

تأثیر پارامترهای ترمومکانیکی بر سیستمیک فرآیند تبلور مجدد استاتیکی

در فولاد میکروآلیاژی 30MSV6

مرتضی میری دیسفانی^۱، غلامرضا ابراهیمی^۲، محمد مزینانی^۳، احمد ضابط^۴

چکیده

در پژوهش حاضر رفتار تبلور مجدد استاتیکی فولاد میکروآلیاژی وانادیومدار 30MSV6 در فرایند تغییر شکل چند مرحله‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور تغییر شکل گرم دو مرحله‌ای در محدوده دماهای 850°C - 950°C با نرخ کرنش‌های 1 s^{-1} ، 0.1 s^{-1} و 0.01 s^{-1} ، اندازه دانه آستانتیت اولیه $57\mu\text{m}$ و $74\mu\text{m}$ و در زمان‌های بین مرحله‌ای تغییر شکل ۲ تا 600 ثانیه، انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داده‌اند که پارامترهای تغییرشکل گرم که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته‌ند، بر میزان نرم شدن استاتیکی فولاد بین مراحل تغییر شکل، نقش بسزائی داشتند. با تحلیل نتایج آزمون‌های انجام شده، میزان تأثیر پارامترهای ترمومکانیکی بر سیستمیک فرآیند تبلور مجدد استاتیکی مدل سازی شد. افرون بر این ریز ساختار پس از وقوع فرایند تبلور مجدد استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: فولاد میکروآلیاژی وانادیومدار، تغییر شکل گرم دو مرحله‌ای، سیستمیک تبلور مجدد استاتیکی، نرم شدن استاتیکی

مقدمه

فولادهای میکروآلیاژی در حین عملیات ترمومکانیکال در دماها و نرخ‌های کرنش و مقدار کرنش‌های متفاوت تحت عملیات قرار گرفته و به این ترتیب تحولات میکروساختاری گسترده‌ای در آنها به وقوع می‌پیوندد^[۱، ۲]. در

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد
^۲ استادیار گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربیت معلم سیزوار، سیزوار
^۳ استادیار گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد
^۴ استادیار گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد

این فرآیندها به دلیل انرژی ذخیره شده در ساختار و ناپایداری ترمودینامیکی آن، امکان وقوع فرآیندهای نرم شدن

استاتیکی در زمان توقف بین مرحله‌ای تغییر شکل وجود دارد. وقوع فرآیندهای نرم شدن استاتیکی سبب تغییر

متوسط اندازه متوسط دانه‌ها می‌شود. ریز شدن دانه‌ها از فاکتورهای مهم ریز ساختاری است و نقش تعیین کننده‌ای

در خواص مکانیکی نهایی فولاد دارد [۲،۳]. بهمین منظور شناسایی سینتیک فرآیند تبلور مجدد استاتیکی در بهینه-

سازی فرآیندهای تغییر شکل گرم چند مرحله‌ای می‌تواند مؤثر واقع شود. محققین بسیاری رفتار تبلور مجدد

استاتیکی فولادهای میکروآلیاژی را مطالعه و بررسی کرده اند و معادله‌هایی برای بیان سینتیک تبلور مجدد

استاتیکی (srec) فاز آستنیت بر پایه زمان لازم برای وقوع ۵۰ درصد تبلور مجدد استاتیکی ($t_{0.5}$) بر حسب

پارامترهای کرنش، نرخ کرنش، اندازه دانه آستنیت اولیه، دما و انرژی فعالسازی تبلور مجدد (معادله ۱) با استفاده از

رابطه اورامی (معادله ۲) بنا شده‌اند. می‌باشد [۴-۵].

$$t_{0.5} = A_{srec} d_0^{0.89} \exp(Q_{srec}/RT) \quad (1)$$

$$X_{srec} = 1 - \exp[-0.693 \left(\frac{t}{t_{0.5}} \right)^n] \quad (2)$$

در این معادلات A_{srec} ، d_0 و n ثابت‌های وابسته به ماده، Q کرنش حقیقی و T نرخ کرنش، R ثابت گازها، T دمای

تغییر شکل گرم و Q_{srec} انرژی فعال سازی فرآیند تبلور مجدد استاتیکی، d_0 اندازه دانه آستنیت اولیه، X_{srec} کسر

تبلور مجدد یافته استاتیکی و n ثابت وابسته به فولاد و t زمان بین مرحله‌ای می‌باشند.

