

بررسی بافت و رفتار سیلان گرم یک فولاد میکروآلیاژی در اثر نرم شدن استاتیکی در طی تغییر شکل گرم*مصطفی منصوری نژاد^(۱) بهمن میرزاخانی^(۲)**چکیده**

در این تحقیق، تاثیر پارامترهای ترمومکانیکی، تحولات متالورژیکی و بافت کریستالی بر رفتار سیلان گرم یک فولاد میکروآلیاژی مورد استفاده در لوله‌های انتقال گاز بررسی شده است. بدین منظور، آزمایشهای مختلف فشار گرم در محدوده دمایی ۸۵۰-۹۵۰ درجه سانتیگراد و تحت مقادیر مختلف کرنش، نرخ کرنش و زمان نگهداری پس از تغییر شکل، انجام شد. ریزساختار و بافت کریستالی نمونه‌های تغییر شکل یافته نیز به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی و تفرق الکترونهاي برگشتی بررسی شد. نتایج نشان داد که دما و میزان کرنش در نرم شدن جزئی یا کامل نمونه‌ها نقش اساسی داشته و تشکیل رسوبات عناصر میکروآلیاژی در طی آنیل، این مساله را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی نرم شدن استاتیکی، آستنیت، فولاد میکروآلیاژی، رهایی تنش

Study of Texture and Warm Flow Stress of a Microalloyed Steel Due to Static Softening During Hot Deformation

M. Mansourinejad B. Mirzakhani

Abstract

In this paper, the influences of metallurgical phenomena and texture in addition to the thermomechanical parameters on the warm flow stress of austenite in a gas line-pipe microalloyed steel have been investigated. Warm compression tests were carried out in the temperature range of 850 to 950°C under various amounts of strain, strain rates and holding times. The microstructure and texture of the samples were then investigated by scanning electron microscopy and electron back scatter diffraction technique. The results indicated that deformation temperature and strain via strain induce precipitation of microalloying elements during annealing impose the fraction of recrystallization in the material.

Key Words Static Softening; Austenite; Microalloyed Steel; Stress Relaxation.

* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۹۶/۱/۱۶ و نسخه پایانی آن در تاریخ ۹۶/۸/۲۲ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول: مربی، گروه مهندسی مواد و متالورژی - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول.

Email: mansourinejad@gmail.com

(۲) استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اراک

DOI: 10.22067/ma.v0i29.63535

مقدمه

امروزه در سراسر جهان جهت بهبود خواص مکانیکی فلزات و آلیاژها از فرآیند ترمومکانیکی استفاده می‌شود. با این عملیات بدون نیاز به آلیاژسازی، خواص مکانیکی فولادهای میکروآلیاژی به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. در این عملیات تغییر شکل پلاستیک و استحاله فاز به صورت پشت سر هم به گونه‌ای طرح ریزی می‌شوند که با یکدیگر وارد عمل شده و ریزساختاری با بهترین خواص ایجاد نمایند [1].

در طی عملیات ترمومکانیکی فولادهای میکروآلیاژی، تغییر شکل پلاستیک معمولاً در فاز آستنیت انجام می‌شود. در نتیجه ماده کارسخت شده و عیوب کریستالی از جمله نابجایی‌ها در ساختار افزایش می‌یابد. در نتیجه انرژی آزاد ماده بالا می‌رود. هم‌زمان با کارسخت شدن ماده در حین تغییر شکل پلاستیک، فرآیندهای نرم شدن آن در درجه حرارت‌های بالا که شامل بازبایی و تبلور مجدد می‌شود، فعال شده و موجب کاهش انرژی داخلی آستنیت می‌گردد. رقابت دو پدیده کارسختی و کار نرمی میزان تنش سیلان ماده را تعیین می‌کند. چنانچه بازبایی و تبلور مجدد در حین تغییر شکل انجام شود به آنها بازبایی و تبلور مجدد دینامیکی و در صورتیکه بعد از اتمام تغییر شکل انجام شود به آنها بازبایی و تبلور مجدد استاتیکی گفته می‌شود [2].

آزمایش‌های تنش یک روش بسیار مفید در بررسی تحولات ریزساختاری پس از تغییر شکل گرم بخصوص بررسی بازبایی و تبلور مجدد استاتیکی می‌باشد [3-6]. اسمیت و همکارانش [4] بازبایی استاتیکی فریت یک فولاد ساده کربنی را به کمک آزمایش‌های تنش مورد بررسی قرار دادند.

