



پیش‌بینی رفتار تغییرشکل گرم فولاد ضدزنگ 304 با استفاده از معادله رفتاری جانسون-کوک

حمیدرضا رضایی آشتیانی^{*1}، میثم محمدی²

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

* اراک، دانشگاه صنعتی اراک، 1177-38135. hr_rezaei@arakut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 مهر 1400

داوری اولیه: 3 آذر 1400

پذیرش: 2 اسفند 1400

کلیدواژه‌ها:

معادله رفتاری

پیچش گرم

جانسون-کوک

فولاد ضد زنگ 304

تنش سیلان

رفتار تغییر شکل گرم مواد به دلیل وابستگی به تغییرات کرنش، نرخ کرنش و دما دارای پیچیدگی قابل ملاحظه‌ای است. بنابراین پیش-بینی رفتار ماده در این شرایط پر اهمیت است. برای پیش‌بینی رفتار تغییر شکل مواد در دمای بالا، معادلات رفتاری مختلفی توسعه داده شده است که یکی از مهم‌ترین آنها معادله رفتاری جانسون-کوک می‌باشد. به منظور توسعه معادله رفتاری مناسب جهت پیش‌بینی دقیق رفتار ماده از تست‌های مختلفی همچون کشش، فشارگرم و همچنین پیچش دما بالا استفاده می‌شود. تست پیچش به دلیل عدم محدودیت اصطلاحی، قابلیت اعمال تغییر شکل یا کرنش‌های خیلی بالاتری را نسبت به تست‌های فشار و کشش داراست. لذا در این تحقیق به بررسی رفتار کارگرم فولاد ضدزنگ آستنیتی 304 با استفاده از تست پیچش گرم پرداخته شده و معادله رفتاری جانسون-کوک مناسب برای آن توسعه داده شده است. برای این منظور آزمایشات در محدوده دمایی 800-1000 درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش 0/001-1 بر ثانیه و در کرنش‌های بالا تا حدود 3 انجام شد. بررسی نتایج نشان داد که با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش تنش سیلان شارش بطور محسوسی کاهش می‌یابد. در مکان‌هایی از قطعه که کرنش به اندازه کافی اعمال شده است و دمای تغییرشکل بالاست، تبلور مجدد دینامیکی در ریز ساختار مشاهده می‌گردد، در حالیکه به دلیل اختلاف کرنش در طول شعاع نمونه، ریز ساختار قطعه تغییرشکل داده شده در طول شعاع نایکنواخت می‌باشد. معادله جانسون-کوک توسعه یافته با نتایج تجربی مقایسه شد که ملاحظه شد از دقت قابل قبولی در پیش‌بینی رفتار تغییرشکل گرم فولاد مورد بررسی برخوردار است.

Prediction of hot deformation behavior of 304 stainless steel using Johnson-Cook equation

Hamid Reza Rezai Ashtiani^{*}, Meysam Mohammadi

Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

* P.O.B. 38135-1177, Arak, Iran, Hr_Rezaei@arakut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 22 October 2021 First

Decision: 24 November 2021

Accepted: 21 February 2022

Keywords:

Constitutive equation

Hot torsion

Johnson-Cook

304 Stainless steel

Flow stress

Abstract

The hot deformation behavior of materials has considerable complexity due to its dependence on the strain, strain rate, and temperature changes. Therefore, the prediction of material behavior is very important in these conditions. Various constitutive equations have been developed to predict the deformation behavior of materials at elevated temperatures, one of the most important of which is the Johnson-Cook equation. To develop a suitable constitutive equation that can accurately predict the behavior of the material, various tests such as tensile, compressive, and torsion tests are used. Due to the lack of frictional limitation, the torsion test can apply much higher deformation or strain than the compression and/or tensile tests. Therefore, in this study, the hot working behavior 304 austenitic stainless steel was investigated using the hot torsion test and the Johnson-Cook constitutive equation was developed for it. For this purpose, experiments have been performed at the temperature range of 800-1000°C and strain rate of 0.001-1 s⁻¹ and high strain up to about 3. The results showed that flow stress decreases significantly with increasing temperature and decreasing strain rate. In places where the strain is sufficiently applied and the deformation temperature is high, dynamic recrystallization is observed in the microstructure while due to the strain difference along the sample radius, the microstructure of the deformed part is not uniform along the radius. The developed Johnson-Cook equation was compared with the experimental results which were observed to have acceptable accuracy in predicting the hot deformation behavior of the studied steel.