با توجه به کاربردهای فراوان فولاد میکروآلیاژی و انادیومدار 30MSV6 به خصوص در ساخت قطعات خودرو، در

تحقيق حاضر با بکارگیری آزمایش‌های فشار گرم دو مرحله‌ای بر روی آن تأثیر دمای تغییر شکل، نرخ کرنش و

اندازه دانه آستنیت اولیه بر سینتیک فرایند تبلور مجدد استاتیکی بررسی شد و n و ثوابت مربوط به این پارامترها در

رابطه (۱) محاسبه گردیدند.

مواد و روش تحقیق

آلیاژ مورد استفاده در این مطالعه فولاد میکروآلیاژی تجاری 30MSV6 بود. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۱ آورده شده است. نمونه‌های استوانه‌ای شکل آزمایش فشار با ارتفاع ۱۶/۵ mm و قطر ۱۱ mm از مرکز میلگرد تهیه شده ماشینکاری شدند.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد میکروآلیاژی 30MSV6 بر حسب درصد وزنی

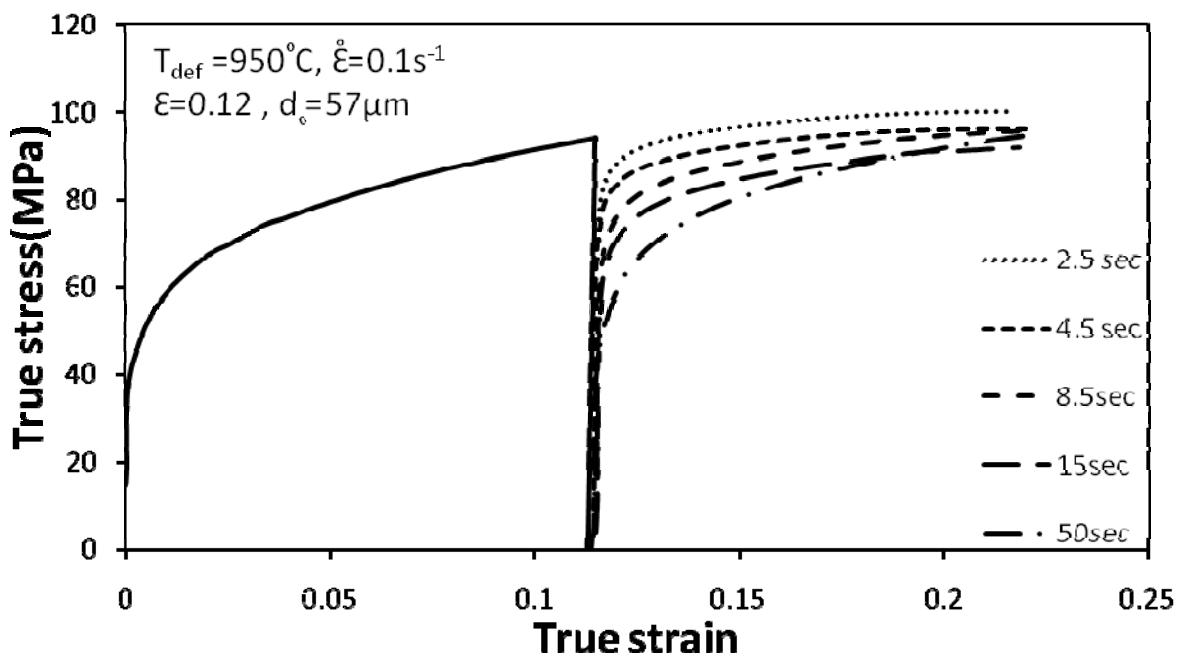
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Ti	Al	N
۰/۲۸	۰/۴۹	۱/۵	۰/۰۱۳	۰/۰۹۴	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۰۵۱	۰/۱۲	۰/۱۲۷	۰/۰۲۲	۰/۰۲۹	۰/۰۱