پاندیت و همکارانش [4] سینتیک رسوب‌گذاری را در چند فولاد میکروآلیاژی حاوی تیتانیوم، وانادیوم و نایوبیوم آزمایش‌های تنش مقایسه نمودند. آنها متوجه شدند که رسوبات پیچیده هر سه عنصر سبب بروز تخت شوندگی در منحنی‌های‌های تنش می‌شوند. سرعت تبلور مجدد در یک فولاد میکروآلیاژی حاوی نایوبیوم و

فولاد ساده کربنی پس از تغییر شکل گرم توسط ژانگ و همکارانش [5] مطالعه گردید. نتایج آنها نشان می‌دهد که افزایش میزان عنصر نایوبیوم محلول، به شدت انرژی فعال تبلور مجدد استاتیکی را بالا می‌برد. اورانگا و همکارانش [6] از آزمایش فشار کرنش صفحه‌ای یک و دو مرحله‌ای برای مطالعه سینتیک تبلور مجدد استاتیکی استفاده نمودند. آنها نتایج حاصل از این روش را با دیگر روش‌های تغییر شکل گرم مثل پیچش گرم مقایسه نمودند.

تجربه نشان می‌دهد که مکانیک سیلان یک فلز در حال تغییر شکل، به شدت از تحولات ریزساختاری ماده که به طور پیوسته رخ می‌دهند، تاثیر می‌پذیرد. در تغییر شکل گرم، دو پدیده متالورژیکی مهم یعنی بازبایی و تبلور مجدد در کنار ترکیب شیمیایی و پارامترهای ترمومکانیکی شامل کرنش، نرخ کرنش و دما به طور مشخص بر تنش سیلان ماده تاثیر می‌گذارند. مطالعه نرم شدن آستنیت فولاد در تغییر شکل گرم در طراحی برنامه نورد یا آهنگری کنترل شده فولادهای میکروآلیاژی نقش مهمی دارد. به همین جهت هدف این مقاله بررسی تاثیر بازبایی و تبلور مجدد استاتیکی و اثر رسوبات عناصر میکروآلیاژی در کنار پارامترهای ترمومکانیکی بر رفتار سیلان گرم فولاد میکروآلیاژی حاوی تیتانیوم، وانادیوم و نایوبیوم است.

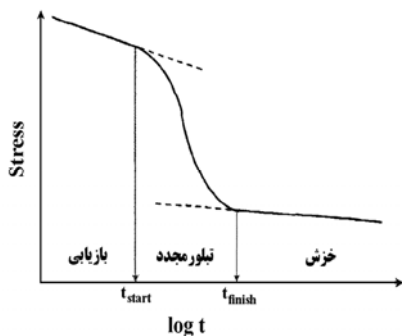
روش انجام تحقیق

ترکیب شیمیایی فولاد میکروآلیاژی مورد استفاده در تحقیق حاضر، که در صنایع نفت و گاز نیز کاربرد فراوانی دارد، در جدول (۱) آورده شده است. تجزیه شیمیایی توسط دستگاه طیفسنجی نشر نور انجام گرفت. این فولاد حاوی هر سه عنصر میکروآلیاژی تیتانیوم، وانادیوم و نایوبیوم می‌باشد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد میکروآلیاژی مورد استفاده (درصد وزنی)

C	S	P	Si	Mn	Nb	Ti	V	N	Fe
۰/۰۹	۰/۰۰۹	۰/۰۰۷	۰/۳۲	۱/۵۵	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۰۲	باقی

ثبت شد و در پایان، نمونه‌ها به کمک پاشش آب با سرعت بیش از ۲۰۰ درجه بر ثانیه کونچ شدند تا مورد مطالعه ریزساختاری قرار گیرند. در این تحقیق، مشاهده ریزساختار و بافت کریستالی نمونه‌های تغییرشکل یافته، به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز تفرق الکترونیهای برگشتی (EBSD) توسط میکروسکوپ JEOL JSM 6500F انجام گرفت.



شکل ۱ منحنی رهایی تنش: دو بخش خطی و نرم شدن سریع بین آنها در اثر تبلور مجدد [2]

نتایج و بحث

در تولید فولادهای میکروآلایژی کنترل شرایط تغییر شکل و آگاهی از تحولات ریزساختاری در مراحل مختلف شکل‌دهی، جهت دستیابی به ریزساختار و در نتیجه خواص مکانیکی مطلوب، ضروری است. شکل (۲) منحنی‌های رهایی تنش بدست آمده از آزمایش فشار گرم در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. در شروع رهایی تنش، تنش به طور خطی با لگاریتم زمان به دلیل کاهش چگالی نابجاییها و بازیابی ماده با شیب کمی کاهش می‌یابد. در بخش دوم منحنی رهایی تنش طبق نمودارهای شکل (۲)، به دلیل تبلور مجدد، افت ناگهانی تنش دیده می‌شود. تغییر شیب مجدد منحنی تنش - لگاریتم زمان، بیانگر خاتمه نرم شدن سریع است. در ادامه آزمایش، به سبب خزش یا رشد دانه، تغییرات تنش همان‌گونه که در منحنی‌های دماهای تغییرشکل گرم ۱۰۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد در شکل (۲) دیده می‌شود، دوباره به صورت خطی و حالت پایدار می‌رسد. همانطور که در نمودارهای