1- مقدمه

گروه 300 اشاره کرد که عموماً دارای شکل‌پذیری خوبی هستند. این گروه از فولادها دارای مقاومت به خوردگی و چقرمگی بالایی می‌باشند و رایج‌ترین نوع فولادهای ضدزنگ هستند. فولادهای ضدزنگ آستنیتی قابلیت شکل‌پذیری خوبی دارند و استحکام

فولادهای ضد زنگ، آلیاژهای پایه آهنی هستند که دارای عنصر کروم با درصد وزنی بالای 10/5 درصد هستند [1]. گروه‌های مختلفی از فولاد ضد زنگ وجود دارد که از جمله آن می‌توان به

Please cite this article using:

H. R. Rezai Ashtiani, M. Mohammadi, Prediction of hot deformation behavior of 304 stainless steel using Johnson-Cook equation, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 12, pp. 34- 43, 2022 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

به عنوان تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما تعریف می‌نماید. مدل‌های رفتاری دارای ثوابتی می‌باشند که با تعیین آن‌ها می‌توان رفتار دینامیکی مواد را پیش‌بینی کرد، که برای یافتن این ثوابت و توسعه معادلات رفتاری می‌توان از تست‌های نظیر تست کشش، فشار و پیچش و... استفاده نمود [7].

با توجه به اهمیت کارگرم و معادلات رفتاری پژوهش‌ها و تست‌های مختلفی در زمینه ریز ساختار انجام شده و معادلات رفتاری متعددی برای مواد مختلف ارائه شده‌است که در ادامه به برخی از این تحقیقات اشاره می‌شود [3-5]. احمدی و همکارانش به بررسی رفتار شارش داغ فولاد میکرو-آلیاژی L80 با استفاده از مدل جانسون-کوک اصلاح‌شده با استفاده از آزمون‌های فشار داغ در دماهای 900-1100 درجه سانتی‌گراد و نرخ‌های کرنش 0/001-1 بر ثانیه پرداختند و پیش‌بینی تنش شارش با استفاده از مدل توسعه داده شده آنها تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت [6]. هونگ و همکارانش به ارائه یک مدل اصلاح شده جانسون-کوک برای توصیف رفتار فولاد T24 تحت تست پیچش گرم در دماهای 1050-1200 درجه سانتی‌گراد و در نرخ کرنش‌های 0/001، 0/01 و 10 بر ثانیه پرداخته‌اند. نتایج بررسی آنها نشان داد که تنش پیش‌بینی شده توسط مدل ارائه شده آنها به خوبی با نتایج تجربی مطابقت دارد [8]. مورسان و همکارانش به مطالعه فولاد AISI 1045 تحت پیچش گرم پرداخته‌اند. هدف از تحقیق آنها فرموله کردن یک مدل تنش جریان مناسب برای توصیف رفتار شارشی فولاد کربن متوسط AISI 1045 در محدوده دمایی 950-650 درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش 0/5 تا 1 بر ثانیه بود که بدین منظور معادله رفتاری جانسون-کوک برای مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار شارش ماده در دمای بالا به کار گرفته شد [9]. کورکوماز و همکارانش معادله جانسون-کوک را برای فولاد ضد زنگ فریتی AISI 430 با استفاده از آزمایش کشش گرم توسعه دادند. آنها گزارش کردند که با مقایسه داده‌های تجربی و نتایج پیش‌بینی، انحراف تخمین پایین 3/17 درصد وجود دارد [10]. در پژوهشی دیگر توسط دهقان و همکارانش روی فولاد 304، تحت تست پیچش گرم در دمای ثابت 900 درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ثابت 0/01 بر ثانیه رفتار تبلور مجدد دینامیکی بررسی شد. نتایج نشان داد رشد دانه نقش مؤثری در نرم شدن ماده پس از تغییر شکل یک ریز ساختار تغییر شکل یافته دارد. این نقش با افزایش فشار ماده تغییر شکل یافته گرم، افزایش یافت [11]. سومانترا ماندال و همکارانش به بررسی رفتار کارگرم فولاد ضدزنگ AISI 304L با استفاده از تست پیچش گرم در گستره دمایی