به منظور بررسی فرایند تبلور مجدد استاتیکی در زمان‌های توقف بین مرحله‌ای تغییر شکل، آزمایش فشار گرم دو مرحله‌ای با استفاده از دستگاه کشش-فشار یونیورسال نوع Zwick/Roll مجهز به کوره مقاومتی در شرایط دمایی ۸۵۰°C، ۹۰۰°C، ۹۵۰°C و ۱۲۲۵°C، نرخ‌های کرنش 5^{-1} ، 10^{-1} و 15^{-1} ، کرنش ۰/۱۲ و اندازه دانه آستانیت اولیه $57\mu\text{m}$ و $74\mu\text{m}$ و زمان‌های بین مرحله‌ای ۲ تا ۶۰۰ ثانیه، برنامه ریزی و انجام شد. قبل از انجام آزمون فشار گرم دو مرحله‌ای نمونه‌ها در دمای ۱۲۲۵°C به مدت ۵ دقیقه آستانیت شدند. این دما جهت انحلال کامل رسوبات کاریید و نیترید وانادیوم انتخاب شد، اگرچه برای انحلال کامل رسوبات تیتانیوم که به مقدار بسیار کم در این فولاد وجود دارند، به دمایی بیش از این نیاز است [۲]. به منظور بررسی سینتیک نرم شدن استاتیکی در هر یک از شرایط زمایش، کرنش مرحله اول کمتر از کرنش بحرانی شروع فرایند تبلور مجدد دینامیکی، $\epsilon_c = 0/13$ ، انتخاب گردید [۴,۳].

نتایج و بحث

یکی از منحنی های تنش حقیقی-کرنش حقیقی حاصل از آزمایش فشارگرم دو مرحله ای به عنوان نمونه در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، با افزایش زمان توقف در همه شرایط آزمون تنش سیلان در مرحله دوم تغییر شکل کاهش یافته است که می توان این افت را به رخ دادن فرایند نرم شدن استاتیکی نسبت داد. بنا براین میزان افت تنش سیلان می تواند بیانگر میزان وقوع پدیده نرم شدن استاتیکی در زمانهای توقف بین مراحل تغییر شکل باشد. مقدار افت تنش تسلیم در زمانهای توقف از رابطه زیر بدست می آید [6].

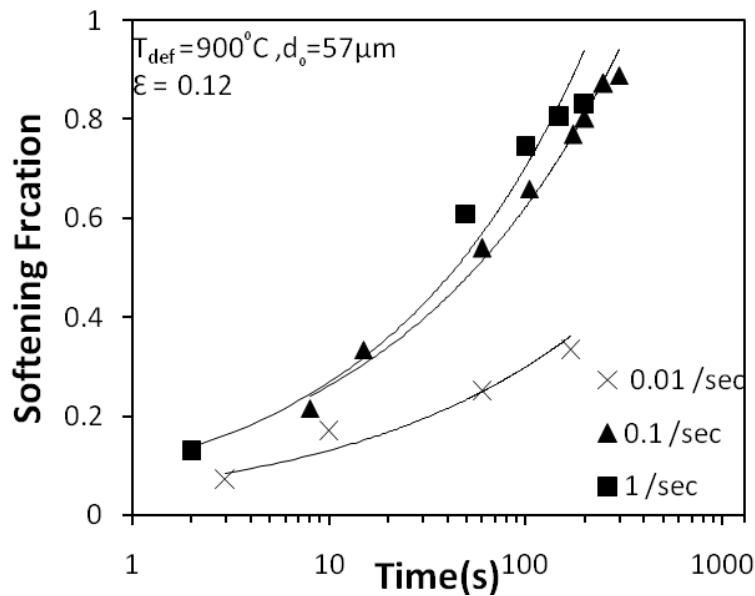
$$F_s = \frac{\sigma_m - \sigma_2}{\sigma_m - \sigma_1} \quad (2)$$



