



بررسی تبلور مجدد دینامیکی در فولاد لوله انتقال گاز طبیعی با گرید API X70

مصطفی نخعی^۱، سیدحجت هاشمی^{۲*}

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی ۹۷۱۷۵/۶۱۵، shhashemi@birjand.ac.ir

چکیده- در تحقیق حاضر رفتار تغییر شکل گرم فولاد API X70 به وسیله آزمون فشار گرم مطالعه شده است. برای آزمایش، محدوده دمایی بین ۹۵۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد با اعمال نرخ کرنش‌های متفاوت ۰/۰۱، ۰/۱ و ۱ بر ثانیه انتخاب گردید. از منحنی‌های تنش - نرخ کارسختی برای نشان دادن وقوع تبلور مجدد دینامیکی استفاده و کاربرد روابط مشخصه برای تعیین ثوابت کار گرم این فولاد تشریح شد. با استفاده از تحلیل رگرسیون، ضریب تنش (α) و توان تنش (n) به ترتیب ۰/۰۱۶ و ۴/۴۲۰ محاسبه و انرژی فعال‌سازی تغییر شکل این فولاد نیز برابر ۳۸۲ kJ/mol تعیین شد. همچنین اثر پارامتر زرنر - هولمن (Z) روی نقاط ویژه منحنی‌های سیلان با استفاده از روابط تجربی بررسی و نهایتاً سینتیک تبلور مجدد دینامیکی این فولاد مطالعه و رابطه حاکم بر این رفتار استخراج گردید.

کلیدواژگان: تغییر شکل گرم، تبلور مجدد دینامیکی، آزمون فشار گرم، فولاد خط لوله API X70، سینتیک تبلور مجدد دینامیکی.

Investigation of dynamic recrystallization in gas transportation pipeline steel of grade API X70

M. Nakhaei¹, S.H. Hashemi^{2*}

1- PhD Student, Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran

2- Prof., Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran

* P.O.B. 97175/615 Birjand, Iran. shhashemi@birjand.ac.ir

Abstract- In this research, the hot deformation behavior of API X70 steel was investigated by hot compression tests. A temperature range between 950 and 1150 °C was used for experiments with different strain rates of 0.01, 0.1 and 1 s⁻¹. The work hardening rate versus stress curves were used to reveal if dynamic recrystallization (DRX) occurred. The application of constitutive equations to determine the hot working constants for the tested steel was discussed. Using regression analysis, the stress multiplier (α), the apparent stress exponent (n), and the activation energy (Q_d) for DRX were calculated as 0.016 and 4.420, and 382 kJ/mol, respectively. Furthermore, the effect of Zener-Hollomon parameter (Z) on the characteristic points of flow curves was investigated using the obtained relations. The dynamic recrystallization (DRX) kinetics of API X70 steel was also studied and its governing equation was derived.

Keywords: Hot Deformation, Dynamic Recrystallization, Hot Compression Test, API X70 Pipeline Steel, Dynamic Recrystallization Kinetics.

۱- مقدمه

چقرمگی در این فولادها بالا می‌باشد؛ از طرفی به منظور کاهش هزینه‌های خط انتقال، قطر این لوله‌ها در سال‌های اخیر افزایش و ضخامت آنها کاهش یافته است [۱-۲]. در این میان فولاد

فولادهای خطوط لوله به منظور انتقال گاز طبیعی در فواصل طولانی و با فشار بالا استفاده می‌شوند. استحکام تسلیم و

محدوده کرنش بحرانی معمولاً بین ۰/۶۵ تا ۰/۸ کرنش حداکثر (ϵ_p) می‌باشد، که البته به وسیله مشاهدات مستقیم ریزساختاری نیز قابل تشخیص است [۱۱، ۱۰]. با افزایش کرنش بعد از ϵ_p نیز به دلیل افزایش مقدار تبلور مجدد دینامیکی در مقابل کار سختی، تنش تا رسیدن به تنش حالت پایدار^۹ (σ_{ss}) کاهش خواهد یافت.

در یک ماده، رفتار تبلور مجدد دینامیکی وابسته به سه پارامتر می‌باشد: اندازه دانه اولیه، دما و نرخ کرنش. اندازه دانه اولیه روی کرنش بحرانی، کرنش حداکثر و سینتیک تبلور مجدد دینامیکی تأثیرگذار است [۱۲-۱۴]. اندازه دانه اولیه کوچک‌تر، کرنش بحرانی و کرنش حداکثر کمتری خواهد داشت؛ این موضوع به دلیل نواحی مرز دانه‌ای بیشتری است که باعث سینتیک تبلور مجدد دینامیکی سریع‌تری می‌شود [۱۵]. دما و نرخ کرنش نیز همان گونه که در این تحقیق بررسی شده است، تأثیر قابل توجهی بر رفتار تبلور مجدد دینامیکی مواد دارند. به طوریکه در محدوده دمایی وقوع تبلور مجدد، با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش، تبلور مجدد دینامیکی راحت‌تر به وقوع می‌پیوندد.

تحقیقات زیادی روی مدل‌سازی تبلور مجدد دینامیکی انجام شده است [۱۶-۲۰]. یکی از مهمترین نکات در مدل‌سازی، تعیین شروع تبلور مجدد دینامیکی می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که وقوع تبلور مجدد دینامیکی بستگی به نقطه عطف روی منحنی نرخ کارسختی در مقابل تنش جریان دارد [۲۱، ۲۲]. نجفی زاده و جوناس [۲۳] معادله درجه سوم را برای تشریح ارتباط بین نرخ کارسختی و تنش جریان پیشنهاد کردند که تعیین نقطه عطف را به صورت ساده‌تر و کمی‌تری ممکن می‌ساخت. روش دیگر، مدل‌سازی منحنی‌های جریان با استفاده از رابطه مشخصه^{۱۰} [۲۴] در شرایط کار گرم و سپس محاسبه نقطه عطف برای تعیین شروع تبلور مجدد دینامیکی می‌باشد. میرزاده و نجفی زاده [۲۵] مقایسه‌ای از این دو روش انجام دادند. علاوه بر این، تلاش‌هایی برای مدل کردن شروع تبلور مجدد دینامیکی با استفاده از مدل بازیابی دینامیکی^{۱۱} [۲۶]، سینتیک تبلور مجدد استاتیکی^{۱۲} [۲۷]، مدل چگالی