آنها در دماهای بالا نیز حفظ می‌شود. به دلیل نیمه پایدار بودن فاز آستنیت، با انجام کارسختی بر روی این فولادها، بر اساس درصد عناصر آلیاژی و ترکیب شیمیایی آنها، درصدی از ساختار به مارتزیت تبدیل خواهد شد. یکی از پرکاربردترین فولادهای این گروه فولاد 304 می‌باشد که در تجهیزات نیروگاهی، بویلرها، صنایع هوایی، کشتی‌سازی، لوازم بیمارستانی، خودروسازی، ساخت قالب، تجهیزات قابل جوشکاری، مبدل‌ها، خطوط لوله، تجهیزات تحت فشار و راکتورهای هسته‌ای و ... استفاده می‌شود [2].

فرایندهای شکل‌دهی گرم فلزات در صنعت از اهمیت زیادی برخوردار است بطوری که بیش از 80 درصد محصولات فلزی حداقل یکبار فرایند کارگرم را در حین تولید تجربه می‌کنند. کارگرم فلزات وابسته به جنس مورد بررسی در محدوده دمایی بین 0/5-0/9 دمای ذوب و تحت تغییر شکل‌های بزرگ در نرخ کرنش‌های مختلف انجام می‌شود. از این رو در فرایندهای شکل‌دهی گرم فلزات مانند: فرایندهای آهنگری، نورد و اکستروژن، مواد از خود رفتارهای پیچیده‌ای نشان می‌دهند. در نتیجه بررسی رفتار تغییر شکل فلزات در دماهای بالا و پیش‌بینی رفتار سیلان مواد دارای اهمیت زیادی است با توجه به اینکه انجام آزمایش‌های تجربی هزینه زیادی را تحمیل می‌کند طبیعتاً ارائه معادلات رفتاری مناسب حاکم بر ماده و استفاده از آنها در نرم افزارهای تحلیلی مناسب از دیدگاه اقتصادی اهمیت زیادی دارد و هزینه محققان را کاهش می‌دهد. در سال‌های اخیر محققان زیادی به ارائه و توسعه مدل‌های مختلف رفتاری به منظور پیش‌بینی رفتار سیلان فلزات و آلیاژها در فرایندهای شکل‌دهی گرم پرداخته‌اند [3-5]. علی‌رغم روش‌های صرفاً تجربی که با آزمایش نتایج حاصل می‌شود؛ مانند: تست فشار، کشش، پیچش و هاپکینسون، مدل‌های رفتاری مختلفی جهت توصیف رفتار سیلان مواد پیشنهاد شده است. که شامل مدل‌های پدیدار شناختی¹، مدل‌های فیزیکی² و مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی³ و ... است [6]. یکی از معادلات رفتاری مناسب جهت پیش‌بینی رفتار مواد در دمای بالا، معادله جانسون-کوک می‌باشد که این مدل اغلب در نرم افزارهای شبیه‌سازی نیز به کار گرفته می‌شود. این مدل توسط جانسون-کوک در سال 1983 ارائه شده است. مدل جانسون-کوک به دلیل سادگی و دقت بالا در تعیین رفتار تنش‌های سیلان پیچیده دما بالا کاربرد زیادی پیدا کرده است و تنش سیلان را