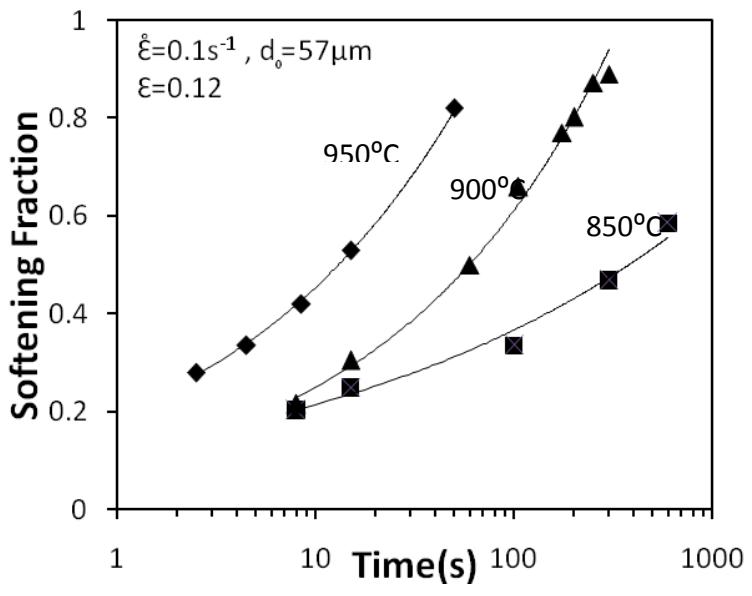
شکل ۱: منحنی تنش حقیقی-کرنش حقیقی حاصل از آزمایش فشارگرم دو مرحله ای در دمای ۹۵۰°C

در این رابطه، σ_m تنش سیلان بیشینه در مرحله اول تغییر شکل، σ_1 و σ_2 به ترتیب تنش تسلیم $0/2$ درصد آفست در مرحله اول و دوم تغییر شکل و F_s کسر نرم شدن استاتیکی برحسب زمان های توقف مختلف می باشند. در شکل ۲

مقدار F_s محاسبه شده با استفاده از منحنی های تنش حقیقی - کرنش حقیقی شکل ۱ بر حسب زمان های توقف و دماهای متفاوت تغییر شکل نشان داده شده است.



شکل ۳: تأثیر نرخ کرنش بر کسر نرم شدن استاتیکی



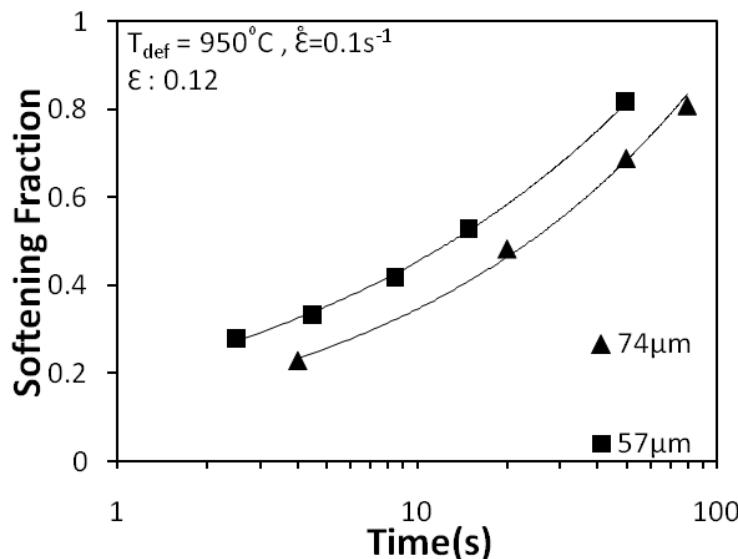
شکل ۲: تأثیر دمای تغییر شکل بر کسر نرم شدن استاتیکی

همانطور که مشاهده می شود، در دماهای مختلف تغییر شکل میزان نرم شدگی با افزایش زمان توقف بین مرحله ای افزایش یافته است. افزون بر این، با افزایش دمای تغییر شکل نرخ نرم شدگی بیشتر شده است. کاهش نرخ نرم شدن استاتیکی فولاد میکروآلیاژی و انادیوم دار با کاهش دمای تغییر شکل به فرآیند رسوب گذاری در اثر اعمال کرنش نسبت داده شده است [۱، ۳].