خط لوله با گرید API X70 یکی از پرکاربردترین فولادهای خط لوله می‌باشد. تحقیق روی این فولاد عموماً به منظور بهبود خصوصیات مکانیکی به وسیله بهینه کردن فرایند ترمومکانیکال و یا ترکیب شیمیایی متمرکز شده است. بنابراین در حالی که در بعضی از مقالات پدیده‌های ریزساختاری حاصل از فرایندهای ترمومکانیکال بررسی شده است [۳-۵]، در مطالعات دیگری بهبود ترکیب شیمیایی این فولاد مورد توجه قرار گرفته است [۶، ۷]. این در حالی است که به منظور کنترل ریزساختار و خصوصیات مکانیکی فولادهای مذکور حین نورد گرم، مطالعه رفتار کار گرم این فولادها نیز از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد.

در آلیاژهایی که انرژی نقص در چیده شدن پایینی دارند (مانند فاز آستنیت در فولاد)، نرخ کاهش نابجایی‌ها توسط پدیده بازیابی^۱ در مقایسه با نرخ سختکاری کرنشی^۲، کافی نیست، بنابراین چگالی نابجایی‌ها به صورت پیوسته افزایش می‌یابد. هنگامی که انرژی داخلی ماده به یک مقدار مشخص می‌رسد، دانه‌های بدون کرنش^۳ به وسیله پدیده تبلور مجدد^۴، به تدریج جایگزین دانه‌های تغییر شکل یافته می‌شوند. به این نوع از تبلور مجدد که همزمان با تغییر شکل روی می‌دهد، تبلور مجدد دینامیکی^۵ گفته می‌شود [۸]. تبلور مجدد دینامیکی به عنوان یکی از مهمترین ساز و کارهای نرم شدن جسم، پدیده مهمی برای کنترل ریزساختار و خصوصیات مکانیکی در حین کار گرم می‌باشد. با توجه به تأثیر این پدیده روی تنش‌های سیلان در دماهای بالا، به دست آوردن نقاط مشخصه^۶ روی منحنی سیلان ماده از جمله تنش بحرانی^۷ (σ_c) و در نهایت تعیین رفتار سیلانی گرم فولاد جهت مدل‌سازی فرایندهای صنعتی از اهمیت بسیاری برخوردار است [۹].

در حین تغییر شکل آستنیتی، عموماً تنش بحرانی کمی کمتر از تنش حداکثر^۸ (σ_p) می‌باشد. به عبارتی با شروع تبلور مجدد دینامیکی، به دلیل بالاتر بودن مقدار کار سختی، تنش تا رسیدن به نقطه حداکثر افزایش می‌یابد.

1. Recovery Mechanism
2. Strain Hardening Rate
3. Strain-Free Grains
4. Recrystallization Mechanism
5. Dynamic Recrystallization (DRX)
6. Characteristic Points
7. Critical Stress
8. Peak Stress

9. Steady-State Stress

10. Constitutive Equation

11. Dynamic Recovery

12. Static Recrystallization (SRX)

سانتی‌گراد (محدوده بالای دمای عدم تبلور مجدد^۳) با نرخ کرنش‌های مختلف ۰/۱، ۰/۱ و ۱ بر ثانیه تحت فشار قرار می‌گیرند (در مجموع ۱۲ آزمون فشار گرم).



شکل ۱ جزئیات عملیات ترمودینامیکی اجرا شده در آزمون فشار گرم در تحقیق حاضر

به منظور اطمینان از وقوع و تکمیل پدیده تبلور مجدد دینامیکی در آن دسته از شرایط تغییر شکل که وقوع این پدیده محتمل است، همه نمونه‌ها تا کرنش ۰/۷ تحت فشار قرار گرفتند [۹]. سپس نمونه‌ها به منظور حفظ ریزساختار آستنیتی در دماهای بالا و بررسی‌های بعدی اندازه دانه، تا دمای اتاق به سرعت در آب خنک می‌شوند.

۳- نتایج و شرح

۳-۱- منحنی‌های سیلان و تحلیل نرخ کارسختی

منحنی‌های تنش حقیقی - کرنش حقیقی برای فولاد X70 در شکل ۲ نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است دما و نرخ کرنش‌های مختلف تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تنش سیلان این فولاد دارند، به طوری که با افزایش نرخ کرنش در دماها و کرنش مشابه، تنش سیلان افزایش و از طرف دیگر با افزایش دما در نرخ کرنش و کرنش مشابه، تنش سیلان کاهش می‌یابد. در اغلب منحنی‌ها (به خصوص شکل‌های ۲-ب تا د)، رشد اولیه و سریع تنش تا رسیدن به تنش حداکثر و در ادامه کاهش تدریجی آن تا رسیدن به تنش حالت پایدار (که نشان دهنده وقوع تبلور مجدد دینامیکی می‌باشد)، قابل مشاهده است.

نابجایی‌ها^۱ [۲۸] و غیره نیز انجام شده است. از طرف دیگر توجه محققان همواره معطوف به سینتیک تبلور مجدد دینامیکی نیز بوده است [۲۸-۳۰]. با توجه به محاسبات مقاومت در برابر تغییر شکل، کسر حجمی تبلور مجدد دینامیکی دارای اهمیت قابل توجهی می‌باشد. جی و همکارانش [۳۱] یک روش مبتنی بر تحلیل نمودارهای تنش و کرنش حقیقی را برای اندازه‌گیری تبلور مجدد دینامیکی پیشنهاد کردند.

در این مقاله رفتار تغییر شکل گرم فولاد خط لوله با گرید API X70 به وسیله آزمون فشار گرم مدل‌سازی شده و در ادامه سینتیک تبلور مجدد دینامیکی آن با استفاده از روابط تجربی بررسی شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

ترکیب شیمیایی فولاد X70 استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ نشان داده شده است [۳۲]. نمونه‌های استوانه‌ای برای انجام آزمون فشار گرم با قطر ۱۰ میلی‌متر و طول ۱۵ میلی‌متر، از لوله اصلی با قطر خارجی ۱۴۲۲ میلی‌متر و ضخامت ۱۹/۸ میلی‌متر ماشین‌کاری شدند، به طوری که محور طولی آن‌ها موازی جهت نورد لوله می‌باشد. به منظور کاهش اثر اصطکاک بین دو انتهای نمونه‌ها با سطوح فک‌های دستگاه و ایجاد تغییر شکل همگن از چند ورق نازک تفلون استفاده شد.