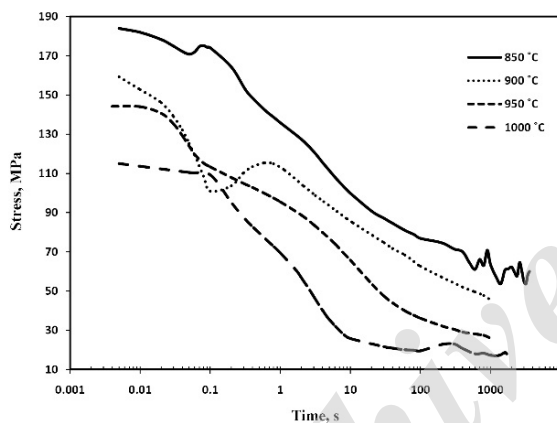
رفتار رهایی تنش فولاد مورد بررسی، با استفاده از آزمایش فشار گرم و به کمک دستگاه شبیه‌ساز ترمومکانیکی Gleeble 1500 بررسی شد. در این دستگاه نمونه‌ها به وسیله سیستم مقاومتی فرکانس پایین گرم شده و کنترل دما توسط سیم ترموکوپل نوع K که به نمونه جوش داده شده است، انجام می‌گیرد. همچنین در طول آزمایش با دمش گاز آرگون از اکسیداسیون نمونه‌ها ممانعت به عمل آمد. نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۱۲ میلی‌متر از یک صفحه فولادی و در جهت نورد تهیه شد. کوچک بودن اندازه نمونه‌ها سبب شد که گرادیان دمایی ناچیزی داخل نمونه‌ها ایجاد شود. خمیری از نیکل و گرافیت به عنوان روانکار برای جلوگیری از بشکته‌ای شدن نمونه‌ها به کار برده شد.

آزمایش رهایی تنش در واقع یک آزمایش خزش تحت شرایط تنش ناپایدار است. در این آزمایش نمونه در یک دمای بالاتر از نصف دمای ذوب ماده، با سرعت مشخص و به میزان معینی تحت کرنش قرار گرفته و در طول زمان کرنش اعمالی ثابت نگاه داشته می‌شود و تغییرات تنش ثبت می‌گردد. در شروع رهایی تنش، تنش به طور خطی با لگاریتم زمان کاهش می‌یابد؛ تا اینکه در ماده تبلور مجدد اتفاق می‌افتد (شکل (۱)). در نتیجه در بخش دوم منحنی رهایی تنش، افت ناگهانی تنش دیده می‌شود. تغییر شیب مجدد منحنی تنش - لگاریتم زمان، بیانگر خاتمه نرم شدن سریع است. در ادامه آزمایش، به سبب خزش یا رشد دانه، تغییرات تنش دوباره به صورت خطی و حالت پایدار می‌رسد.

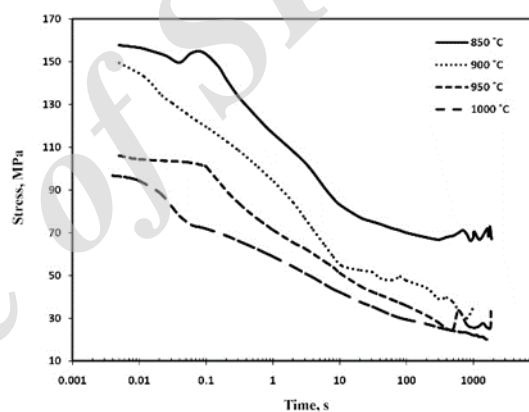
برای انجام آزمایشات فشار گرم، ابتدا نمونه‌ها با سرعت ۱۰ درجه بر ثانیه تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شده و در این دما به مدت ۵ دقیقه پیشگرم می‌شدند. سپس با سرعت ۱ درجه بر ثانیه تا دمای تغییرشکل مورد نظر (دماهای ۱۰۰۰، ۹۵۰، ۹۰۰ و ۸۵۰ درجه سانتیگراد) سرد شده و برای پایدار شدن دما ۳ دقیقه نگه داشته شدند. در ادامه، نمونه‌ها با کرنش‌های ۰/۰۴، ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۴ و سرعت‌های کرنش ۰/۱ و ۰/۵ بر ثانیه فشرده شدند. در حین آزمایش، رهایی تنش با زمان