به منظور بررسی تأثیر نرخ کرنش بر میزان نرم شدن استاتیکی، آزمایش تغییر شکل گرم دو مرحله ای در دمای ۹۰۰°C و با نرخ های کرنش 0.01 s^{-1} , 0.1 s^{-1} و 1 s^{-1} انجام گرفت. شکل ۳ کسر نرم شدن استاتیکی فولاد را بر حسب زمان توقف بین مرحله ای مختلف در نرخ کرنش های متفاوت نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشخص است، میزان کار نرمی استاتیکی با افزایش نرخ کرنش، افزایش پیدا می کند. این رفتار می تواند به دلیل این

واقعیت باشد که در نرخ کرنش بالاتر بازیابی دینامیکی بدلیل زمان کمتر فرایند به میزان کمتری رخ می‌دهد، در حالی که در نرخ کرنش پایین‌تر چگالی نابجایی‌ها که نیروی محرکه مهم برای وقوع فرایند تبلور مجدد است، بدلیل وقوع بیشتر فرایند بازیابی دینامیکی کمتر بوده و بنابراین نرم شدن استاتیکی به میزان‌های کمتری نسبت به نرخ کرنش بالاتر انجام خواهد شد.

برای بررسی تأثیر اندازه دانه فاز آستنیت اولیه بر سرعت تبلور مجدد استاتیکی، نمونه‌ها برای مدت زمان‌های گوناگون ۵ و ۱۵ دقیقه در دمای آستنیته نگهداری شدند. اندازه دانه‌های آستنیت اولیه در زمان‌های نگهداری ۵ و ۱۵ دقیقه به ترتیب برابر با $57 \mu\text{m}$ و $74 \mu\text{m}$ به دست آمدند. برای این بررسی آزمایش فشار گرم دو مرحله‌ای در دمای 950°C ، نرخ کرنش $15/0^\circ\text{C}/\text{s}$ و کرنش $12/0^\circ\text{C}/\text{s}$ در زمان‌های بین مرحله‌ای متفاوت انجام شد. شکل ۴ میزان نرم شدن استاتیکی فولاد مورد آزمایش را بر حسب اندازه دانه آستنیت اولیه نشان می‌دهد. مطابق نتایج ارائه شده در این شکل، مقدار نرم شدن استاتیکی برای دانه‌های کوچکتر آستنیت اولیه بیشتر است. بیشتر بودن میزان نرم شدن استاتیکی فولاد در اندازه کوچکتر دانه‌های آستنیت اولیه به دلیل بیشتر بودن سطوح مرزدانه در واحد حجم فاز آستنیت است. این به آن علت است که مرزدانه‌ها مکان‌های مناسبی برای جوانه زنی دانه‌ها حین فرایند تبلور مجدد استاتیکی از فاز آستنیت می‌باشد [۵, ۷].