آزمون فشار در محدوده دمایی ۹۵۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش‌های ۰/۱، ۰/۱ و ۱ بر ثانیه با استفاده از دستگاه فشار گرم زوییک/رول^۲ مجهز به یک کوره الکتریکی با دقت ± 5 درجه سانتی‌گراد انجام شد. در شکل ۱ برنامه‌های عملیات ترمومکانیکی اجرا شده نشان داده شده است.

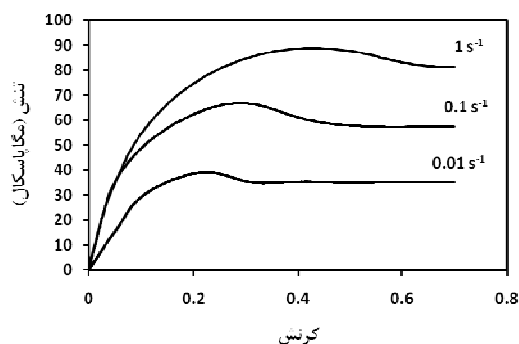
همان گونه که در این شکل مشخص است نمونه‌ها بعد از پیش گرم در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه که به منظور آستنیت شدن و اطمینان از حل شدن تمامی ذرات میکروآلیاژی انتخاب می‌شود [۸]، تا دماهای تغییر شکل سرد شده و پس از نگهداری به مدت ۵ دقیقه به منظور هم دما شدن نمونه‌ها، در دماهای ۹۵۰، ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه

1. Dislocation Density Model
2. Zwick/Roll

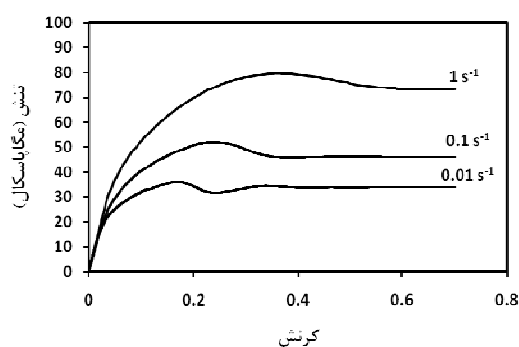
3. No-Recrystallization Temperature (T_{nr})

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد API X70 همراه با مقادیر حداکثر مورد نظر مطابق API 5L [۳۲]

Cu	V	Cr	Ni	Ti	Mo	Nb	Al	S	P	Si	Mn	C	عناصر آلیاژی
۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۱۸۷	۰/۰۱۸	۰/۲۴	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۱۵	۰/۰۰۸	۰/۲	۱/۵	۰/۰۵	درصد وزنی
-	-	-	-	۰/۰۶	-	-	-	۰/۰۱۵	۰/۰۲۵	-	۱/۴	۰/۲۴	حداکثر



ج- دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد



د- دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد

شکل ۲ منحنی‌های سیلان، نرخ کرنش‌های ۰/۱، ۰/۰۱ و ۱ بر ثانیه

در شکل ۳ نقاط مشخصه منحنی سیلان فولاد شامل تنش بحرانی (σ_c)، تنش حداکثر (σ_p) و تنش حالت پایدار (σ_{ss}) در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنش ۰/۱ بر ثانیه روی منحنی نرخ کارسختی-تنش (θ - σ) نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است نقطه عطف منحنی θ - σ (شکل ۳- الف) و یا نقطه کمینه منحنی $d\theta/d\sigma$ (شکل ۳- ب) در مقابل تنش قبل از تنش حداکثر، نشان دهنده تنش بحرانی برای شروع تبلور مجدد دینامیکی می‌باشد [۲۵].

۳-۱-۲- تعیین ثوابت کار گرم

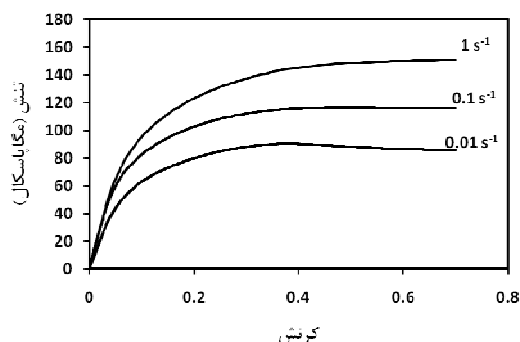
به منظور نشان دادن اثر نرخ کرنش و دمای تغییر شکل روی تنش سیلان می‌توان از پارامتر زرن-هولمن (Z) در رابطه (۲) استفاده کرد [۳۴].

با افزایش نرخ کرنش یا کاهش دمای تغییر شکل، تنش حداکثر کمتر قابل مشاهده است (شکل ۲- الف). در حالی که در دماهای تغییر شکل بالا و نرخ کرنش‌های پایین، تبلور مجدد دینامیکی متناوب (با چند نقطه حداکثر) دیده می‌شود (شکل ۲- د).

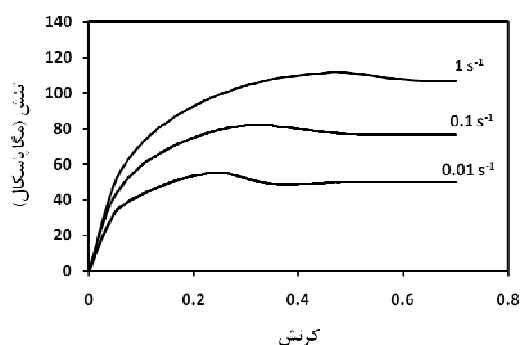
۳-۱-۱- تعیین نقاط مشخصه روی منحنی‌های سیلان

با استفاده از تحلیل‌های مبتنی بر نرخ کارسختی (θ)، نقاط مشخصه منحنی‌های سیلان ماده و شروع تبلور مجدد دینامیکی تعیین می‌شود. نرخ کارسختی را می‌توان از رابطه (۱) به دست آورد [۳۳].