اعمال کرنش ۰/۰۴ به دلیل ناکافی بودن مقدار تغییرشکل پلاستیک و در نتیجه نیروی محرکه کم، در نمونه‌ها تنها بازبایی اتفاق می‌افتد. همان‌گونه که مقادیر تنش در پایان تغییرشکل و یا شروع آنبیل نشان می‌دهد، با افزایش کرنش پلاستیک تنش سیلان به دلیل کارسختی ماده زیاد شده است. در نتیجه میزان انرژی ذخیره شده در ساختار نیز بالاتر است. در فولادهای ساده کربنی با اعمال کرنش پلاستیک بیشتر، زمان لازم برای انجام ۵۰٪ تبلور مجدد و زمان نهفتگی تبلور مجدد کاهش می‌یابد [۷ و ۸].

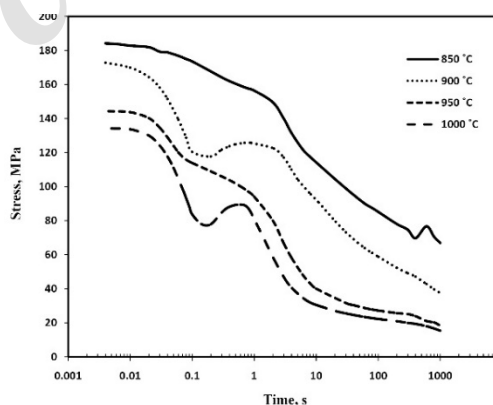
شکل (۲) مشاهده می‌شود، با افزایش دمای فشار گرم، سرعت نرم شدن استاتیکی زیاد شده بطوریکه در دماهای تغییرشکل گرم ۱۰۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد، تبلور مجدد برای کرنش اعمالی ۰/۴، در زمانهای خیلی کوتاه (حدود ۲۰ ثانیه) تکمیل می‌شود. زیرا تبلور مجدد یک پدیده کنترل شونده توسط نفوذ است و نفوذ با بالا رفتن دما تسریع می‌شود در نتیجه تبلور مجدد در زمانهای کوتاه تری تکمیل می‌شود. تاثیر کرنش بر تنش سیلان و سینتیک نرم شدن استاتیکی فولاد در دو دمای ۹۵۰ و ۸۵۰ درجه سانتیگراد در شکل (۳) نمایش داده شده است. با



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۲ منحنی‌های رهایی تنش در دماهای ۱۰۰۰، ۹۵۰، ۹۰۰ و ۸۵۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنش ۰/۵ (بر ثانیه الف) کرنش ۰/۱؛ (ب) کرنش ۰/۲۵؛ (ج) کرنش ۰/۴

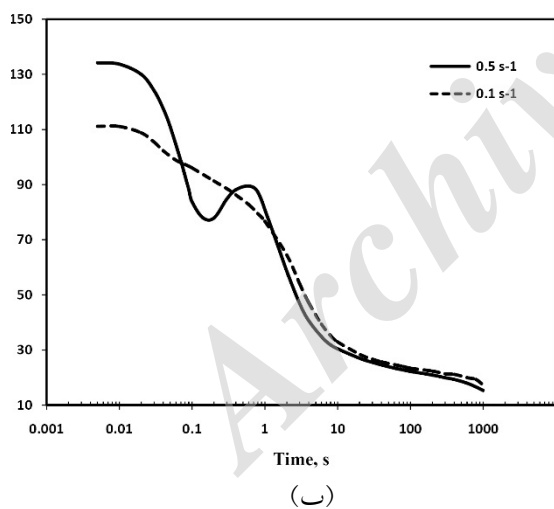
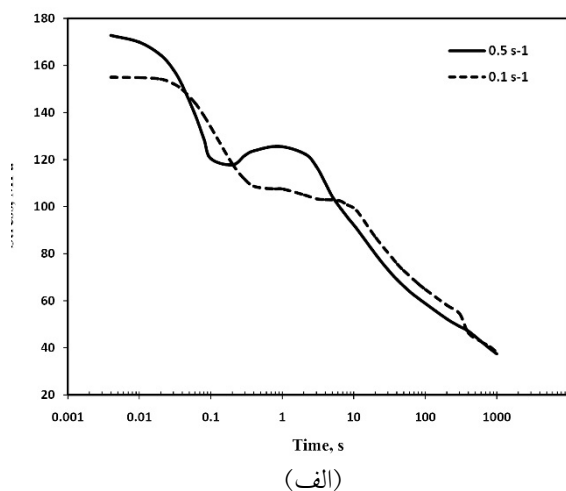
۰/۴ دیده می‌شود، به طوری که تخت شونده‌گی در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد در محدوده زمانی ۳- ۰/۵ ثانیه و در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد در بازه زمانی ۲- ۰/۱ ثانیه اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که در تحقیق دیگر انجام شده توسط نویسندگان این مقاله، دماها و ترکیب شیمیایی رسوبات کاربیدی، نیتریدی و کاربونیتریدی عناصر میکروآلیاژی حاضر در فولاد مورد بررسی قرار گرفت که تخت شونده‌گی مشاهده شده در منحنی‌های رهایی تنش نتایج حاضر، منطبق با نتایج گزارش شده با آن تحقیق می‌باشد [15].