¹ Phenomenological model

² Physical based model

³ Artificial neural network (ANN) model

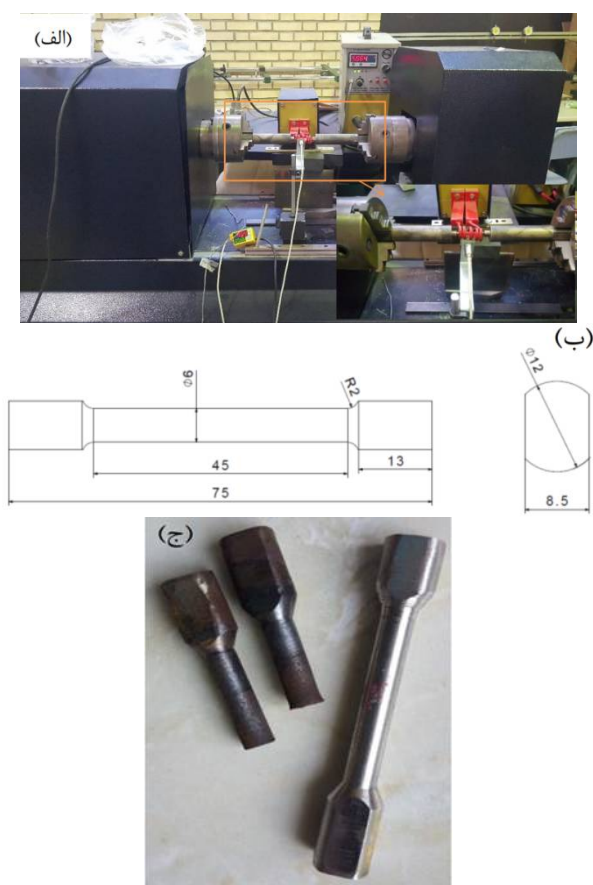


Fig. 1 Experimental set-up. (a) Test machine; (b) Dimensions of the test specimen according to ASTM E8 standard; (c) test specimen
شکل 1 الف) دستگاه آزمون پیچش، ب) ابعاد نمونه آزمون براساس استاندارد ASTM E8 و ج) تصویر نمونه آزمون

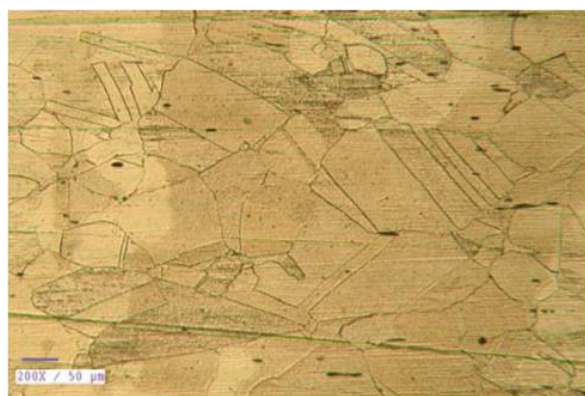


Fig. 2 Microstructure of AISI 304 austenitic stainless steel before hot torsion test.

شکل 2 تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه اولیه فولاد 304.

آزمایش‌ها در محدوده دمای 800-1000 درجه سانتی‌گراد و سرعت دورانی 0/028، 0/28، 2/8 و 28 دور بر دقیقه در محدوده نرخ کرنش بین 1-0/001 بر ثانیه انجام و نتایج حاصل از انجام آزمایشات تجربی ثبت گردید. در هر آزمایش پس از قرار گیری نمونه‌ها در گیره‌های دستگاه، گرمایش نمونه توسط کوپل

600 تا 1200 درجه سانتی‌گراد با فاصله‌های 100 درجه سانتی‌گراد و در نرخ کرنش های 0/1-100 بر ثانیه پرداخته‌اند و مدلی براساس شبکه‌های عصبی مصنوعی، ارائه کردند. این مدل توانست به وسیله الگوریتم ژنتیک ارزیابی مناسبی از رفتار فولاد ارائه دهد [12].

به دلیل کاربردهای ویژه فولاد ضدزنگ 304 و اهمیت پیش‌بینی رفتار کار گرم این فولاد در گستره های مختلف دمایی، کرنشی و نرخ کرنش در این مقاله، به بررسی رفتار کارگرم این فولاد ضدزنگ در گستره های مناسب دما، کرنش و نرخ کرنش با استفاده از تست پیچش گرم به واسطه امکان دستیابی به کرنش‌های بالاتر نسبت به تست‌هایی نظیر کشش و ریز فشار پرداخته شده است، پس از بررسی تنش سیلان و ریز ساختار قطعات تغییرشکل داده شده داغ، معادله رفتاری جانسون-کوک مناسب جهت پیش‌بینی رفتار کار گرم فولاد 304 توسعه داده می‌شود.

2- روش تحقیق

فولاد ضدزنگ 304 یکی از پرکاربردترین فولادها در صنایع مختلف می‌باشد. برای انجام آزمایش‌ها از نمونه‌های فولاد 304 آهنگری شده مطابق با ابعاد نشان داده شده در شکل 1-الف و براساس استاندارد ASTM E8 استفاده شد. مشخصات ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول 1 ارائه شده است.