$$\theta_i = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \bigg|_i = \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_{i-1}}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_{i-1}} \quad (1)$$



الف- دمای ۹۵۰ درجه سانتی گراد



ب- دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد

$$\ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} \right) = \ln A' + n' \ln \sigma_p \quad (6)$$

$$\ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} \right) = \ln A'' + \beta \sigma_p \quad (7)$$

$$\ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} \right) = \ln A + n [\ln \sinh(\alpha \sigma_p)] \quad (8)$$

با گرفتن مشتق جزئی از طرفین روابط (۶) تا (۸)، ثابت n' و β با استفاده از روابط (۹) تا (۱۱) تعیین می‌شوند.

$$n' = \left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sigma_p} \right]_T \quad (9)$$

$$\beta = \left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \sigma_p} \right]_T \quad (10)$$

$$n = \left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]} \right]_T \quad (11)$$

با توجه به روابط (۹) تا (۱۱) می‌توان ثابت‌های مذکور را از طریق رسم منحنی‌های مربوطه که در شکل ۴ نشان داده شده است، به دست آورد.

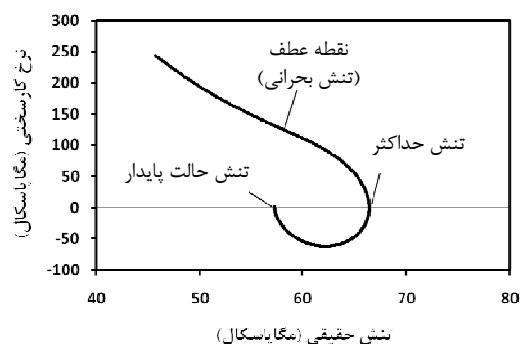
همان‌طور که مشخص است شیب منحنی $\ln \dot{\epsilon}$ در مقابل $\ln \sigma_p$ (شکل ۴-الف)، شیب $\ln \dot{\epsilon}$ در مقابل σ_p (شکل ۴-ب) و شیب $\ln \dot{\epsilon}$ در مقابل $\ln \{\sinh(\alpha \sigma_p)\}$ (شکل ۴-ج) به ترتیب برای محاسبه n' و β استفاده می‌شود. بر اساس مقادیر متوسط حاصل از رگرسیون خطی داده‌های تجربی، مقادیر n' و β به ترتیب برابر $5/886$ ، $0/092$ و $4/420$ به دست آمده است. ضمن این که برای محاسبه α از رابطه $\alpha = \beta/n'$ استفاده شده [۳۳] و مقدار $0/016$ برای آن به دست آمده است.

۳-۱-۳- تعیین انرژی فعال‌سازی

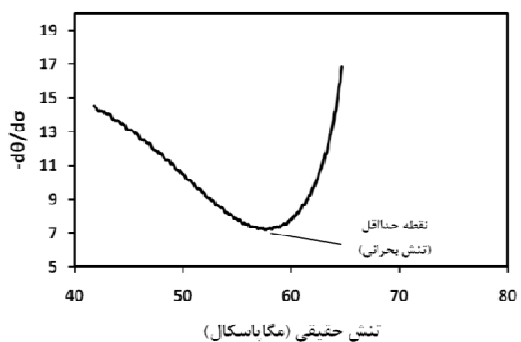
با گرفتن لگاریتم طبیعی از طرفین روابط (۳) تا (۵) و سپس مشتق جزئی از طرفین روابط حاصل (روابط (۶) تا (۸)) در نرخ کرنش ثابت، روابط (۱۲) تا (۱۴) به دست می‌آید.

$$Q = R n' \frac{\partial \ln(\sigma_p)}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)} \bigg|_{\dot{\epsilon}} \quad (12)$$

$$Q = R \beta \frac{\partial (\sigma_p)}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)} \bigg|_{\dot{\epsilon}} \quad (13)$$



(الف)



(ب)

شکل ۳ نقاط مشخصه منحنی سیلان فولاد در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنش ۰/۱ بر ثانیه

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

در این رابطه، Z پارامتر زهر-هولمن، Q انرژی فعال‌سازی (کیلوژول بر مول)، R ثابت عمومی گازها برابر $8/314472$ ژول بر کلوین بر مول، و T دمای مطلق می‌باشد. مطابق رابطه (۲)، مقدار Z ، در نرخ کرنش‌های بالاتر و دماهای تغییر شکل کمتر، بیشتر می‌باشد. ارتباط بین تنش حداکثر و Z عموماً به وسیله روابط (۳) تا (۵) که به ترتیب تحت عنوان روابط توانی، نمایی و سینوس هایپر بولیک نامیده می‌شوند، بیان می‌شود [۳۵].

$$Z = A' \sigma_p^{n'} \quad (3)$$

$$Z = A'' \exp(\beta \sigma_p) \quad (4)$$

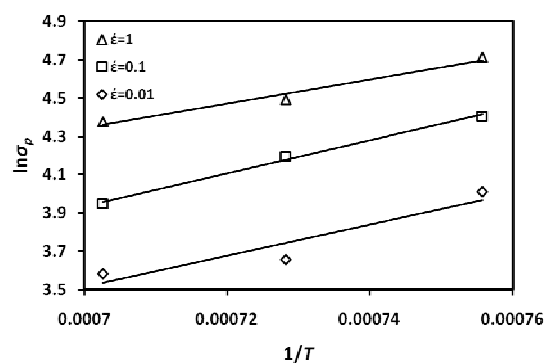
$$Z = A [\ln \sinh(\alpha \sigma_p)]^n \quad (5)$$

در روابط (۳) تا (۵) همان‌گونه که ذکر شد، Z پارامتر زهر-هولمن، σ_p تنش حداکثر و n' و β ثابت می‌باشند.

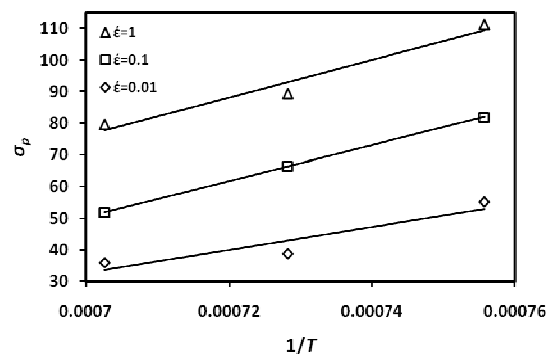
با قرار دادن رابطه (۲) در روابط (۳) تا (۵) و گرفتن لگاریتم طبیعی از دو طرف معادلات به دست آمده روابط (۶) تا (۸) به دست خواهند آمد.

