فصل‌نامه علمی ـ پژوهشی
مواد پیشرفته در مهندسی

بررسی رفتار تغییر شکل داغ فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ توسط آزمون فشار داغ و شبیه‌سازی آن با استفاده از معادلات ساختاری

هومن چویلیان*، خسرو فرمنش، عبدالرضا سلطانی‌پور و اسماعیل مقصودی
دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۱۵ – دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۰۳/۰۷)

چکیده- در این تحقیق فرایندهای شکل‌دهی گرم صنعتی با هدف دستیابی به دانش فنی و بومی‌سازی فرایند شکل‌دهی فولادهای زنگ‌نزن با استفاده از آزمون فشار گرم برای فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ شبیه‌سازی شد. نمودارهای تنش- کرنش حقیقی به‌دست آمده رفتار متداول بازیابی دینامیکی را از خود نشان دادند. اما با بررسی‌های میکروسکوپی مکانیزم ترمیم غالب در حین تغییر شکل گرم این فولاد از نوع تبلور مجدد دینامیکی تشخیص داده شد که با توجه به انرژی نقص در چیده شدن کم فولاد زنگ نزن ۳۲۱ وقوع این پدیده توجیه گردید. سپس با استفاده از نمودارهای مرتبط با تنش حقیقی، کرنش حقیقی و نرخ کرنش سختی، نقطه شروع تبلور مجدد دینامیکی در شرایط مختلف مشخص شد. همچنین با استفاده از معادلات ساختاری و پارامتر زنز هولمن، رفتار شکل‌دهی گرم فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ مورد بررسی قرار گرفت و انرژی اکتیواسیون تغییر شکل گرم برای این فولاد برابر ۴۲۲ کیلو ژول بر مول تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی: فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱، معادلات ساختاری، تبلور مجدد دینامیکی.

Investigation of Hot Deformation Behavior of 321 Stainless Steel using Hot Compression Test and Modeling with Constitutive Equations

H. Chavilian*, K. Farmanesh, A. Soltanipour and E. Maghsoudi

Department of Material Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran.

Abstract*: In this research, industrial hot deformation processes was simulated for 321 austenitic stainless steel using hot compression test with the aim of acquiring technical knowledge and indigenization of stainless steel production. The obtained stress-strain curves showed the common retrieval dynamic behaviour. By microscopic studies, the main restoration mechanism during hot deformation in this steel was diagnosed as dynamic recrystallization, that due to low stacking fault energy of 321 stainless steel, this phenomenon was justified. Then, using diagrams related to real stress, real strain and strain rate, the onset point of dynamic recrystallization was determined under different conditions. Also, using the constitutive equations and Zener-Holloman parameter, hot deformation behaviour of 321 stainless steel was studied and the activation energy of hot deformation for this steel was determined as 422 (Kj/mol).*

Keywords: *321 austenitic stainless steel, Constitutive equations, Dynamic recrystallization.*

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hooman.chavilian@gmail.com

[DOR: 20.1001.1.2251600.1396.36.3.3.4]
[DOI: 10.29252/jame.36.3.63]

فهرست علائم

T	دمای مطلق (K)	σ	تنش حقیقی(MPa)
R	ثابت گازهای جهانی $J,mol^{-1}.K^{-1}$ ۸/۳۱	ε	کرنش حقیقی
Q	انرژی فعال‌سازی تغییر شکل گرم $kj.mol^{-1}$	ε^{o}	نرخ کرنش(۱/s)
Z	پارامتر زنر- هولمن	σ_c	تنش بحرانی(MPa)
θ	نرخ کارسختی	σ_p	تنش اوج (MPa)

۱- مقدمه

فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در دماهای زیاد علاوه بر حفظ استحکام مکانیکی، مقاومت به خوردگی خود را نیز حفظ می‌کند. تیتانیوم موجود در ساختار فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ مانع از تشکیل کاربیدکروم و در نتیجه تهی شدن مناطقی از قطعه (معمولاً مرزدانه‌ها) از کروم می‌گردد و اصطلاحاً موجب پایدارسازی[1] فولاد زنگ‌نزن می‌شود [۱-۳]. انرژی نقص در چیده شدن در فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در مقایسه با بسیاری از فولادها مقداری بسیار ناچیز است که این مقدار در برخی موارد کمتر از ۲۰ میلی ژول بر مترمربع گزارش شده است [۴ و ۵].

برای آغاز تبلور مجدد دینامیکی کرنش بحرانی به‌صورت کرنشی تعریف می‌شود که در آن منحنی سیلان از منحنی ایده‌آل بازیابی دینامیکی منحرف می‌شود و معمولاً مشاهده شدن نقطه اوج در این نمودارها وقوع تبلور مجدد دینامیکی را اثبات می‌کند [۶]. اما در برخی بررسی‌های صورت گرفته روی فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی نشان داده شده است که مشاهده نشدن نقطه اوج در منحنی‌های تنش حقیقی- کرنش حقیقی نشانگر عدم انجام تبلور مجدد دینامیکی نیست [۷]. در این تحقیق‌ها بر پایه اصول ترمودینامیک فرایند برگشت‌ناپذیر روشی ارائه شده است که نقطه تغییر تقعر (نقطه عطف) در منحنی‌های نرخ کارسختی $(\theta = \partial\sigma / \partial\varepsilon)$ برحسب تنش حقیقی (σ) را در تنش‌های کمتر از نقطه اوج (در منحنی تنش حقیقی- کرنش حقیقی)، به تنش بحرانی نسبت می‌دهد [۷ و ۸]. علاوه بر این اثبات شده است که نقطه عطف در نمودارهای Lnθ برحسب Lnσ و ε نیز به طریقی مشابه می‌توانند کرنش بحرانی برای آغاز تبلور مجدد دینامیکی را مشخص نمایند [۹].