آزمایش‌ها توسط دستگاه آزمایش پیچش که از دو فک که یکی ثابت و دیگری متحرک می‌باشد تشکیل شده است این دستگاه مجهز به گشتاور سنجی با ظرفیت 500 نیوتن بر متر با دقت یک صدم نیوتن بر متر می‌باشد و دارای هیدرو موتور با امکان انجام 100 دور بردقیقه است. تصویر مربوط به دستگاه آزمایش پیچش در شکل 1-الف نشان داده شده است.

جدول 1 درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده فولاد 304.

Table 1 Chemical composition of AISI 304 austenitic stainless steel (wt. %).

عناصر	درصد وزنی (%)
Fe	71/52
C	0/024
Mn	1/43
Si	0/38
Co	0/07
Cr	18/21
Cu	0/15
Ni	8/11
دیگر	0/109

مقادیر تنش ثابت شده در سایر نمودارهای کمتر می‌باشد. همچنین بیشترین مقدار کرنش در دمای 800 درجه سانتی‌گراد مطابق شکل حدود 1/6 حاصل شده است. در دمای 900 درجه سانتی‌گراد، بیشترین تنش در نرخ کرنش 1 بر ثانیه و در حدود 380 مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. در این شرایط تست نیز نمونه تا کرنش حدود 1/8 در برابر تغییرشکل مقاومت کرده و پس از این مقدار کرنش دچار شکست می‌شود.

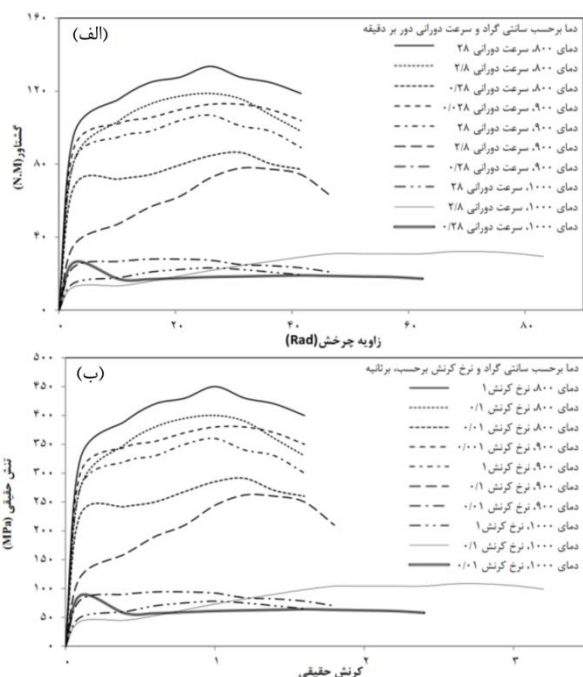


Fig. 3 Curves hot torsion test of AISI 304: a) Torque - Rotation angle b) True stress - True strain

شکل 3 نمودارهای حاصل از آزمون پیچش گرم فولاد زنگ نزن 304 (الف) گشتاور زاویه پیچش و (ب) تنش-کرنش

بررسی نتایج تست‌ها پیچش نشان می‌دهد که برای نمونه‌ای در دمای تغییر شکل 1000 درجه سانتی‌گراد، به حداکثر تنشی برابر 108 مگاپاسکال نیاز است و نمونه تا مقدار کرنش حدود 3/2 می‌رسد. همان‌طور که ملاحظه شد برخی منحنی‌های تنش-کرنش رفتار تبلور مجدد دینامیکی را از خود نشان می‌دهند یعنی دارای یک نقطه اوج یا قله بوده و پس از این اوج تنش سیلان کاهش می‌یابد که در ادامه بررسی‌های ریز ساختاری این نتایج تجربی سیلان را تایید کرد همان‌طور که در بررسی دیگر محققان نیز وجود داشته است [13, 14]. با توجه به منحنی‌های ترسیم شده ملاحظه می‌شود که با افزایش دمای تغییرشکل تنش قابل تحمل قطعه کاهش و نیز با افزایش نرخ کرنش تنش قابل تحمل قطعه افزایش یافته است. با دقت در