مقادیر حاصل از رگرسیون خطی داده‌های تجربی، مقدار انرژی فعال‌سازی (Q) بر اساس روابط توانی، نمایی و سینوس هایپرولیک به ترتیب برابر ۳۷۶، ۳۸۸ و ۳۸۲ کیلوژول بر مول به دست می‌آید.

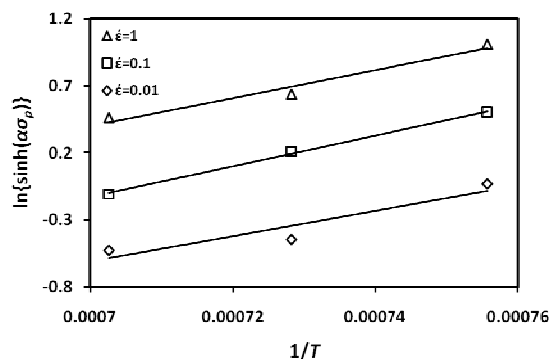
با تحلیل ضریب همبستگی (R^2) داده‌ها در شکل ۵، متوسط مقدار $R^2=0.949$ در شکل ۵-الف، $R^2=0.943$ در شکل ۵-ب و $R^2=0.952$ در شکل ۵-ج به دست می‌آید.



(الف)



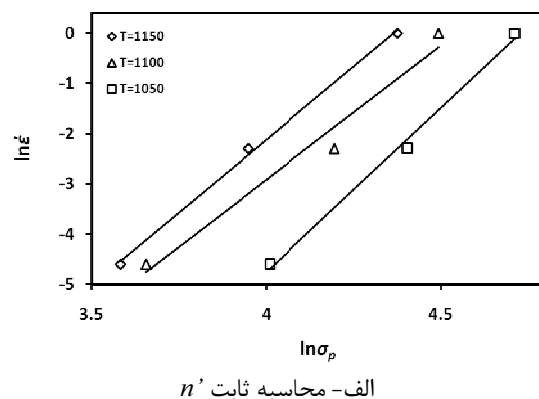
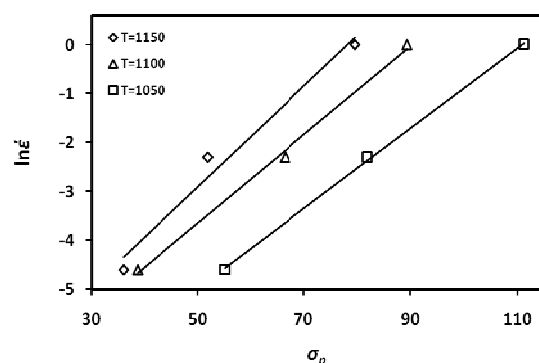
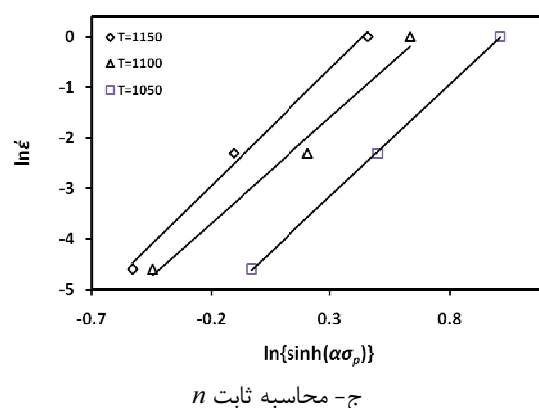
(ب)



(ج)

شکل ۵ داده‌های تجربی استفاده شده جهت محاسبه انرژی فعال‌سازی

$$Q = Rn \left. \frac{\partial [\ln \sinh(\alpha \sigma_p)]}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} \right|_{\dot{\epsilon}} \quad (14)$$

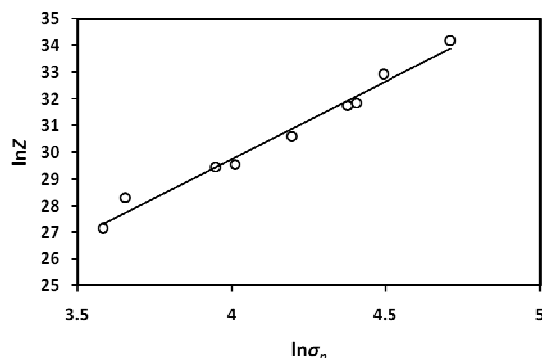

 الف- محاسبه ثابت n'

 ب- محاسبه ثابت β

 ج- محاسبه ثابت n

شکل ۴ داده‌های تجربی استفاده شده برای محاسبه ثابت‌های تغییر شکل گرم فولاد

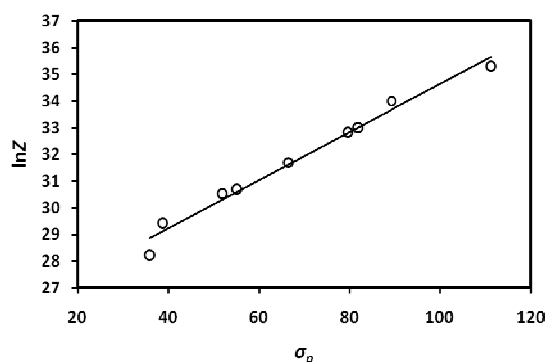
با رسم $\ln \sigma_p$ ، σ_p و $\ln \{\sinh(\alpha \sigma_p)\}$ بر حسب معکوس دمای مطلق (شکل ۵) و محاسبه میانگین شیب بر اساس

توسط جی و همکارانش [۳۱] استفاده شده و سپس با مقایسه نتایج حاصل با رابطه (۱۶)، ثابت‌های k و m تعیین شده است. مطابق این روش به منظور محاسبه X_R از رابطه (۱۷) استفاده شده است.