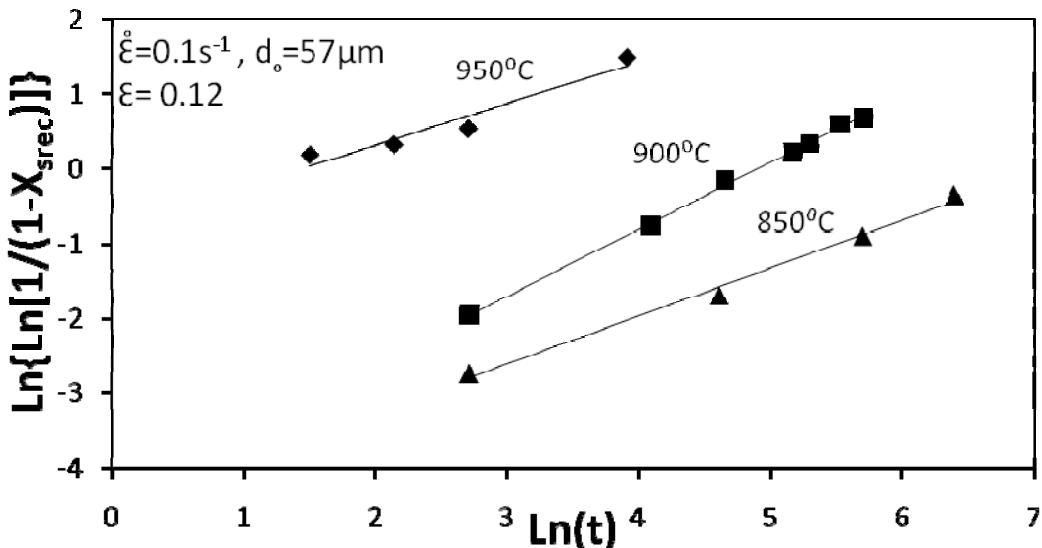


شکل ۴- تأثیر اندازه دانه آستنیت اولیه بر نرم شدن استاتیکی

نقش پارامترهای فرایند، یعنی دمای تغییر شکل گرم و نرخ کرنش، اندازه دانه آستنیت اولیه و میزان کرنش در سیستمیک فرایند تبلور مجدد استاتیکی با استفاده از معادله ۱ بیان می شود [۴-۷]. کسر وقوع فرایند تبلور مجدد استاتیکی ایجاد شده در زمان های توقف بین پاسی در آزمون فشار گرم دو مرحله ای را می توان با فرض اینکه تبلور مجدد پس از انجام نرم شدن بحرانی ۲۰ درصد شروع می شود، محاسبه کرد [۳]:

$$X_{srec} = (Fs - 0.2) / (1 - 0.2) = (Fs - 0.2) / 0.8 \quad (4)$$

برای محاسبه مقدار n در معادله ۲ (رابطه اورامی) از دو طرف آن دو بار لگاریتم گرفته و شیب نمودار خطی تغییرات $\ln\{\ln[1/(1-X_{srec})]\}$ و $\ln(t)$ را بدست می دهد. میانگین مقادیر n بدست آمده برای سه دمای تغییر شکل حدود ۰/۸۱ بوده است. (شکل ۵).



شکل ۵- رابطه بین $\ln\{\ln[1/(1-X_{srec})]\}$ و $\ln(t)$ در دماهای متفاوت

برای محاسبه مقادیر Q_{srec} ، S و Q در معادله ۱ ، از دو طرف آن لگاریتم گرفته و به ترتیب شیب های نمودارهای $\ln\{\ln[1/(1-X_{srec})]\}$ و $\ln(t)$ محاسبه شدند. به این ترتیب مقادیر بیانگر (J/mol) ۲۹۳۸۰۰ ، $\frac{1000}{RT}$

۴- برای Q_{srec} ، S ، r و q به دست آمدند. با جایگزینی این مقادیر در معادله ۱ و مقادیر $t_{0.5}$ متناظر

مقدار $A_{srec} = 2.13 \times 10^{-19}$ به دست آمد. به این ترتیب معادلات ۱ و ۲ را می‌توان برای فولاد 30MSV6 به صورت زیر

بیان کرد:

$$X_{srec} = 1 - \exp [-0.693 (\frac{t}{t_{0.5}})^{0.81}]$$

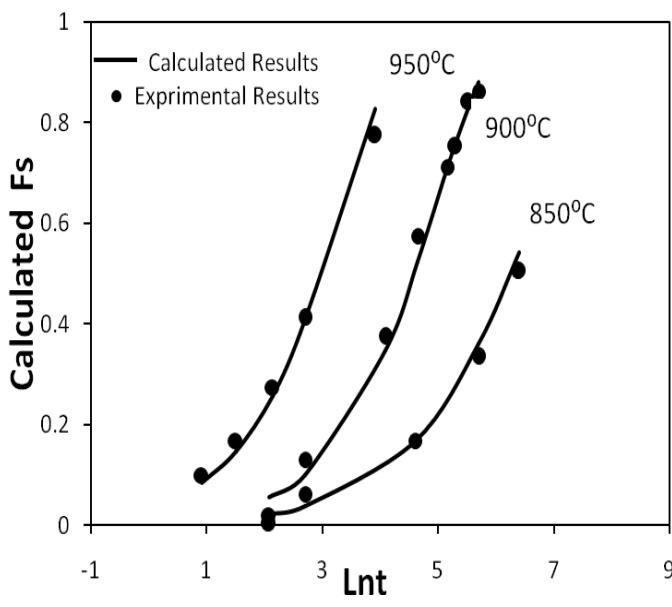
$$t_{0.5} = 2.13 \times 10^{-19} d_0^2 \epsilon^{-4} \xi^{-0.39} \exp[293800/RT]$$

برای اثبات درستی ثوابت بدست آمده از نتایج آزمون‌های انجام شده، مقدار $Lnt_{0.5}$ و X_{srec} به دست آمده با استفاده از