شکل (۴) تاثیر سرعت کرنش را بر رفتار نرم شدن و تنش سیلان فولاد بعد از تغییرشکل گرم در دماهای ۹۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. از تصاویر شکل (۴) مشخص است که سرعت کرنش تنها بر بخش ابتدایی منحنی‌های رهایی تنش اثر می‌گذارد. به بیان دیگر بعد از اولین افت تنش و توقف تبلور مجدد، (به دلیل رسوب‌گذاری القاء شده در اثر کرنش) نرخ کرنش تغییری در سینتیک نرم شدن استاتیکی ایجاد نمی‌کند و ادامه روند منحنی‌های رهایی تنش در سرعت‌های تغییرشکل مختلف یکسان است.

در واقع با زیاد شدن سرعت کرنش، انرژی کرنشی داخلی زیاد می‌شود. زیرا در سرعت‌های کرنش بالاتر، بازیابی دینامیکی در داخل ماده کمتر صورت گرفته و در نتیجه چگالی نابجایی‌های درون ساختار تغییرشکل داده شده بیشتر است. بنابراین، همانطور که در منحنی مربوط به سرعت کرنش ۰/۵ بر ثانیه در شکل (۴) دیده می‌شود، در ابتدایی آنیل تنش به صورت ناگهانی افت می‌کند. همچنین در هر دو دمای تغییرشکل و نرخ کرنش، رسوبات القاء شده در اثر کرنش، در بازه زمانی مختلف آنیل اتفاق می‌افتد که نشان از تفاوت انرژی داخلی دو ساختار دارد.

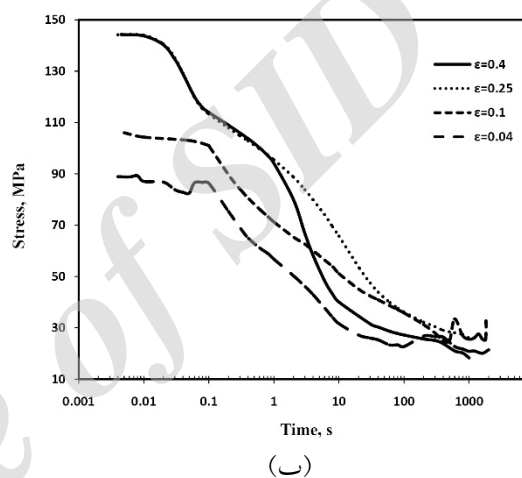
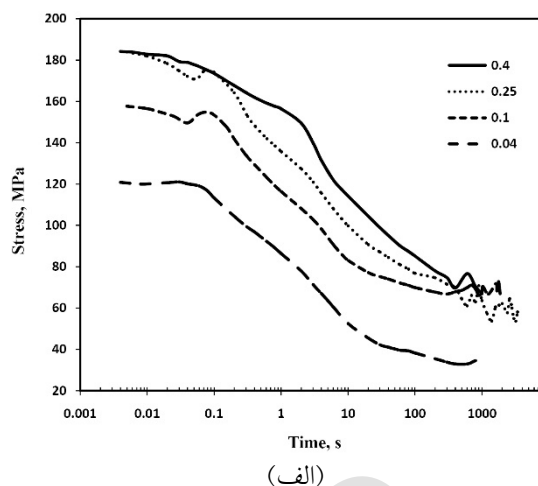
در حالیکه در فولادهای میکروآلیاژی، تشکیل رسوبات کاربیدی، نیتریدی و یا کربونیتریدی عناصر میکروآلیاژی در طی تغییرشکل گرم یا پس از آن سینتیک و پیشروی تبلور مجدد را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این حالت در منحنی‌های رهایی تنش طبق شکل (۲) و (۳) تخت شونده‌گی اتفاق می‌افتد؛ بطوریکه در طول آنیل برای مدت زمان مشخصی تنش سیلان ثابت و یا در برخی موارد افزایش می‌یابد. تخت شونده‌گی منحنی رهایی تنش فولادهای میکروآلیاژی در مراجع دیگر [9-14] نیز گزارش شده است. این اتفاق منجر به توقف یا کند شدن سینتیک تبلور مجدد و در نتیجه افزایش کرنش ذخیره شده و انرژی داخلی ماده می‌شود. مطالعات میکروسکوپ الکترونی عبوری نشان می‌دهد که در محدوده زمانی ناحیه تخت شونده‌گی، رسوبات القاء شده در اثر کرنش عناصر میکروآلیاژی تبلور مجدد را به تاخیر می‌اندازند [9-14]. در نتیجه تنش سیلان ثابت باقی مانده و یا افزایش می‌یابد. با افزایش کرنش تغییرشکل، به دلیل زیاد شدن مکان‌های مرجع جوانه‌زنی کاربیدها و نیتریدهای عناصر میکروآلیاژی، رسوب گذاری بر تبلور مجدد پیشی گرفته و همانطور که در منحنی‌های شکل (۳) ملاحظه می‌شود، تخت شونده‌گی در زمان‌های کوتاه‌تر آنیل در منحنی ظاهر می‌شود. به عبارت دیگر، با بالا رفتن چگالی نابجایی‌ها، سرعت جوانه‌زنی رسوبات نیز زیاد شده و اثر آنها بر تبلور مجدد شدیدتر می‌شود. از طرف دیگر با افزایش چگالی نابجایی‌ها، به دلیل افزایش سرعت نفوذ، رشد رسوبات نیز تسریع گشته و اثر آنها در تعویق تبلور مجدد سریعتر کاهش می‌یابد. در واقع رسوباتی در توقف تبلور مجدد موثرند که اندازه آنها بسیار ریز باشد. با گذشت زمان آنیل رسوبات درشت شده و کارایی آنها در کنترل تبلور مجدد کم می‌شود. در نتیجه منحنی تنش سیلان در پایان تخت شونده‌گی مجدداً سیر نزولی پیدا می‌کند. این مطلب به خوبی در تصاویر شکل (۳-الف) برای کرنش ۰/۴ و شکل (۳-ب) برای کرنش ۰/۲۵ و