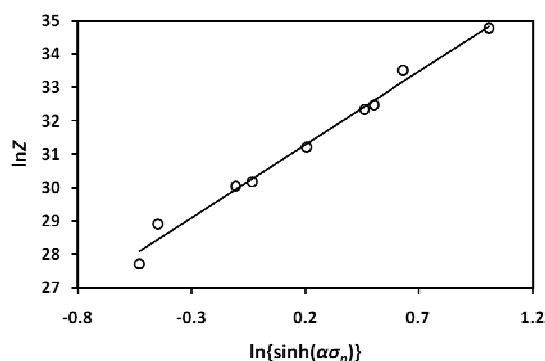
$$X_R = \frac{\sigma^2 - \sigma_{WR}^2}{\sigma_{DR}^2 - \sigma_{WR}^2} \quad (17)$$



الف - $R^2 = 0.981$ و $\ln Z = 5.804 \ln \sigma_p + 6.533$



ب - $R^2 = 0.980$ و $\ln Z = 0.09 \sigma_p + 25.63$



ج - $R^2 = 0.987$ و $\ln Z = 4.385 \ln \{\sinh(\alpha \sigma_p)\} + 30.40$

شکل ۶ داده‌های تجربی جهت به دست آوردن روابط مشخصه بین Z و تنش حداکثر به همراه مقادیر ضریب همبستگی (R^2)

با توجه به مقادیر مذکور مشخص می‌شود که رابطه سینوس هایپرولیک (رابطه (۱۴))، بهترین انطباق را با داده‌های آزمایشگاهی دارد (شکل ۵- ج با دارا بودن $R^2 = 0.952$).

بنابراین انرژی فعال‌سازی ۳۸۲ کیلوژول بر مول به دست آمده از رابطه مذکور به عنوان انرژی فعال‌سازی صحیح این کار گرم در نظر گرفته شد. مقایسه این مقدار با سایر نتایج آزمایشگاهی، به عنوان مثال مقدار ۳۷۹ کیلوژول بر مول برای فولاد API X70 در تحقیق الشهرانی [۳۶]، مقدار ۳۷۵ کیلوژول بر مول در تحقیق شبان [۳۷] و مقدار ۳۹۳ کیلوژول بر مول در تحقیق زو [۲۰]، تطبیق مناسبی را نشان می‌دهد.

۳-۴- ارتباط بین پارامتر Z و تنش حداکثر

به منظور بررسی ارتباط بین Z و تنش حداکثر، رابطه مشخصه بین آن‌ها بر اساس روابط (۳) تا (۵) و رسم $\ln Z$ در مقابل $\ln \sigma_p$ ، σ_p و $\ln \{\sinh(\alpha \sigma_p)\}$ (شکل ۶)، به دست آمده است.

بر اساس منحنی‌های رسم شده در شکل ۶، نمودار شکل ۶- ج بیشترین انطباق ضریب همبستگی با $R^2 = 0.987$ را نشان می‌دهد. بنابراین از رابطه به دست آمده در این شکل جهت استخراج رابطه مشخصه بین Z و تنش حداکثر استفاده می‌شود. رابطه (۱۵) این ارتباط را نشان می‌دهد.

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{382 \times 10^3}{RT}\right) = 1.59 \times 10^{13} \times [\sinh(0.016 \times \sigma_p)]^{4.385} \quad (15)$$

۳-۲- سینتیک تبلور مجدد دینامیکی

در حین تغییر شکل گرم، نابجایی‌ها به صورت پیوسته افزایش می‌یابند تا اینکه در یک کرنش مشخص به نام کرنش بحرانی، جوانه‌های تبلور مجدد دینامیکی شکل گرفته و در نزدیکی مرزهای دانه، مرزهای دوقلویی و باندهای تغییر شکل رشد می‌کنند [۳۸]. سینتیک تبلور مجدد دینامیکی با استفاده از رابطه (۱۶) تشریح می‌شود [۳۹].

$$X_R = 1 - \exp\left[(-k)\left(\frac{\epsilon - \epsilon_C}{\epsilon_C}\right)^m\right] \quad (16)$$

در این رابطه X_R کسر حجمی تبلور مجدد دینامیکی، k و m ثابت‌های مربوط به ماده و ϵ_C کرنش بحرانی می‌باشند. در این مقاله به منظور محاسبه X_R از روش معرفی شده

۴- نتیجه گیری

رفتار تغییر شکل گرم فولاد خط لوله با گرید API X70 به وسیله آزمون فشار گرم در محدوده دمایی ۹۵۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد و نرخ کرنشهای ۰/۱، ۰/۰۱ و ۱ بر ثانیه مدل سازی شده و سینتیک تبلور مجدد دینامیکی آن نیز با استفاده از روابط تجربی بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که:

۱- اغلب منحنی های تنش-کرنش فولاد API X70 بررسی شده در محدوده دماها و نرخ کرنش های به کار رفته در این تحقیق، دارای رفتار تبلور مجدد دینامیکی با یک تنش حداکثر و در ادامه کاهش در تنش تا رسیدن به تنش حالت پایدار می باشند. با این حال در شرایط تغییر شکل با دمای پایین و نرخ کرنش بالا (مانند ۹۵۰ درجه سانتی گراد و نرخ کرنش ۱ بر ثانیه) رفتار بازیابی دینامیکی و در شرایط تغییر شکل با دمای بالا و نرخ کرنش پایین (مانند ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد و نرخ کرنش ۰/۰۱ بر ثانیه) رفتار تبلور مجدد دینامیکی متناوب دیده می شود.

۲- پارامترهای مهم تبلور مجدد دینامیکی مانند کرنش بحرانی برای شروع تبلور مجدد دینامیکی (با استفاده از روش میرزاده و همکاران)، کرنش حداکثر، کرنش حالت پایدار، تنش بحرانی، تنش حداکثر و تنش حالت پایدار به وسیله داده های به دست آمده از تنش حقیقی-کرنش حقیقی و نرخ سخت کاری به دست آمده است.

