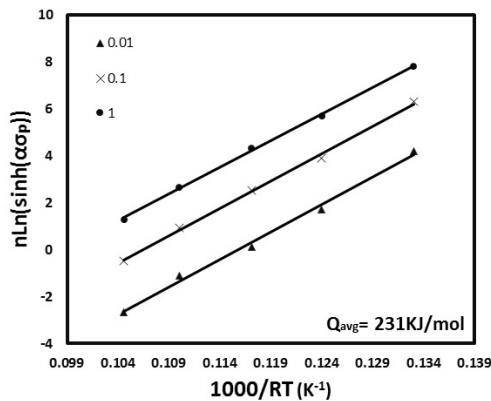
با افزایش دمای تغییر شکل به ۱۰۵۰°C و ۱۱۵۰°C تفاوت در میزان سطح تنش، نرخ کرنش‌های متفاوت کاهش می‌یابد که به دلیل سهولت در حرکت نابیایی‌هایی و افت سطح تنش لازم برای تغییر شکل است. در یک تحلیل کلی از رفتار نمودارهای تنش کرنش معرفی شده در دمای ثابت می‌توان ارایه نمود که، دو مکانیزم قالب بر نمودارهای تنش کرنش فوق قابل تعریف



شکل ۵: تغییرات کرنش بیشینه بر حسب دما در نرخ کرنش ثابت

انرژی فعال سازی

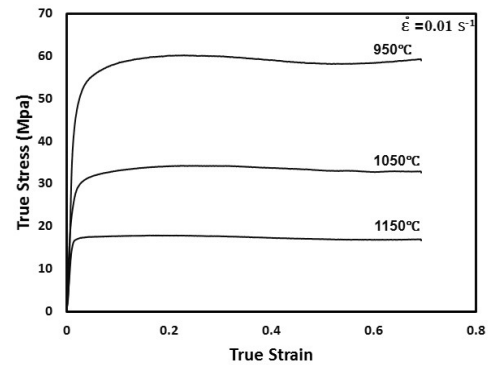
به کمک معادلات حاکم بر رفتار فشار گرم ارایه شده در بخش مقدمه مقدار میانگین σ که همان توان تنش است برای فولاد ۲۳۰۴ برابر با مقدار کمی است. با دسترس بودن پارامترهای σ و α و میانگین شیب‌های محاسبه شده در نرخ کرنش ثابت (شکل ۶) انرژی فعال سازی میانگین در دماهای مختلف و نرخ کرنش ثابت برابر با ۲۳۰ کیلو ژول بر مول بدست آمد که با نتایج محاسبه شده در سایر تحقیقات سازگاری دارد [۶].



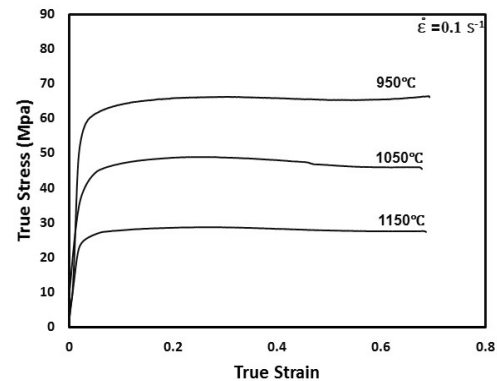
شکل ۶: انرژی فعال سازی فولاد ۲۳۰۴. $Q_{avg} = 231 \text{ kJ/mol}$

بررسی‌های ریز ساختاری

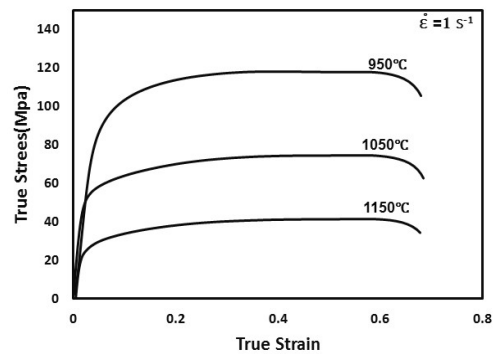
آنالیز تصویری از میکروسکوپ نوری و الکترون روبشی نمونه همگن شده تغییر شکل نیافته، در شکل ۷ (a و b) نشان داده شده‌اند. ریز ساختارهای بدست آمده، فولاد ۲۳۰۴ را به عنوان یک فولاد دو فازی آستنیت و فریت در حالت تهیه شده از شمش نورد شده (as received) و همگن شده در دمای ۱۲۰۰°C به مدت ۱۰ دقیقه را معرفی می‌کند. در تصویر ۷ (b) جزایر آستنیتی و زمینه فریتی با علامت پیکان نشان داده شده‌اند؛ آستنیت یک فاز کشیده شده در زمینه فریتی پخش شده است. فاز نرم فاز فریت و فاز سخت فاز آستنیت معرفی می‌شود [۱ و ۳].