شکل (۵- ج و د) نیز همین تصاویر برای نمونه تغییرشکل داده شده در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد، کرنش ۰/۴ و نرخ کرنش ۰/۵ بر ثانیه و پس از گذشت ۱۰ ثانیه آنبیل ارایه شده است. هر دو نمونه در دمای محیط ساختار بینیتی با بافت BCC دارند.



شکل ۴ منحنی‌های رهایی تنش در دو نرخ کرنش ۰/۱ و ۰/۵ بر ثانیه و کرنش ثابت ۰/۴ و دماهای الف) ۹۰۰ درجه سانتیگراد؛ ب) ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

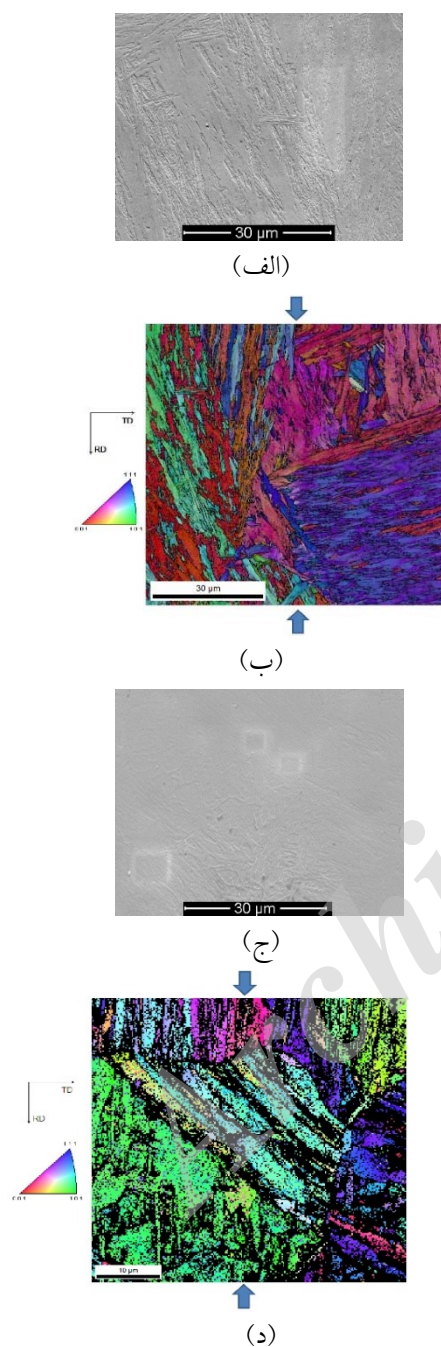
نقشه شکل قطبی معکوس نشان می‌دهد که بخش عمده و خیلی جزئی فاز بینیتی در ریزساختار به ترتیب نمونه شکل (۵- الف و ب) و شکل (۵- ج و د)، از فاز