۳- مقدار انرژی فعال سازی (Q) بر اساس روابط توانی، نمایی و سینوس هایپر بولیک به ترتیب برابر ۳۷۶، ۳۸۸ و ۳۸۲ کیلوژول بر مول به دست آمده است. با تحلیل ضریب همبستگی (R^2) داده ها، مشخص شد که رابطه سینوس هایپر بولیک، بهترین انطباق را با داده های آزمایشگاهی دارد. بنابراین انرژی فعال سازی ۳۸۲ کیلوژول بر مول به دست آمده از رابطه مذکور به عنوان انرژی فعال سازی صحیح کار گرم فولاد آزمایش شده در نظر گرفته شد.

۴- رابطه زیر می تواند به منظور تشریح ویژگی های تغییر شکل گرم فولاد API X70 مطالعه شده در این تحقیق، استفاده شود:

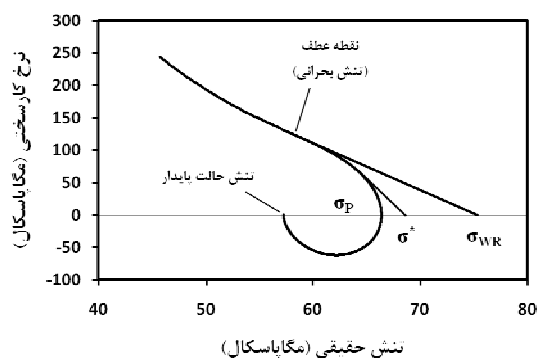
$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{382 \times 10^3}{RT}\right) = 1.59 \times 10^{13} \times [\sinh(0.016 \times \sigma_p)]^{4.385}$$

در این رابطه همان گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، σ_{WR} تنش حداکثر کار سختی و بازیابی دینامیکی، σ_{DR} (تنش حالت پایدار و σ تنش جاری بوده که به ترتیب ذیل تعیین می شود:

- در محدوده بین تنش بحرانی تا تنش حداکثر، تنش جاری در این محدوده که با σ^* مشخص شده است، با رسم خط مماس بر منحنی σ - θ به دست آمده است. به طوریکه تقاطع خط مماس رسم شده و محور σ به عنوان تنش جاری در نظر گرفته شده است. در این محدوده با افزایش تنش از تنش بحرانی تا تنش حداکثر، σ^* کاهش یافته و طبق رابطه (۱۷) کسر تبلور مجدد دینامیکی افزایش می یابد.

- در محدوده بین تنش حداکثر تا تنش حالت پایدار، از مقادیر واقعی تنش به دست آمده از آزمایش استفاده شده است. در این محدوده با کاهش تنش از تنش حداکثر تا تنش حالت پایدار، کسر تبلور مجدد دینامیکی افزایش می یابد. پس از تعیین کسر تبلور مجدد دینامیکی (X_R)، ثابت های k و m را می توان با تحلیل رگرسیون رابطه (۱۶) با استفاده از ϵ_C و X_R به دست آورد.

جدول ۲ تعدادی از این مقادیر را برای دماهای مختلف و نرخ کرنش ۰/۱ بر ثانیه نشان می دهد.



شکل ۷ منحنی نرخ کار سختی در مقابل تنش در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد و نرخ کرنش ۰/۱ بر ثانیه

جدول ۲ مقادیر k و m به دست آمده مربوط به رابطه (۱۶)

$T (^{\circ}C)$	$\dot{\epsilon} (s^{-1})$	k	m
۱۰۵۰	۰/۱	۱/۵۸۱	۰/۹۱۲
۱۱۰۰	۰/۱	۰/۸۲۵	۱/۶۹۳
۱۱۵۰	۰/۱	۱/۱۷۹	۱/۴۷۲

- J. A., "Thermomechanical Processing of Pipeline Steels with a Reduced Mn Content", *ISIJ International*, Vol. 49, 2009, pp. 284-292.
- [8] Mirzakhani B., Salehi M., Khoddam S., Seyedein S., Aboutalebi M., "Investigation of Dynamic and Static Recrystallization Behavior During Thermomechanical Processing in a API-X70 Microalloyed Steel", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 18, 2009, pp. 1029-1034.
- [9] Rakhshkhorshid M., Hashemi S.H., "Experimental study of hot deformation behavior in API X65 steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 573, 2013, pp. 37-44.
- [10] Tamura I., *Thermomechanical processing of high-strength low-alloy steels*: Butterworths, 1988.
- [11] Zeng Z., Chen L., Zhu F., Liu X., "Dynamic Recrystallization Behavior of a Heat-resistant Martensitic Stainless Steel 403Nb during Hot Deformation", *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 27, 2011, pp. 913-919.
- [12] Elwazri A.M., Wanjara P., Yue S., "Dynamic recrystallization of austenite in microalloyed high carbon steels", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 339, 2003, pp. 209-215.
- [13] Suh D.W., Cho J.Y., Nagai K., "Effect of Initial Grain Size of Austenite on hot-deformed structure of Ni-30Fe alloy", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 35, 2004, pp. 3399-3408.
- [14] Maropoulos S., Karagiannis S., Ridley N., "Factors Affecting Prior Austenite grain size in low alloy steel", *Journal of Materials Science*, Vol. 42, 2007, pp. 1309-1320.
- [15] Batte A.D., Edmonds D.V., Honeycombe R.W.K., *Strength of Metals and Alloys* Vol. 2: American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1970.
- [16] Dehghan-Manshadi A., Barnett M. R., Hodgson P. D., "Hot Deformation and Recrystallization of Austenitic Stainless Steel: Part II. Post-deformation Recrystallization", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 39, 2008, pp. 1371-1381.
- [17] F. Montheillet, *et al.*, "A grain scale approach for modeling steady-state discontinuous dynamic recrystallization," *Acta Materialia*, Vol. 57, 2009, pp. 1602-1612.
- [18] Wu L., Li X., Chen J., Zhang H., Cui Z., "Predicting Critical Conditions and Stress-Strain Curves for Dynamic Recrystallization in SPHC Steel", *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 17, 2010, pp. 51-57.
- [19] Lan L., Qiu C., Zhao D., Gao X., Du L., "Dynamic and Static Recrystallization Behavior of Low Carbon High Niobium Microalloyed Steel", *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 18, 2011, pp. 55-60.
- [20] Xu Y., Tang D., Song Y., Pan X., "Dynamic

۵- ثابت k و m رابطه زیر که به منظور تشریح سینتیک

تبلور مجدد دینامیکی استفاده می‌شود، با استفاده از تحلیل منحنی‌های تنش حقیقی- کرنش حقیقی، به دست آمده و در جدول ۲ داده شده است.

$$X_R = 1 - \exp\left[(-k)\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_C}{\varepsilon_C}\right)^m\right]$$

۵- تقدیر و تشکر

از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ در اختیار قرار دادن فولاد API X70 و از آقای مهندس مالدار در دانشگاه حکیم سبزواری (تربیت معلم سبزواری) جهت همکاری در انجام آزمون‌های فشار گرم تشکر می‌شود. هم‌چنین نویسنده اول از همکاری و راهنمایی علمی آقای دکتر مسعود رخس خورشید قدردانی و تشکر می‌نماید.