القایی آبرگرد از جنس مس انجام شد. دما در سطح قطعه و توسط دماسنج لیزری در هر لحظه اندازه‌گیری و ثبت شد. محدوده این دماسنج از صفر تا هزار درجه سانتی‌گراد و دقت آن یک درجه سانتی‌گراد است. همچنین گشتاورسنجی که به فک ثابت دستگاه متصل است اطلاعات مربوط به گشتاور را در هر لحظه ثبت می‌نماید. جهت اطمینان از نتایج حاصل شده آزمایش‌ها در برخی دماها و نرخ کرنش‌ها چندین بار تکرار و میانگین نتایج استفاده شده است. به منظور حفظ ریزساختار قطعه تغییرشکل داده شده نمونه‌های آزمایش شده در شکل 1 (ج) بلافاصله از دمای آزمایش تا دمای محیط در آب سرد می‌شوند. مقطع شکست قطعات صرف نظر از دما و نرخ کرنش در به صورت عمود بر محور نمونه آزمایش و مطابق شکل 1-ج می‌باشد. بعد از انجام آزمایش‌ها زاویه و گشتاورهای بدست آمده از آزمایش را با استفاده از روابط (1) و (2) به تنش و کرنش تبدیل می‌شود [13, 14].

$$\sigma = \frac{3.3\sqrt{3T}}{2\pi rR^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\theta R}{\sqrt{3}L} \quad (2)$$

که در این روابط، T گشتاور، R شعاع نمونه، θ زاویه پیچش و L طول نمونه تست می‌باشد.

3- نتایج و بحث

3-1-3- منحنی‌های سیلان

نمودارهای تنش-کرنش بدست آمده از نتایج تست پیچش گرم در دماها و نرخ‌های کرنش مختلف برای فولاد ضدزنگ 304 در شکل 3 نمایش داده شده است.

برای بررسی دقیق اثر پارامترهای مختلف دما و نرخ تغییرشکل و مقایسه نتایج با یکدیگر؛ تمامی منحنی‌های زاویه چرخش-گشتاور و تنش-کرنش حاصل از آزمایش‌های پیچش گرم نمونه‌ها در یک نمودار ارائه شده است. همان‌طور که در شکل 3 الف مشاهده می‌شود نتایج با در نظر گرفتن سه سرعت دورانی 0/28، 2/8، 28 دور بر دقیقه و سه دمای 800 و 900 و 1000 درجه سانتی‌گراد و برای شکل 3-ب نیز سه نرخ کرنش مختلف 0/01، 0/1، 1 بر ثانیه و تکرار آن برای دماهای مختلف 800، 900، 1000 درجه سانتی‌گراد در قالب یک مجموعه نمودار ترسیم شده است. بررسی نمودارهای این شکل نشان می‌دهد که در تغییرشکل گرم فولاد ضدزنگ 304 در دمای 800 درجه سانتی‌گراد، بیشترین تنش برای نرخ کرنش 1 بر ثانیه، ثبت شده است که در حدود 440 مگاپاسکال می‌باشد و

دوقلویی‌ها نیز در نمونه افزایش پیدا می‌کنند [13، 14]. همچنین می‌توان مشاهده کرد که فراتر از کرنش بحرانی، دانه‌های تبلور مجدد در ریز ساختار نمونه ظاهر شده و مقدار چگالی آن‌ها با افزایش کرنش افزایش یافته است. بنابراین بررسی نتایج ریز ساختار فولاد تغییرشکل داده شده گرم نتایج منحنی‌ها تنش-کرنش را به درستی توجیه و وجود تبلور مجدد دینامیکی در ریز ساختار را تایید می‌کند. با دقت در تصاویر شکل های 5- الف، ب و ج مشاهده شد که اندازه دانه به ترتیب 25، 15، 10 میکرون است. نمونه‌هایی از نقاط تبلور مجدد در شکل های 4 و 5 با فلش نشان داده شده است.