شکل ۳ منحنی‌های رهایی تنش پس از اعمال کرنش‌های ۰/۴، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۴ و ۰/۵ بر ثانیه در دماهای الف) ۸۵۰ درجه سانتیگراد؛ ب) ۹۵۰ درجه سانتیگراد

شکل (۵) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز تفرق الکترونی‌های برگشتی نمونه‌های فشرده شده در دماها و کرنش‌های مختلف را نشان می‌دهد. جهت بررسی ریزساختار و بافت کریستالی، نمونه‌ها بلافاصله پس از تغییرشکل گرم در شرایط موردنظر با پاشش آب کوئنچ شدند. در شکل (۵- الف و ب) به ترتیب تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و تصویر بافت کریستالی بدست آمده به کمک آنالیز تفرق الکترونی‌های برگشتی مربوط به نمونه فشرده شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد، به میزان کرنش ۰/۱ و نرخ کرنش ۰/۵ بر ثانیه و پس از گذشت ۱۰ ثانیه آنبیل نمایش داده شده است. در

کریستالی فولاد میکروآلیاژی حاوی تیتانیوم، وانادیوم و نایوبیوم نتایج کلی زیر حاصل شد:



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز تفرق الکترونیهای برگشتی نمونه‌های فشرده شده در الف و ب) دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد، کرنش ۰/۱ و نرخ کرنش ۰/۵ بر ثانیه و ج) و د) دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد، کرنش ۰/۴ و نرخ کرنش ۰/۵ بر ثانیه پس از ۱۰ ثانیه آنیل

آستنیت تغییرشکل یافته با جهت‌یابی مس و یا برنج بوجود آمده است. چنین بافتی نشان دهنده این است که بینیت بوجود آمده از آستنیت تغییرشکل یافته است نه از آستنیت تبلور مجدد یافته. در صورتیکه بافت نوع گوس (Goss) که از آستنیت اولیه با ساختار مکعبی بوجود آمده است معرف نوع بافت تبلور مجدد است و در نمونه مربوط به شکل (۵-ب) کمتر ولی در نمونه مربوط به شکل (۵-د) سهم بیشتری دارد. به عبارت دیگر مقایسه تصاویر آنالیز تفرق الکترونیهای برگشتی دو نمونه در شکل (۵) نشان دهنده این است که نمونه تغییرشکل داده شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و کرنش ۰/۱ تبلور مجدد جزئی شده است؛ در صورتیکه نمونه فشرده شده در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد و کرنش ۰/۴ تقریباً بطور کامل تبلور مجدد یافته است. زیرا میزان کرنش اعمالی و دمای تغییرشکل این نمونه بیشتر بوده است. نتایج بافت کریستالی تایید کننده منحنی‌های رهایی تنش این دو نمونه در شکل‌های (۲-الف) و (۳-ب) می‌باشد. همانطور که از شکل (۲-الف) مشخص است، منحنی رهایی تنش نمونه تغییرشکل داده شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و کرنش ۰/۱ تا ۱۰ ثانیه افت اولیه را داشته ولی از زمان ۱۰ ثانیه به بعد به دلیل تشکیل رسوبات و تخت شوندگی تبلور مجدد متوقف شده است. بنابراین این نمونه پس از گذشت ۱۰ ثانیه آنیل، همانطور که در تشریح تصویر آنالیز تفرق الکترونیهای برگشتی آن ذکر گردید، دچار تبلور مجدد جزئی شده است. این در حالی است که در منحنی رهایی تنش مربوط به نمونه فشرده شده در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد و کرنش ۰/۴ در شکل (۳-ب) در مدت زمان ۱۰ ثانیه افت اولیه تنش، تخت شوندگی و افت مجدد تنش اتفاق افتاده است و این یعنی تقریباً تبلور مجدد کامل.

نتیجه گیری

از بررسی تاثیر نرم شدن استاتیکی بر تنش سیلان و بافت

پایین (نظیر نمونه تغییرشکل داده شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و کرنش ۰/۱) از آستنیتی تغییرشکل یافته بوجود آمده است. در صورتیکه در دماهای بالاتر فشار گرم و کرنش‌های بیشتر (مثلاً نمونه تغییرشکل داده شده در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد و کرنش ۰/۴) فاز بینیت عمدتاً از آستنیت تبلور مجدد یافته ایجاد شده است.