۶- مراجع

- [1] Han Y., Shi J., Xu L., Cao W.Q., Dong H., "Effects of Ti Addition and Reheating Quenching on Grain Refinement and Mechanical properties in low carbon medium manganese martensitic steel", *Materials and Design*, Vol. 34, 2012, pp. 427-434.
- [2] Mannucci G., Harris D., "Fracture Properties of API X100 Gas Pipeline Steels", European Commission, Brussels, Belgium Final Report, 2002.
- [3] Shanmugam S., Ramisetty N. K., Misra R. D. K., Hartmann J., Jansto S. G., "Microstructure and high strength-toughness combination of a new 700 MPa Nb-microalloyed pipeline steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 478, 2008, pp. 26-37.
- [4] Zhao M. C., Yang K., Shan Y. Y., "Comparison on strength and toughness behaviors of microalloyed pipeline steels with acicular ferrite and ultrafine ferrite", *Materials Letters*, Vol. 57, 2003, pp. 1496-1500.
- [5] Zhang J., Sun W., Sun H., "Mechanical Properties and Microstructure of X120 Grade High Strength Pipeline Steel", *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 17, 2010, pp. 63-67.
- [6] Dehghan-Manshadi A., Dippenaar R., "The Behavior of Precipitates during Hot-Deformation of Low-Manganese, Titanium-Added Pipeline Steels", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 41, 2010, pp. 3291-3296.
- [7] Schambron T., Phillips A. W., O'Brien D. M., Burg J., Pereloma E. V., Killmore C. C., Williams

- [30] Mirzadeh H., Najafizadeh A., "The rate of dynamic recrystallization in 17-4 PH stainless steel", *Materials & Design*, Vol. 31, 2010, pp. 4577-4583.
- [31] Ji G., Li F., Li Q., Li H., Li Z., "Research on the dynamic recrystallization kinetics of Aermet100 steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, 2010, pp. 2350-2355.
- [32] Hashemi S.H., Mohammadyani D., Pouranvari M., Mousavizadeh S.M., "On the Relation of microstructure and impact toughness characteristics of DSAW steel of grade API X70", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 32, 2009, pp. 33-40.
- [33] Mirzadeh H., Cabrera J.M., Prado J.M., Najafizadeh A., "Hot Deformation Behavior of a medium carbon microalloyed steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, 2011, pp. 3876-3882.
- [34] Zener C., Hollomon J.H., "Effect of Strain Rate Upon Plastic Flow of Steel", *Applied Physics*, Vol. 15, 1944, pp. 22-32.
- [35] Mirzadeh H., Najafizadeh A., Moazeny M., "Flow Curve Analysis of 17-4 PH Stainless Steel under Hot Compression Test", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 40, 2009, pp. 2950-2958.
- [36] Al Shahrani A., Yazdipour N., Dehghan-Manshadi A., Gazder A.A., Cayron C, Pereloma EV., "The effect of processing parameters on the dynamic recrystallisation behaviour of API-X70 pipeline steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 570, 2013, pp. 70-81.
- [37] Shaban M., Eghbali B., "Determination of critical conditions for dynamic recrystallization of a microalloyed steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, 2010, pp. 4320-4325.
- [38] Yang Z., Guo Y.C., Li J.P., He F., Xia F., Liang M.X., "Plastic deformation and dynamic recrystallization behaviors of Mg-5Gd-4Y-0.5Zn-0.5Zr alloy", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 485, 2008, pp. 487-491.
- [39] Cahn J.W., "The kinetics of grain boundary nucleated reactions", *Acta Metallurgica*, Vol. 4, 1956, pp. 449-459.
- recrystallization kinetics model of X70 pipeline steel", *Materials & Design*, Vol. 39, 2012, pp. 168-174.
- [21] Poliak E. I., Jonas J. J., "A one-parmenter approach to determining the critical conditions for the initiation of dynamic recrystallization", *Acta Materialia*, Vol. 44, 1996, pp. 127-136.
- [22] Poliak E. I., Jonas J. J., "Initiation of Dynamic Recrystallization in Constant Strain Rate Hot Deformation", *ISIJ International*, Vol. 43, 2003, pp. 684-691.
- [23] Najafizadeh A., Jonas J. J., "Predicting the Critical Stress for Initiation of Dynamic Recrystallization", *ISIJ International*, Vol. 46, 2006, pp. 1679-1684.
- [24] Cingara A., McQueen H. J., "New formula for calculating flow curves from high temperature constitutive data for 300 austenitic steels", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 36, 1992, pp. 31-42.
- [25] Mirzadeh H., Najafizadeh A., "Prediction of the critical conditions for initiation of dynamic recrystallization", *Materials & Design*, Vol. 31, 2010, pp. 1174-1179.
- [26] Momeni A., Dehghani K., Ebrahimi G. R., "Modeling the initiation of dynamic recrystallization using a dynamic recovery model", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, 2011, pp. 9387-9393.
- [27] Barnett M. R., Kelly G. L., Hodgson P. D., "Predicting the critical strain for dynamic recrystallization using the kinetics of static recrystallization", *Scripta Materialia*, Vol. 43, 2000, pp. 365-369.
- [28] Gottstein G., Frommert M., Goerdeler M., Schäfer, N., "Prediction of the critical conditions for dynamic recrystallization in the austenitic steel 800H", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 387-389, 2004, pp. 604-608.
- [29] Jonas J. J., Quelennec X., Jiang L., Martin É., "The Avrami kinetics of dynamic recrystallization", *Acta Materialia*, Vol. 57, 2009, pp. 2748-2756.