براساس روش‌های ذکر شده در سال ۲۰۰۳ میلادی پولیاک و جوناس با استفاده از آزمون فشار گرم در محدوده دمایی ۹۰۰ - ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد به بررسی رفتار تغییر شکل داغ سه نوع فولاد کربنی، نیوبیوم‌دار و زنگ‌نزن ۳۲۱ پرداختند. ایشان در این تحقیق با استفاده از روابط محاسباتی، رفتار مکانیکی و کرنش بحرانی وقوع تبلور مجدد دینامیکی را برای فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ تعیین کردند و با تطبیق یافته‌ها با مشاهدات متالوگرافی نشان دادند که در فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ حین کار داغ مکانیزم ترمیم از نوع تبلور مجدد دینامیکی رخ می‌دهد هر چند که منحنی‌های سیلان به‌طور مشخص پیک را نشان نمی‌دهند [۸].

۲- مواد و روش تحقیق

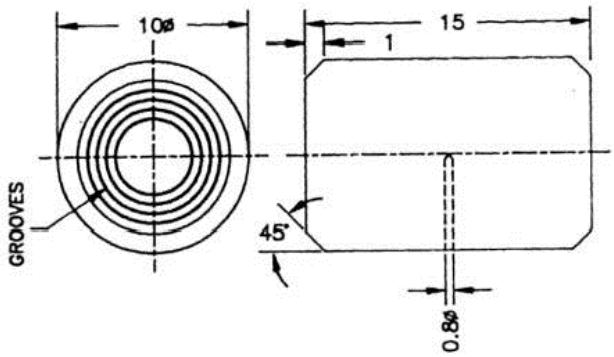
ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن AISI ۳۲۱ یا UNS ۳۲۱۰۰ در حالت ریخته‌گری شده و پس از ذوب مجدد سرباره الکتریکی با استفاده از طیف‌سنج نشر نوری جرقه‌ای در جدول (۱) نشان داده شده است. برای انجام آزمون نمونه‌های آزمایش فشار داغ براساس استاندارد به‌صورت استوانه‌هایی با نسبت ارتفاع به قطر برابر با ۱/۵ مطابق شکل (۱) تهیه شد [۱۰ و ۱۱].

قبل از آغاز فرایند شکل‌دهی، برای حذف فاز فریت دلتا نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت با استفاده از گاز محافظ آرگون، تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند و پس از اطمینان از عدم حضور فاز فریت دلتا، آزمون فشار گرم در نرخ کرنش ثابت و تحت

[DOR: 20.1001.1.2251600.1396.36.3.3.4]
[DOI: 10.29252/jame.36.3.63]

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ براساس درصد وزنی

Fe	W	Cu	V	Al	Ti	Mo	Ni	Cr	Si	Mn	C
باقی‌مانده	۰/۰۷ ±۰/۰۱	۰/۱۵ ±۰/۰۲	۰/۰۵ ±۰/۰۱	۰/۰۵۵ ±۰/۰۰۱	۰/۴۸ ±۰/۱	۰/۱۷ ±۰/۰۱	۱۱/۱۹ ±۰/۳	۱۸/۹۱ ±۰/۸	۰/۷۹ ±۰/۰۲	۱/۲۸ ±۰/۰۴	۰/۰۵۶ ±۰/۰۰۲



شکل ۱- شمایی از ابعاد نمونه آزمون فشار گرم [۱۱]

اتمسفر خنثی برروی نمونه‌ها اعمال شد [۱۲]. آزمون‌های فشار گرم برروی نه نمونه تحت کرنش حقیقی ۰/۶ در سه نرخ کرنش ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵ و (۱/S) ۰/۰۱ و سه دمای ۹۰۰، ۹۵۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام پذیرفتند و برای اطمینان از تکرارپذیری اطلاعات، هر آزمون سه بار انجام گرفت. نمونه‌ها جهت آزمایش‌های متالوگرافی در جهات موازی و عمود بر محور اعمال فشار مقطع زده شدند. برای پولیش نمونه‌ها از سمباده‌های از جنس کاربید سیلیسیوم تا دانه‌بندی ۱۰۰۰، به همراه محلول سوسپانسیون آلومینا تا حد ریزی ۰/۰۵ میکرومتر استفاده شد و در انتها نمونه‌ها با محلول‌های اسید اگزالیک ۱۰ درصد با ولتاژ ۶ ولت و شدت جریان ۰/۴۸ آمپر بر سانتی‌متر مربع الکترواچ شدند [۱۳].

نمودارهای تنش حقیقی- کرنش حقیقی آزمون‌های فشار گرم با صرف‌نظر از افزایش دمای ناشی از تغییر شکل (به‌دلیل دمای زیاد آزمایش و همچنین کم بودن نرخ کرنش) و با فرض ثابت بودن حجم در حین تغییر شکل رسم شد.

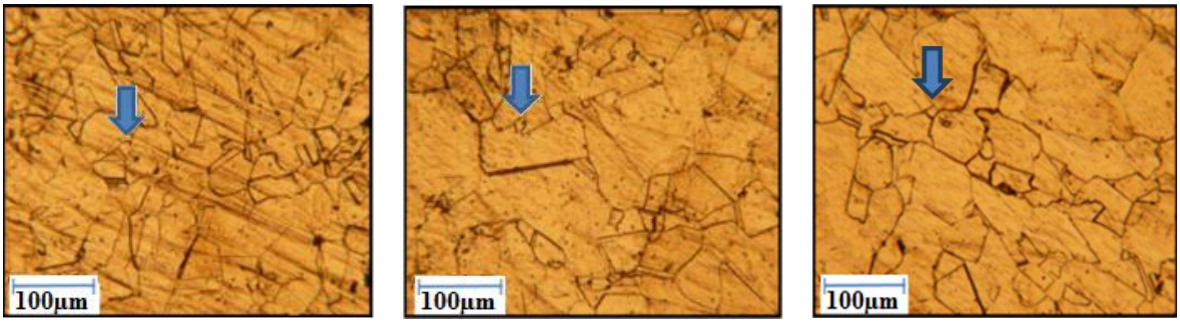
برای انجام محاسبات برروی نمودارها، از معادلات درجه ۴ منطبق بر آنها برای انجام محاسبات و حذف نویز و پراکندگی داده های به‌دست آمده از دستگاه آزمون فشار گرم، استفاده گردید. معادلات درجه ۴ برازش شده برروی نمودارهای خام دارای درصد عدم انطباق بسیار ناچیزی بودند. همچنین به‌منظور کاهش تأثیر اصطکاک بین فک‌های دستگاه و نمونه در حین فشار داغ از مواد روان‌ساز استفاده گردید ولی برای رسیدن به مقادیر معتبر علاوه بر استفاده از روان‌ساز باید اثر اصطکاک را حذف کرد. بدین‌منظور در این تحقیق از روش محاسباتی که براساس معیار کران بالا ارائه شده است [۱۴ و ۱۵] و مطابق با رابطه (۱) می‌باشد استفاده شده است:

$$\frac{P_{ave}}{\sigma_{\circ}} = \lambda b \frac{R}{H}\left\{\left[\frac{1}{12}+\left(\frac{H}{R}\right)^{2}\times\frac{1}{b^{2}}\right]^{\frac{3}{2}}-\left[\left(\frac{H}{R}\right)^{3}\times\frac{1}{b^{3}}\right]-\left[\frac{m}{24\sqrt{3}}\times\frac{e^{\frac{-b}{2}}}{e^{\frac{-b}{2}}-1}\right]\right\} \qquad (1)$$

در این رابطه با انجام محاسبات با استفاده از پارامتر بشکه‌ای شدن، فاکتور اصطکاک و برخی پارامترهای هندسی قطعه، نسبت (P_{ave}) (فشار خارجی اعمال شده بر نمونه) و ($\sigma_{\circ}$) تنش سیلان عاری از اصطکاک به‌دست می‌آید.

برای بیان ارتباط بین تنش سیلان (σ)، دما (T) و نرخ کرنش (ε°) در دماهای زیاد، از رابطه (۲)، استفاده شد. تابع $F(\sigma)$ بسته به مقادیر مختلف تنش دارای روابط متفاوتی می‌باشد

[DOR: 20.1001.1.2251600.1396.36.3.3.4]
[DOI: 10.29252/jame.36.3.63]



(الف) (ب) (ج)

شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی نوری از سه نمونه فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ پس از فشار گرم (پیکان‌ها نشان‌دهنده دانه‌های جدید تبلور مجدد یافته است) الف) نمونه پس از آزمون فشار گرم در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ کرنش (۱/sec) ۰/۰۱ تحت کرنش حقیقی۰/۶، ب) نمونه پس از آزمون فشار گرم در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ کرنش (۱/sec) ۰/۰۱ تحت کرنش حقیقی۰/۶، ج) نمونه پس از آزمون فشار گرم در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ کرنش (۱/sec) ۰/۰۱ تحت کرنش حقیقی۰/۶

که برای مقادیر کم تنش ($\alpha.\sigma < ۰/۸$) به‌صورت رابطه (۳)، برای مقادیر زیاد تنش ($\sigma.\alpha > ۱/۲$) به‌صورت رابطه (۴) و برای تمامی مقادیر تنش به‌صورت رابطه (۵) استفاده شد. در این روابط، R ثابت جهانی گازها ($۸/۳۱\ J.mol^{-1}.K^{-1}$)، T دمای مطلق برحسب کلوین، Q انرژی فعال‌سازی برحسب کیلو ژول برمول می‌باشد و پارامترهای β، α، A و n ثابت ماده هستند ($\alpha = \frac{\beta}{n}$). همچنین پارامترهای B و C و D نیز در این روابط ثابت ماده و وابسته به دما هستند [۶-۹]:

$$\dot{\varepsilon} = A\exp(\frac{-Q}{RT}) \times F \quad (۲)$$

$$F(\sigma) = \sigma^n \quad (۳)$$

$$F(\sigma) = \exp(\beta\sigma) \quad (۴)$$

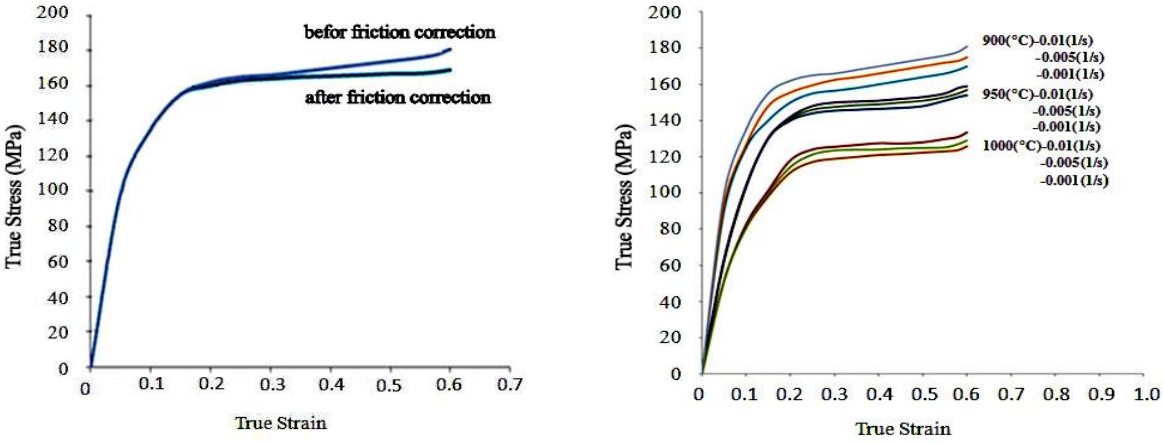
$$F(\sigma) = [\mathrm{Sinh}(\alpha\sigma)]^{n'} \quad (۵)$$