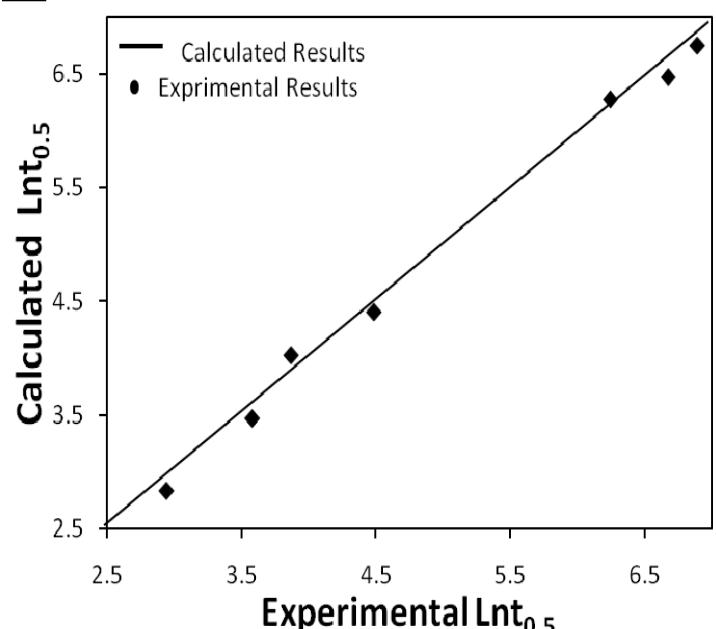
این روابط در دماها و نرخ‌های کرنش مختلف محاسبه گردید و مقادیر بدست آمده با مقادیر حاصل از اندازه‌گیری

تجربی مقایسه شدند. نتیجه این مقایسه‌ها در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که مقادیر

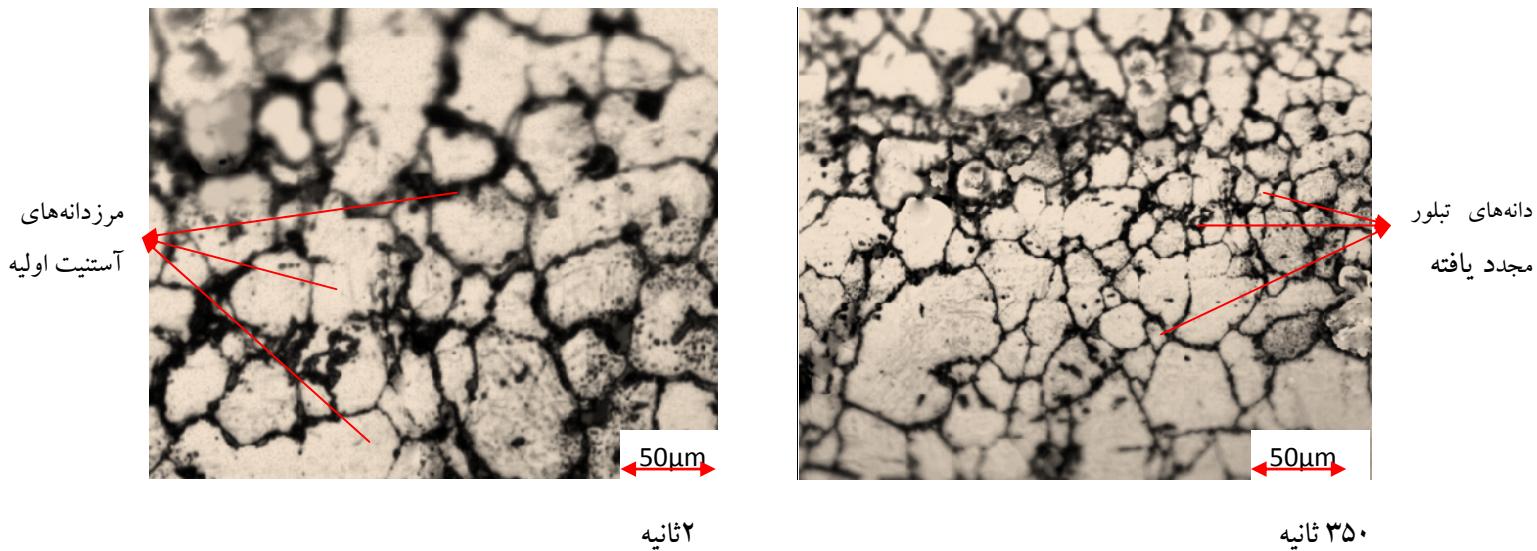
تجربی و تئوری حاصل از تحلیل سیتیک فرایند تبلور مجدد تطابق نزدیکی با هم دارند.