شکل ۴: منحنی تنش حقیقی بر حسب کرنش حقیقی نرخ کرنش ثابت ۰.۰۱ s⁻¹.



شکل ۴: منحنی تنش حقیقی بر حسب کرنش حقیقی نرخ کرنش ثابت ۰.۱ s⁻¹.



شکل ۴: منحنی تنش حقیقی بر حسب کرنش حقیقی نرخ کرنش ثابت ۱ s⁻¹.

کرنش بیشینه

تغییرات کرنش بیشینه بر حسب دما و نرخ کرنش در شکل ۵ نشان داده شده‌است. با افزایش دما در نرخ کرنش ثابت تغییرات کرنش بیشینه نزولی بوده و در دمای ثابت با کاهش نرخ کرنش رفتار کاهشی و نزولی نمودار مشخص است. کاهش تنش بیشینه در اثر افزایش دما و کاهش نرخ کرنش کاهش تنش حالت پایدار را نیز به همراه دارد.

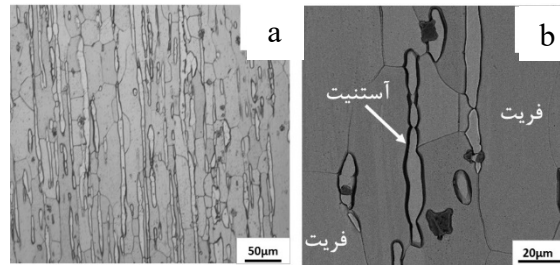
خروجی‌های نرم افزاری در شکل نشان داد کسر حجمی آستنیت در تصویر a و b شکل ۸ حدود ۰.۴۶٪ و در تصویر c و d حدود ۰.۱۹٪ است.

نتیجه‌گیری

- رفتار تغییر شکل گرم فولاد ۲۳۰۴ وابستگی بالا به میزان فاز فریت و آستنیت دارد.
- درصد فاز آستنیت در نمونه تغییر شکل داده شده نسبت به نمونه قبل از تغییر شکل حدود ۳ برابر افزایش یافته است.
- افزایش دما کاهش در حجم آستنیت را در تمام نرخ کرنش‌ها به همراه دارد.
- با افزایش نرخ کرنش انتقال نیرو از فاز فریت (نرم) به فاز آستنیت (سخت) انجام می‌گیرد که تحولات ریزساختاری موضوع مورد نظر را به اثبات می‌رساند.
- پدیده بازیابی دینامیکی و تبلور مجدد دو پدیده رقابتی هستند که در نرخ کرنش‌های بالا بعلت کاهش زمان عملیات ترمومکانیکال پدیده بازیابی دینامیکی از سینتیک بسیار پایینی بهره‌مند است.
- نمودارهای تنش کرنش رخ دادن پدیده بازیابی در نرخ کرنش‌های پایین و دماهای بالا را نشان می‌دهد.
- انتقال نیرو از فاز فریت به فاز آستنیت کاهش دانسیته نابجایی‌ها در فاز فریت و منظم شدن سریع‌تر نابجایی‌ها در نرخ کرنش بالا و دمای پایین را شامل می‌شود که مرزهای فرعی فریت در نرخ کرنش بالا و حتی در دماهای پایین نیز تشکیل می‌شوند.