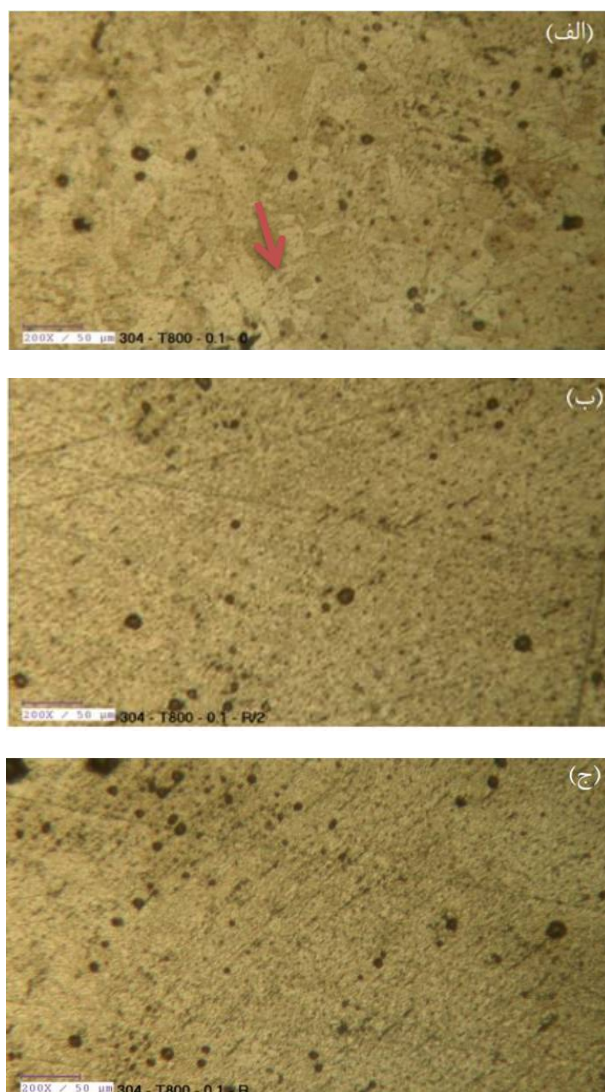


Fig. 4 Microstructure of AISI 304 at 800 ° C and with a strain rate of 0.1 S-1 in: (a) center; (b) R/2; (c) R.

شکل 4 تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فولاد 304 بعد از آزمون پیچش گرم در دمای 800 درجه سانتی‌گراد و با نرخ کرنش 0/1 بر ثانیه در (الف) مرکز، (ب) R/2 و (ج) R

نمودار تنش-کرنش در دمای 1000 درجه سانتیگراد و نرخ کرنش 0/01 بر ثانیه برای فولاد مورد آزمایش تبلور مجدد قطعه در حین تست و ایجاد قله در نمودار و سپس فرود مشاهده می‌شود در سایر نمودارها عموماً روند نمودار صعودی است و می‌تواند گواه بر انجام فرایند بازیابی در حین تغییر شکل گرم این فولاد در این شرایط باشد [15].

همان‌طور که مشخص است مقدار کرنش اعمالی به قطعه در اثر تغییرشکل پیچشی در طول شعاع نمونه ثابت نمی‌باشد بلکه از مقدار صفر در نقطه مرکز نمونه تست پیچش تا مقدار حداکثر کرنش در سطح نمونه پیچیده شده تغییر می‌کند، که این تغییرات کرنشی مستقل از دما و نرخ تغییرشکل یا کرنش اعمالی در حین تست پیچش می‌باشد. تصاویر ریز ساختار فولاد 304 پس از تست پیچش گرم در شکل‌های 4 و 5 آورده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود ریز ساختار قطعه تغییر شکل داده شده اندازه دانه کوچک‌تری نسبت به ریز ساختار اولیه قطعه قبل از تغییرشکل دارد. مشاهده می‌شود که در بسیاری از مناطق مستعد برای تشکیل جوانه‌های حاصل از تبلور مجدد (مانند نواحی برخورد سه مرز دانه) دانه‌های ریزی وجود دارد. با توجه به این که نمونه‌ها بلافاصله پس از بار برداری در آب سرد کوئنچ شده‌اند و زمان کافی برای تبلور مجدد استاتیکی به قطعات داده نشده است وجود این دانه‌های ریز که در ریز ساختار دیده می‌شود نشانگر وقوع مقدار زیادی از تبلور مجدد دینامیکی در طول انجام تغییر شکل می‌باشد. جهت بررسی بهتر، تصاویر ریزساختار در سه نقطه و در فواصل مشخص از مرکز نمونه تغییرشکل داده شده در نرخ کرنش 0/1 بر ثانیه و دو دمای تغییرشکل 800 درجه سانتی‌گراد در شکل 4 و دمای تغییرشکل 900 درجه سانتی‌گراد در شکل 5 نشان داده شده است. با شعاع R برای نمونه شده در سطح جدایش و یا سطح وسط نمونه تست پیچش، تصاویر ریزساختار در قسمت الف تا ج شکل‌های 4 و 5، به ترتیب مربوط به مرکز نمونه در $R=0$ در فاصله R/2 از مرکز نمونه و در فاصله R از مرکز نمونه ثبت شده است.