۳- نتایج و بحث

شکل (۲) تصاویر ریزساختار برخی نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ را پس از آزمون فشار گرم نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در بسیاری از مناطق مستعد برای تشکیل جوانه‌های حاصل از تبلور مجدد (مانند نواحی برخورد سه مرزدانه[۲]) دانه‌های ریزی وجود دارد. با توجه به اینکه نمونه‌ها پس از پایان آزمون فشار داغ و باربرداری، بلافاصله در مخلوط آب ویخ کوئنچ شدند و زمان کافی برای تبلور مجدد استاتیکی و یا متادینامیکی به قطعات داده نشد، وجود این دانه‌های ریز که به وفور در ریزساختار دیده می‌شوند می‌تواند نشانگر وقوع مقدار زیادی از تبلور مجدد دینامیکی در طول انجام تغییر شکل گرم باشد که با توجه به انرژی نقص در چیده شدن کم فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ وقوع این پدیده قابل توجیه است.

شکل (۳- الف) منحنی‌های سیلان به‌دست آمده برای فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ را در حالت همگن شده پس از آزمون فشار گرم در محدوده دمایی ۹۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و محدوده نرخ کرنش ۰/۱-۰/۰۰۱ (۱/s) و تحت کرنش حقیقی ۰/۶ نشان می‌دهد. به منظور کاهش تأثیر اصطکاک بین فک‌های دستگاه و نمونه‌ها در حین فشار داغ از مواد روان‌ساز استفاده گشت. ولی جهت رسیدن به مقادیر معتبر، علاوه بر استفاده از روان‌ساز، اثر اصطکاک با استفاده از روش محاسباتی براساس معیار کران بالا حذف شد [۱۴ و ۱۵]. در شکل (۳- ب) یک منحنی اصلاح شده به‌طور نمونه با استفاده از تحلیل کران بالایی آورده شده است و نشان می‌دهد که مقدار تنش در حالت اصلاح شده، کمتر از تنش سیلان خام می‌باشد. مشاهده می‌شود که اثر

[DOR: 20.1001.1.2251600.1396.36.3.3.4]
[DOI: 10.29252/jame.36.3.63]



(ب) (الف)

شکل ۳- الف) منحنی‌های آزمون فشار گرم برای نمونه‌های همگن شده، ب) تأثیر حذف اصطکاک از نمودار تنش- کرنش حقیقی برای نمونه همگن شده فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ پس از آزمون فشار گرم در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ کرنش (۱/sec) ۰/۰۱ تحت کرنش حقیقی۰/۶

جدول ۲- معادله درجه ۳ منطبق شده بر منحنی کارسختی برحسب تنش سیلان

نوع نمونه	دما (درجه سانتی‌گراد)	نرخ کرنش (۱/s)	کرنش حقیقی	معادله
همگن	۹۰۰	۰/۰۰۱	۰/۶۰	$\theta = ۰/۰۰۰۸\,\sigma^{۳} - ۰/۲۲۸۹\,\sigma^{۲} + ۴/۰۹۱۷\,\sigma + ۱۳۵۵/۲$
همگن	۹۰۰	۰/۰۰۵	۰/۶۰	$\theta = ۰/۰۰۰۷\,\sigma^{۳} - ۰/۲۶۴۲\,\sigma^{۲} + ۹/۱۱۱۷\sigma + ۲۱۷۸/۱$
همگن	۹۰۰	۰/۰۱	۰/۶۰	$\theta = ۰/۰۰۰۷\,\sigma^{۳} - ۰/۲۹۸۱\,\sigma^{۲} + ۸/۹۳۳۴\,\sigma + ۳۶۱۶/۳$
همگن	۹۵۰	۰/۰۰۱	۰/۶۰	$\theta = ۰/۰۰۰۳\,\sigma^{۳} - ۰/۰۵۴۴\,\sigma^{۲} + ۰/۶۵۲۴\,\sigma + ۱۵۸/۸$
همگن	۹۵۰	۰/۰۰۵	۰/۶۰	$\theta = ۰/۰۰۰۲\,\sigma^{۳} - ۰/۰۳۸۲\,\sigma^{۲} + ۱/۷۰۶۱\,\sigma + ۱۰۲/۵$
همگن	۹۵۰	۰/۰۱	۰/۶۰	$\theta = ۰/۰۰۰۲\,\sigma^{۳} - ۰/۰۴۰۴\,\sigma^{۲} - ۴/۶۶۰۹\,\sigma + ۸۷۵/۶$
همگن	۱۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۶۰	$\theta = ۰/۰۰۰۴\,\sigma^{۳} - ۰/۰۶۵۹\,\sigma^{۲} - ۴/۰۱۱۷\,\sigma + ۴۴۹/۴$
همگن	۱۰۰۰	۰/۰۰۵	۰/۶۰	$\theta = ۰/۰۰۰۳\,\sigma^{۳} - ۰/۰۵۶\,\sigma^{۲} - ۴/۱۵۳۳\,\sigma + ۵۷۱/۸$
همگن	۱۰۰۰	۰/۰۱	۰/۶۰	$\theta = ۰/۰۰۰۳\,\sigma^{۳} - ۰/۰۶۷۹\,\sigma^{۲} - ۳/۲۲۲۶\,\sigma + ۶۶۷/۷$