مراجع

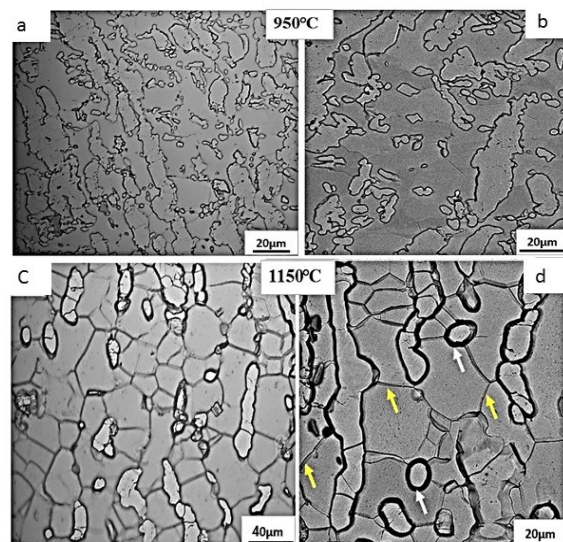
- [1] P. Johansson, M. Liljas, A New Lean Duplex Stainless Steel for Construction Purposes, Proceedings of 4th European Stainless steel Conference Science and Market, Paris 2002.
- [2] J. Charles, Super duplex stainless steels: structure and properties, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, p. 3, 1991.
- [3] M.L. Angelescu, E.M. Cojocaru. Evaluation of Hot Deformation Behaviour of UNS S32750 Super Duplex Stainless Steel (SDSS) Alloy. Metals.2020; 10(673): 2-12.
- [4] Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels, Published by the International Molybdenum Association (IMO), London, UK.1999.
- [5] L.P. Belotti, J.A.W. van Dommelen, M.G.D. Geers, Goulas C, Ya W, Hoefnagels JPM. Microstructural characterisation of thick-walled wire arc additively manufactured stainless steel. J Mater Process Technol. 2021;299(September 2021):117373.
- [6] C. W. Kovach, High-Performance Stainless Steels, Nickel Development Institute Reference Book Series No 11021, Toronto, Canada, 2000
- [7] R. Sanchez, I. Moreno, J. Amagro, J. Botella, Effects of Composition and Thermal History on the Phase Balance and



شکل ۷: ریز ساختار نمونه همگن شده در دمای 1200°C به مدت ۱۰ دقیقه و کویچینگ شده در آب؛ (a) تصویر میکروسکوپ نوری (b) تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی.

بررسی‌های ریز ساختاری و نرم افزاری نشان داد در دمای ثابت با افزایش نرخ کرنش کسر حجمی جزایر آستنیتی در زمینه فریتی کاهش می‌یابد که بدلیل کاهش زمان تغییر شکل و جوانه زنی ضعیف آستنیت از فریت می‌باشد. با افزایش دما سد انرژی برای منظم شدن نابجایی‌ها کاهش یافته و در دماهای بالاتر منظم شدن نابجایی‌ها با سرعت بالاتری انجام می‌گیرد و در درون دانه‌های آستنیت مرزهای فرعی بیشتری وجود دارد، مرزهای فرعی پایدار با مهاجرت مرز دانه‌های کم زاویه و ناپایدار پر زاویه شده و با پایداری بیشتری در درون آستنیت تثبیت می‌شوند که در ادامه فرآیند تا دمای نهایی 1150°C تبلور مجدد در فاز آستنیت نیز رخ می‌دهد. رفتار درصد حجم فاز آستنیت بر حسب دما در نرخ کرنش ۱ بر ثانیه غیر خطی می‌باشد که تاثیر شدیدتر نرخ کرنش بالا بر درصد حجم فاز آستنیت را نشان می‌دهد [۴].

شکل ۸ در ریز ساختار با بیشترین درصد فاز آستنیت (دمای 950°C و نرخ کرنش 1s^{-1}) و کمترین درصد فاز آستنیت (دمای 1150°C و نرخ کرنش 1s^{-1}) را نشان می‌دهد که تایید کننده مطالب فوق می‌باشد که با افزایش نرخ کرنش و افزایش دما کسر حجمی جزایر آستنیتی تبلور یافته در زمینه فریتی کاهش می‌یابند.



شکل ۸: تصاویر SEM نمونه‌های فشار گرم شده (a,b) دمای 950°C و نرخ کرنش 1s^{-1} ؛ (c,d) دمای 1150°C و نرخ کرنش 1s^{-1} .



Elements Distribution of Standard and Modified Duplex Stainless Steel.

[8] J.O. Nilsson, The Physical Metallurgy of Duplex Stainless Steels, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997; 73.

[9] M. Pohl, O. Storz, T. Glogowski. Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stainless steel. Mater Charact. 2007;58(1):65-71.

[10] M. Martins, L.C. Casteletti. Microstructural characteristics and corrosion behavior of a super duplex stainless steel casting. Mater Charact. 2009;60(2):150-5.