شکل ۷- مقایسه کسر نرم شدن استاتیکی فولاد مطابق نتایج تئوری و اندازه‌گیری تجربی



شکل ۶- زمانهای لازم برای وقوع ۵۰ درصد تبلور مجدد به دست آمده از تحلیل تئوری و اندازه‌گیری تجربی



شکل ۸- دانه‌ها و مرزدانه‌های فاز آستانیت بدست آمده در زمان‌های بین مرحله‌ای ۲ و ۳۵۰ ثانیه

برای بررسی تأثیر زمان بین مرحله‌ای در سینتیک فرایند تبلور مجدد، نمونه‌ها بعد از تغییر شکل اولیه به مدت زمان‌های توقف (۲ و ۳۵۰ ثانیه) در آب کوئنچ شدند. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در زمان بین مرحله‌ای ۲ ثانیه تعداد بسیار کمی از دانه‌ها تحت فرایند تبلور مجدد یافته‌اند، در حالی که در نمونه‌ای که بعد از زمان توقف ۳۵۰ ثانیه در آب کوئنچ شده است، کسر بیشتری از دانه‌ها تحت فرایند تبلور مجدد استاتیکی قرار گرفته‌اند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایش فشار گرم دو مرحله‌ای با هدف بررسی تأثیر دمای تغییر شکل و نرخ کرنش بر سینتیک فرایند تبلور مجدد استاتیکی فولاد 30MSV6 انجام گرفت. به منظور جلوگیری از وقوع تبلور مجدد دینامیکی، کرنش اعمال شده تحت هر یک از شرایط انجام آزمایش کمتر از کرنش بحرانی ۶۴ انتخاب گردید. نتایج حاصل از آزمایش فشار گرم دو مرحله‌ای نشان دادند که با افزایش دمای تغییر شکل، فرایند تبلور مجدد استاتیکی بیشتر و با

نرخ بالاتر اتفاق افتاده است. همچنین در نرخ‌های کرنش بالاتر، بدلیل بیشتر بودن چگالی نابجایی‌ها به علت وقوع کمتر بازیابی دینامیکی میزان وقوع تبلور مجدد استاتیکی افزایش یافت. افزون بر این با کاهش اندازه دانه آستنیت اولیه، میزان بیشتری نرم شدن استاتیکی اتفاق افتاد که این وقوع بیشتر فرایند تبلور مجدد استاتیکی را در این شرایط نشان می‌دهد.

مراجع

- 1**-Fernandez AI, Uranga P, Lopez B, Rodriguez-ibabe JM (2000)ISIJ Int 40:893-901
- 2**-M.I. Vega, S.F. Medina, A. Quispe, M. Gomez, P.P. Gomez, Mater. Sci. Eng. A 423(2006) 253–261
- 3** -Study of static recrystallization kinetics in a low alloy steelY.C. Lin *, Ming-ong Chen, Jue Zhong Computational Materials Science 44 (2008) 316–321Contents lists
- 4**- PREDICTING THE CRITICAL STRAIN FOR YNAMICRECRYSTALLIZATION USING THE KINETICS OF STATICRECRYSTALLIZATION M.R. Barnett, G.L. Kelly and P.D. Hodgson Scripta mater. 43 (2000) 365–369
- 5**-- Prediction of Interpass Softening from the Strain Hardening Rate Prior to Unloading E. I. POLIAK and J. J. JONAS. ISIJ International, Vol. 44 (2004), No. 11, pp. 1874–1881
- 6**- Effect of Nb of Initial Grain Size on the Microalloyed Steels Static Recrystallization Kinetics G LI T MMACCAGND.OO. BAI and J. J. JONAS. ISIJ International, Vol. 36 (1 996). No. 12, pp. 1479-1485
- 7**- Improved Model for Static Recrystallization Kinetics of Hot Deformed Austenite in Low Alloy and Nb/V Microalloyed Steels S. F. MEDINA and A. QUISPE. ISIJ International, Vol. 41 (2001), No. 7, pp. 774–781 © 2001