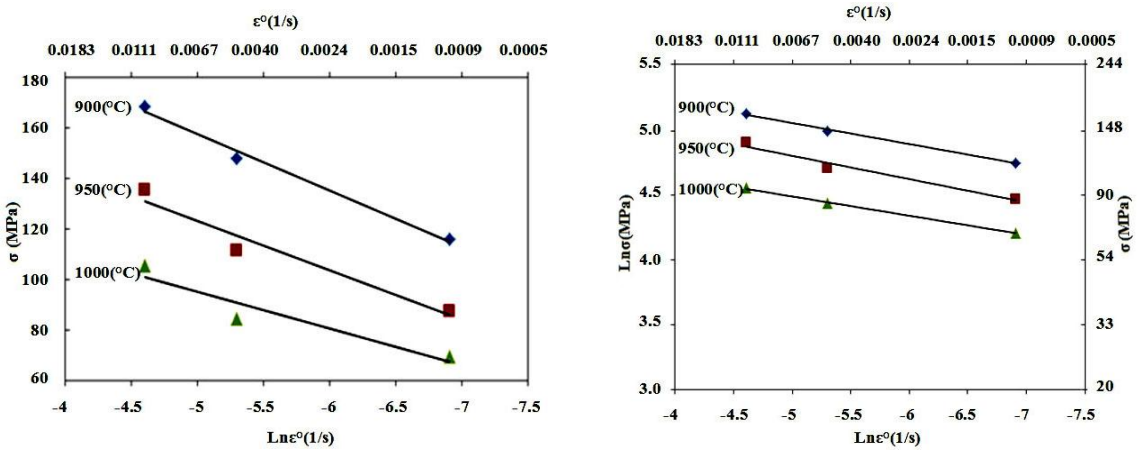
اصطکاک قابل ملاحظه است و با افزایش مقدار تنش، اختلاف بین دو نمودار بیشتر می‌شود.

برای تعیین تنش بحرانی آغاز تبلور مجدد دینامیکی (σ_c)، از منحنی منطبق شده بر نمودار نرخ کار سختی (θ) برحسب تنش، مشتق‌گیری انجام گرفت. بدین‌صورت معادله نمودار $\theta-\sigma$ به‌صورت یک معادله درجه سوم $(\theta = A\sigma^{۳} + B\sigma^{۲} + c\sigma + D)$ تعیین گردید. سپس طبق تعاریف ریاضی، مشتق دوم این رابطه $(\frac{d^{۲}\theta}{d\sigma^{۲}} = ۶A\sigma + ۲B)$ در نقطه بحرانی محاسبه گردید. در نقطه بحرانی $(\sigma = \sigma_c)$ مشتق دوم رابطه باید صفر شود بنابراین می‌توان مقدار تنش بحرانی $(\sigma_c = \frac{-B}{۳A})$ را برای هریک از حالات محاسبه نمود. همچنین از این منحنی برای به‌دست آوردن مقدار دقیق تنش اوج (σ_P) نیز استفاده شد. در جدول (۲) مقادیر معادلات چند جمله‌ای‌های درجه سوم منطبق شده بر نمودارهای نرخ کارسختی برحسب تنش نشان داده شده است. در ادامه از این معادلات برای به‌دست آوردن مقادیر تنش و کرنش بحرانی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1396.36.3.3.4]
[DOI: 10.29252/jame.36.3.63]

جدول ۳- مشخصات نقاط تنش اوج و بحرانی برای شرایط مختلف تغییر شکل گرم فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱

نوع نمونه	دما (درجه سانتی‌گراد)	نرخ کرنش (1/s)	کرنش حقیقی	تنش بحرانی (مگاپاسکال)	کرنش بحرانی	تنش اوج (مگاپاسکال)	کرنش اوج
همگن	۹۰۰	۰/۰۰۱	۰/۶۰	۹۵/۳۷	۰/۰۹۷۴	۱۱۵/۹۰۸۸	۰/۰۸۹
همگن	۹۰۰	۰/۰۰۵	۰/۶۰	۱۲۵/۸۰	۰/۰۷۲۲	۱۴۸/۳۸۳۴	۰/۱۴
همگن	۹۰۰	۰/۰۱	۰/۶۰	۱۴۱/۹۵	۰/۱۱۱	۱۶۸/۷۱۰۵	۰/۴۳
همگن	۹۵۰	۰/۰۰۱	۰/۶۰	۶۰/۴۴	۰/۰۴۷۱	۸۷/۷۲۶۷	۰/۰۷
همگن	۹۵۰	۰/۰۰۵	۰/۶۰	۶۳/۳۳	۰/۰۵۰۵	۱۱۱/۷۳۹۲	۰/۱۱
همگن	۹۵۰	۰/۰۱	۰/۶۰	۶۷/۳۳	۰/۰۵۴	۱۳۵/۴۷۷۷	۰/۱۷
همگن	۱۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۶۰	۵۴/۹۱	۰/۰۵۸	۶۷/۶۸۳۶	۰/۰۷۷
همگن	۱۰۰۰	۰/۰۰۵	۰/۶۰	۶۲/۲۲	۰/۰۶۹	۸۴/۷۸۵۲	۰/۱۰
همگن	۱۰۰۰	۰/۰۱	۰/۶۰	۷۵/۴۴	۰/۰۸۸	۹۵/۷۴	۰/۱۳



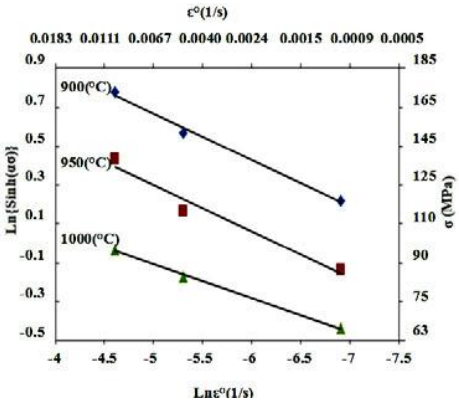
(الف) (ب)

شکل ۴- الف) تغییرات خطی لگاریتم تنش برحسب لگاریتم نرخ کرنش برای تعیین ثابت n،
ب) تغییرات خطی تنش سیلان برحسب لگاریتم نرخ کرنش برای تعیین ثابت β

برای شروع فرایند تبلور مجدد دینامیکی و همچنین مقادیر تنش و کرنش اوج استفاده شده است که نتایج حاصل از آنها در جدول (۳) نمایش داده شده است.