۴- بررسی نقشه شکل قطبی معکوس بدست آمده از آنالیز آنالیز تفرق الکترونیهای برگشتی نمونه‌ها به خوبی تایید کننده منحنی‌های رهایی تنش و وقوع تخت شوندگی در این منحنی‌ها می‌باشد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول جهت پشتیبانی مالی این پژوهش که در راستای طرح پژوهشی شماره ۳۳۰ بوده است، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۱- بلافاصله بعد از تغییرشکل گرم فولاد در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد رسوب‌گذاری منجر به تاخیر تبلور مجدد شده و لذا برای نرم شدن فولاد به زمان‌های طولانی‌تر آنیل نیاز است. در دماهای بالاتر ابتدا تبلور مجدد آغاز شده و سپس تشکیل رسوبات تبلور مجدد را به تاخیر می‌اندازد.

۲- سرعت تغییرشکل بر بخش ابتدایی منحنی‌های رهایی تنش اثر و یا به عبارت دیگر بر انرژی داخلی ماده قبل از شروع آنیل اثر می‌گذارد. بطوریکه بعد از اولین افت تنش و توقف تبلور مجدد به دلیل رسوب‌گذاری القاء شده در اثر کرنش، سینتیک نرم شدن استاتیکی و رفتار رهایی تنش فولاد در نرخ کرنش‌های مختلف یکسان است.

۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های مورد بررسی بیانگر این است که ریزساختار فولاد کوئنچ شده در دمای محیط بینیتی است. تصاویر بافت کریستالی نیز گویای این است که فاز بینیت در نمونه‌های تغییرشکل داده شده با کرنش‌ها و دماهای

مراجع

- Hodgson P.D., Barnett M.R., "The Thermomechanical processing of steels-current and future trends", *Proceedings of the 8th International Conference on Metal Forming, Krakow, Poland*, pp. 21-28, (2000).
- Humphreys F.J., Hatherly M., "Recrystallization and related annealing phenomena", Second ed., Oxford, Elsevier, (2004).
- Sakai T., Jonas J.J., "Overview no. 35 dynamic recrystallization: mechanical and microstructural considerations", *Acta Metallurgica*, Vol. 32, No.2, pp.189-209, (1984).
- McQueen H.J., "Initiating nucleation of dynamic recrystallization, primarily in polycrystals", *Materials Science and Engineering*, Vol. 101A, pp. 149-160, (1988).
- Titto K., Fitzsimons G., Deardo A.J., "The effect of dynamic precipitation and recrystallization on the hot flow behavior of a Nb-V microalloyed steel", *Acta Metallurgica*, Vol. 31, No. 8, pp. 1159-1168, (1983).
- Sellars C.M., Davies G.J., "Hot working and forming processes", London, Metals Society, (1980).
- Gómez M., Medina S.F., Quispe A., Valles P., "Static recrystallization and induced precipitation in a low

- Nb microalloyed steel", *ISIJ International*, Vol. 42, No. 4, pp. 423–431, (2002).
8. Honeycombe R.W.K., "The plastic deformation of metals", Second ed., Edward Arnold, Maryland, (1984).
 9. Kwon O., DeArdo A.J., "Interactions between recrystallization and precipitation in hot-deformed microalloyed steels", *Acta Metallurgical and Materialia*, Vol. 39, No. 4, pp. 529-538, (1991).
 10. Andrade H.L., Akben M.G., Jonas J.J., "Effect of molybdenum, niobium, and vanadium on static recovery and recrystallization and solute strengthening in microalloyed steels", *Metallurgical Transaction A.*, Vol. 14, pp. 1967-1977, (1983).
 11. Medina S.F., Mancilla J.E., "Static steels recrystallization at temperatures modeling below of the hot deformed microalloyed critical temperature", *ISIJ International*, Vol. 36, No. 8, pp. 1070-1083, (1996).
 12. Medina S.F., Mancilla J.E., "Determination of static recrystallization critical temperature of austenite in microalloyed steels", *ISIJ International*, Vol. 33, No. 12, pp. 1257-1264, (1993).
 13. Medina S.F., Quispe A., "Improved model for static recrystallization kinetics of hot deformed austenite in low alloy and Nb/V microalloyed steels", *ISIJ International*, Vol. 41, No. 7, pp. 774–781, (2001).
 14. Lee K.J., "Recrystallization and precipitation interaction in Nb containing steels", *Scripta Materialia*, Vol. 40, No. 7, pp. 837-843, (1999).
 15. Mirzakhani B., Arabi H., Salehi M.T.S., Seyedein H., Aboutalebi M.R., Khoddam S., Sietsma J., "Computer aided optimization of specimen geometry of hot torsion test to minimize microstructure non-homogeneity and temperature gradient before deformation", *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 35-43, (2009).