یکی از روش‌های رایج برای مطالعه رفتار ماده حین تغییر شکل گرم، تعیین رابطه بین انرژی ظاهری فعال‌سازی مکانیزم‌های شکل‌پذیری گرم (Q) و پارامترهای شکل‌دهی مانند تنش (σ)، دما (T) و نرخ کرنش ($\dot{\varepsilon}$) در دماهای زیاد می‌باشد. اما برای به‌دست آوردن انرژی ظاهری فعال‌سازی باید ثابت‌های موجود در روابط حاکم بر تنش در حالات مختلف (روابط (۳) تا (۵) که عبارتند از β، α، A و n را محاسبه نمود. برای به‌دست آوردن این ثابت از مقادیر تنش اوج (σ_p) برای ترسیم نمودارهای خطی $\ln(\sigma)$ برحسب $\ln(\dot{\varepsilon})$، σ برحسب $\ln(\dot{\varepsilon})$ و $\ln \sinh(\alpha\sigma)$ برحسب $\ln(\dot{\varepsilon})$ استفاده گردید [۱۷]. شکل‌های (۴) و (۵) این نمودارها را برای شرایط مختلف تغییر شکل نشان می‌دهند. مشاهده می‌گردد که نقاط به‌دست آمده در شکل‌های (۴) و (۵) به‌خوبی خطوطی موازی ایجاد می‌کنند. به‌دلیل تقریباً موازی بودن خطوط و همچنین ثابت بودن حدودی شیب می‌توان رفتار ماده را در تمام حالات متأثر از مکانیزمی یکسان فرض نمود. با گرفتن میانگین از مقادیر معکوس شیب خطوط شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب ثابت n، β و n′ موجود در

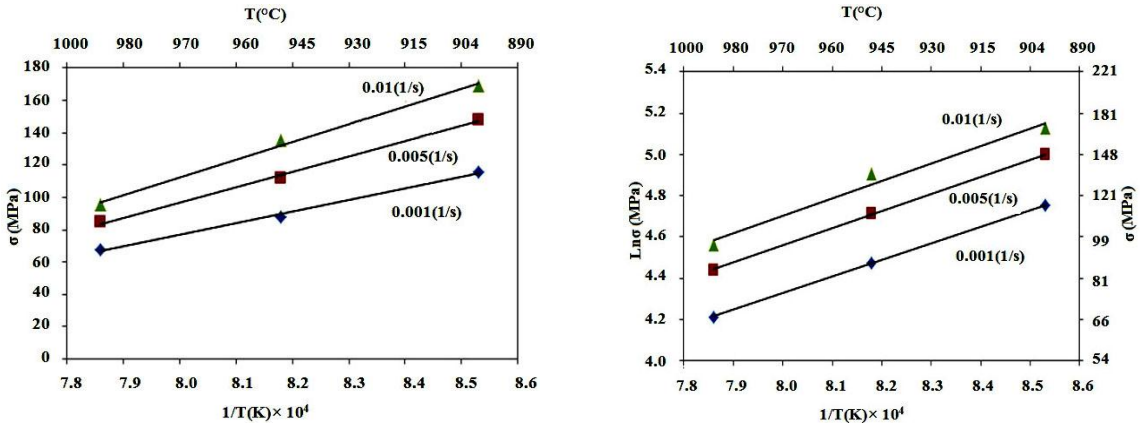
[DOR: 20.1001.1.2251600.1396.36.3.3.4]
[DOI: 10.29252/jame.36.3.63]



شکل ۵- تغییرات خطی $\ln\sinh(\alpha\sigma)$ برحسب لگاریتم نرخ کرنش برای تعیین ثابت n'

جدول ۴- پارامترهای به‌دست آمده برای فولاد زنگ‌نزن۳۲۱

پارامتر	N	n'	α	β
مقدار	٦/١٣	۴/٧١	٠/٠٠٩	٠/٠٥۴



(ب) (الف)

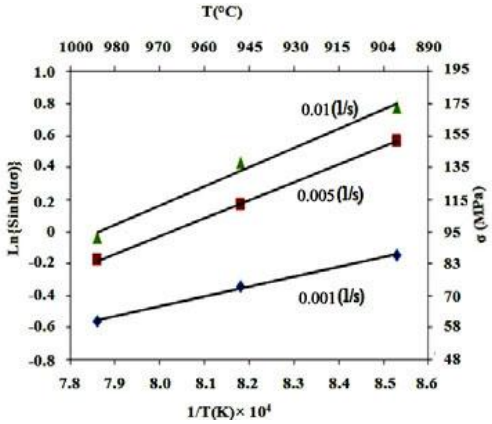
شکل ۶- الف) تغییرات لازم برای تعیین انرژی فعال‌سازی تغییر شکل فولاد زنگ‌نزن۳۲۱ با رابطه (۸)، ب) تغییرات لازم برای تعیین انرژی فعال‌سازی تغییر شکل فولاد زنگ‌نزن۳۲۱ با رابطه (۹)

معادلات ذکر شده به‌دست آمدند. جدول (۴) مقدار ثابت به‌دست آمده را با استفاده از روابط مختلف نشان می‌دهد. مقادیر به‌دست آمده برای ثابت با سایر تحقیقات و مراجع تطابق نسبتاً خوبی را دارا می‌باشد [۱۸].

برای تعیین مقدار انرژی فعال‌سازی (Q) برای فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱، از رابطه (۱) (با استفاده از هر یک از تعاریف $F(\sigma)$) ابتدا لگاریتم و سپس مشتق (در نرخ کرنش ثابت) گرفته شد. بدین‌ترتیب روابط (۶) تا (۸) برای محاسبه مقدار انرژی فعال‌سازی حاصل شد. سپس برای دست‌یابی به مقدار متوسط جملات سمت راست روابط ذکر شده، از رسم منحنی‌های $\ln\{\sinh(\alpha\sigma)\}$، $\ln\sigma$ و σ برحسب $\frac{1}{T}$ برای نرخ کرنش‌های مختلف استفاده شد. شکل‌های (۶) و (۷) این نمودارها را نشان می‌دهند.

$$Q = Rn\left[\partial(Ln\sigma)/\partial\left(\frac{1}{T}\right)\right]_{\varepsilon^{\circ}} \qquad (۶)$$

[DOR: 20.1001.1.2251600.1396.36.3.3.4]
[DOI: 10.29252/jame.36.3.63]



شکل ۷- نمودارهای تعیین انرژی فعال‌سازی تغییر شکل فولاد زنگ‌نزن۳۲۱ با رابطه (۱۰)

جدول ۵- انرژی فعال‌سازی فولاد زنگ‌نزن۳۲۱

رابطه استفاده شده برای محاسبه ی انرژی فعال‌سازی	انرژی فعال سازی در کرنش حقیقی ۰/۶ $Q(kj.mol^{-1})$
رابطه محاسبه Q	کرنش حقیقی ۰/۶
رابطه (۵)	۴۲۲
رابطه (۶)	۴۱۴
رابطه (۷)	۳۸۲

$$Q = R\beta\left[\partial(\sigma)/\partial\left(\frac{1}{T}\right)\right]_{\varepsilon^{\circ}} \quad (۷)$$

$$Q = Rn'\left[\partial Ln\{Sinh(\alpha\sigma)\}/\partial\left(\frac{1}{T}\right)\right]_{\varepsilon^{\circ}} \quad (۸)$$

با بررسی شکل‌های (۶) و (۷) مشاهده می‌گردد که خطوط تشکیل شده تقریباً موازی بوده و همچنین دارای شیب ثابت می‌باشند. در این صورت با تقریب مناسب می‌توان انرژی ظاهری فعال‌سازی تغییر شکل را در هر یک از حالات مقدار ثابتی درنظر گرفت. با استفاده از میانگین شیب خطوط نمودارهای موجود در شکل‌های (۶) و (۷) و همچنین ثابت به‌دست آمده در جدول (۵)، مقادیر انرژی فعال‌سازی (Q) برای هر یک از حالات محاسبه گردید. جدول (۵) مقادیر محاسبه شده (Q) را برای حالات مختلف نشان می‌دهد.

با توجه به جدول (۵) مشاهده می‌گردد که هر سه رابطه توانی، نمایی و سینوسی تقریباً مقادیر یکسانی را برای انرژی اکتیواسیون تغییر شکل گرم فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ به‌دست آورده‌اند که تمامی آنها با سایر مراجع علمی تطابق خوبی دارد. این مطلب نشان می‌دهد که تمامی روابط استفاده شده در این تحقیق با دقت نسبتاً خوبی برای بررسی رفتار تغییر شکل گرم فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند. اما مقدار به‌دست آمده توسط رابطه توانی رابطه (۵) در مقایسه با سایر مقادیر از تطابق بهتری با سایر مراجع علمی معتبر، برخوردار می‌باشد [۱۹]. بدین‌ترتیب می‌توان انتظار داشت که در مقادیر کم تنش، استفاده از این روش برای بررسی رفتار تغییر شکل گرم فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ مناسب‌تر می‌باشد. بدین‌ترتیب در مقادیر کرنش حقیقی برابر با ۰/۶ مقدار انرژی اکتیواسیون تغییر شکل گرم فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ برابر ۴۲۲ کیلو ژول برمول تعیین گردید. در نهایت با استفاده از مقدار Q محاسبه شده، پارامتر زنر- هولمن(z) توسط رابطه (۹) برای شرایط مختلف تغییر شکل محاسبه شد. که در جدول (۶) مقادیر z محاسبه شده برای شرایط مختلف تغییر شکل نشان داده شده است [۱۹]:

$$Z = \varepsilon^{\circ}\exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (۹)$$

در منابع مختلف برای فولادهای زنگ‌نزن ۳۱۶، ۳۰۱ و ۳۰۴

[DOR: 20.1001.1.2251600.1396.36.3.3.4]
[DOI: 10.29252/jame.36.3.63]

جدول ۶- مقادیر پارامتر زنر- هولمن برای شرایط تغییر شکل مختلف فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در کرنش ۰/۶

T درجه سانتی‌گراد	ε^{o} (1/S)	Z
۹۰۰	۰/۰۰۱	$۶/۳۳\times۱۰^{۱۵}$
۹۰۰	۰/۰۰۵	$۳/۱۶\times۱۰^{۱۶}$
۹۰۰	۰/۰۱	$۶/۳۳\times۱۰^{۱۶}$
۹۵۰	۰/۰۰۱	$۱/۰۷\times۱۰^{۱۵}$
۹۵۰	۰/۰۰۵	$۵/۳۹\times۱۰^{۱۵}$
۹۵۰	۰/۰۱	$۱/۰۷\times۱۰^{۱۶}$
۱۰۰۰	۰/۰۰۱	$۲/۱۱\times۱۰^{۱۴}$
۱۰۰۰	۰/۰۰۵	$۱/۰۵\times۱۰^{۱۵}$
۱۰۰۰	۰/۰۱	$۲/۱۱\times۱۰^{۱۵}$

مقدار متوسط انرژی فعال‌سازی برای تغییر شکل گرم آنها به ترتیب برابر ۳۷۸، ۴۰۰ و ۴۱۰ کیلو ژول برمول گزارش شده است [۱۶، ۱۷ و ۲۰]. همچنین مقادیر گزارش شده برای انرژی اکتیواسیون تغییر شکل گرم برای فولادهای زنگ‌نزن از رابطه $Q = (۱۳/۵\times Ts)\pm ۲۵$ پیروی می‌کنند [۱۴]. که در این رابطه Ts مجموع درصد وزنی مواد حل شده می‌باشد که این مقدار برای فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ به کار رفته در این تحقیق ۳۳/۴۸۵ بوده و لذا مقدار انرژی اکتیواسیون محاسباتی برای این فولاد مقدار (۴۵۱/۶۸۳±۲۵) خواهد بود که با عدد تجربی به‌دست آمده در این تحقیق (۴۲۲) دارای اختلاف ناچیزی می‌باشد. روابط و اعداد به‌دست آمده می‌تواند نشان‌دهنده دقت نسبتاً مناسب روابط پیشنهادی و اعداد به‌دست آمده برای مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ باشد. از این‌رو می‌توان برای حالات و شرایط متفاوت تولید فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ داخلی از این مدل‌ها و معادلات برای پیش‌بینی تقریبی رفتار این فولاد استفاده نمود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمون‌های فشار گرم برروی نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ ریخته‌گری شده و همگن شده در بازه دمایی ۹۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و در محدوده نرخ کرنش (۱/S) ۰/۰۱ تا ۰/۰۰۱ تحت کرنش حقیقی ۰/۶ انجام پذیرفت و مشاهده گردید تمامی نمودارهای تنش- کرنش حقیقی رفتار متداول بازیابی دینامیکی را از خود نشان دادند اما با بررسی معادلات ساختاری مشخص گردید که تبلور مجدد دینامیکی در حین فرایند تغییر شکل رخ داده است و کرنش بحرانی برای آغاز فرایند تبلور مجدد دینامیکی در حالات مختلف مشخص گردید. همچنین با بررسی معادلات ساختاری رفتار تغییر شکل گرم فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ تا حدودی بررسی گردید و انرژی اکتیواسیون تغییر شکل گرم آن برابر با ۴۲۲ کیلو ژول برمول تعیین گردید.

واژه‌نامه

1. stabilization
2. grain boundary triple junction

مراجع

1. Totten, G. E., *Steel Heat Treatment Handbook*, 2nd Edition, pp. 694-739, Taylor and Francis group, NewYork, 2007.
2. Comstock, G. F., *Titanium in Steel*, pp. 238-352, *Pitman Metallurgy Series*, NewYork, 1949.
3. Cobb, H. M., *Stainless Steels*, pp. 23-203, Iron and Steel Society, Warrendale, 1999.
4. Zhang, W., and Wen, Y., "Characterization of

[DOR: 20.1001.1.2251600.1396.36.3.3.4]

[DOI: 10.29252/jame.36.3.63]

Different Work Hardening Behavior in AISI321 Stainless Steel and Hadfield Steel", *Springer Science and Business Media*, Vol. 25, pp. 3433-3437, 2010.
5. Park, W. S., Yoo, S. W., Kim, M. H., and Lee, J. M., "Strain-Rate Effects on the Mechanical Behavior of AISI 300 Series of Austenitic Stainless Steel under Cryogenic Environments", *Materials and Design Journal*, Vol. 35, pp. 3630-3640, 2010.
6. Ryan, N. D., and Mcqueen, H. J., "Dynamic Softening Mechanisms in 304 Austenitic Stainless Steel", *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 29, pp. 550-565, 1990.
7. Poliak, E. I., and Jonas, J. J., "Initiation of Dynamic Recrystallization in Constant Strain Rate Hot Deformation", *ISIJ International*, Vol. 43, pp. 684-691, 2003.
8. Poliak, E. I., and Jonas, J. J., "A One-Parameter Approach to Determining the Critical Conditions for the Initiation of Dynamic Recrystallization", *Acta Materialia*, Vol. 44, pp. 127-136, 1996.
9. Najafizadeh, A, and Jonas, J. J, "Predicting of the Critical Stress for Initiation of Dynamic Recrystallization", *ISIJ International*, Vol. 46, pp. 1679-1684, 2006.
10. ASTM Designation E9, "Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature", p. 10, USA, 2004.
11. Prasad, Y. V. R. K, *Hot Working Guide*, ASM International, pp. 262-342, Ohio, 1997.
12. Chandler, H., *Heat Treater's Guide: Practice and Procedure for Irons and Steels*, ASM International, pp. 724-758, Ohio, 1995.
13. Vander Voort, F. G., and Lucas, G. M., *Metallography and Microstructures of Stainless Steels and Maraging Steels*, *Metallography and Microstructures*, ASM Hand Books, ASM International, Vol. 9, pp. 670-700, 2004.
14. Mirzadeh, H., and Najafizade, A., "Extrapolation of Flow Curves at hot Working Conditions", *Material Science and Engineering*, Vol. 572, pp. 1856-1860, 2010.
15. Ebrahimi, R., and Najafizade, A., "A New Method for Evaluation of Friction in Bulk Metal Forming", *Material Processing Technology*, Vol. 152, pp. 136-143, 2004.
16. Jafari, M., and Najafizadeh, A., "Correlation between Zener-Holloman Parameter and Necklace Drx during Hot Deformation of 316 Stainless Steel", *Material Science and Engineering*, Vol. 25, pp. 16-25, 2009.
17. McQueen, H. C., and Ryan, N. D., "Constitutive Analysis in Hot Working", *Material Science and Engineering Journal*, Vol. 25, pp. 43-63, 1985.
18. Kim, S., and Yoo, Y. C., "Dynamic Recrystallization Behavior of AISI 304 Stainless Steel", *Material Science and Engineering*, Vol. 25, pp. 108-113, 2001.
19. Havela, L., Kratochvil, P., Lukac, P., Smola, B., and Svobodova, A., "Softening During and After the Hot Deformation of the AISI321 With Respect to Practical Applications", Ph.D. Thesis, Department Of Metal Physic, Charles University, Prague, pp. 384-388, 1988.
20. Mirzadeh, H., and Najafizade, A., "Prediction of Critical Conditions for Initiation of Dynamic Recrystallization", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 1174-1179, 2010.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1396.36.3.3.4]
[DOI: 10.29252/jame.36.3.63]