همان‌طور که از مقایسه شکل های 4 و 5 ملاحظه می‌گردد با افزایش دمای تغییرشکل اندازه دانه‌ها بطور کلی و مستقل از فاصله از مرکز افزایش می‌یابد. آنچه از بررسی ریزساختارها مشخص است در مسیر شعاع R هرچه از مرکز نمونه‌های مورد تست به سطح خارجی نمونه حرکت می‌شود مقدار دوقلویی‌های در داخل ریزساختار افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش کرنش اعمال شده تعداد

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 - C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [(1 - (T^*)^m)] \quad (3)$$

در رابطه (3)، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش مؤثر، $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع، T^* برابر با $\frac{T-T_r}{T_m-T_r}$ می‌باشد که در آن T_m دمای ذوب و T_r دمای مرجع یا همان دمایی که ثوابت معادله جانسون-کوک در آن دما استخراج شده است و T دمای ماده حین تغییر شکل می‌باشند. ضرایب A ، B ، n و C نیز ثوابت مادی این مدل رفتاری می‌باشند که A معرف تنش تسلیم، B و n بیانگر اثر سخت شوندگی کرنشی، ثابت C معرف اثر نرخ کرنش و ثابت m نشان دهنده ارتباط دمایی می‌باشند. در رابطه جانسون-کوک مقدار A برابر است با مقداری که به ازای آن کرنش در نرخ کرنش مرجع، برابر با صفر می‌باشد. بنابراین مقدار ثوابت n و B تعیین می‌شود [16]. با ترسیم منحنی تنش-کرنش ماده و با استفاده از شیب و عرض از مبدا نمودار، ثوابت B و n بدست می‌آید. در این محاسبات نرخ کرنش مرجع برای فولاد 304 برابر با 1 بر ثانیه و دمای مرجع 800 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه A معرف تنش تسلیم می‌باشد مقدار آن برای فولاد 304 برابر با 210 مگاپاسکال در محاسبات نظر گرفته شد. نمودار شکل 6 در شرایط نرخ کرنش و دمای مرجع ترسیم شده است. با توجه به این نمودار مقدار B برابر است با 508 مگاپاسکال و مقدار n برابر 0/63 بدست می‌آید. برای تعیین ثابت C ، مدل جانسون-کوک که با رسم منحنی $\frac{\sigma}{A+B\varepsilon^n}$ بر حسب $\ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)$ در نرخ کرنش‌های متفاوت و دمای مرجع می‌توان این ثابت C را با توجه به شیب نمودار شکل 7 تعیین کرد. که با توجه به نمودار مقدار 0/0261 بدست می‌آید.

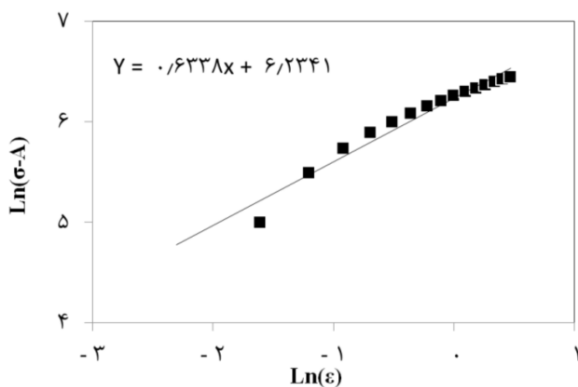


Fig. 6 Relationship between $\ln(\sigma-A)$ and $\ln(\dot{\varepsilon})$ under the reference conditions.

شکل 6 نمودار $\ln(\sigma-A)$ بر حسب $\ln(\dot{\varepsilon})$ فولاد 304 در نرخ و دمای مرجع.

در نهایت با رسم نمودار $\ln T^*$ و $\ln \left(1 - \frac{\sigma}{A+B\varepsilon^n} \right)$ در نرخ کرنش مرجع و دماهای 900 و 1000 درجه سانتی‌گراد مقدار

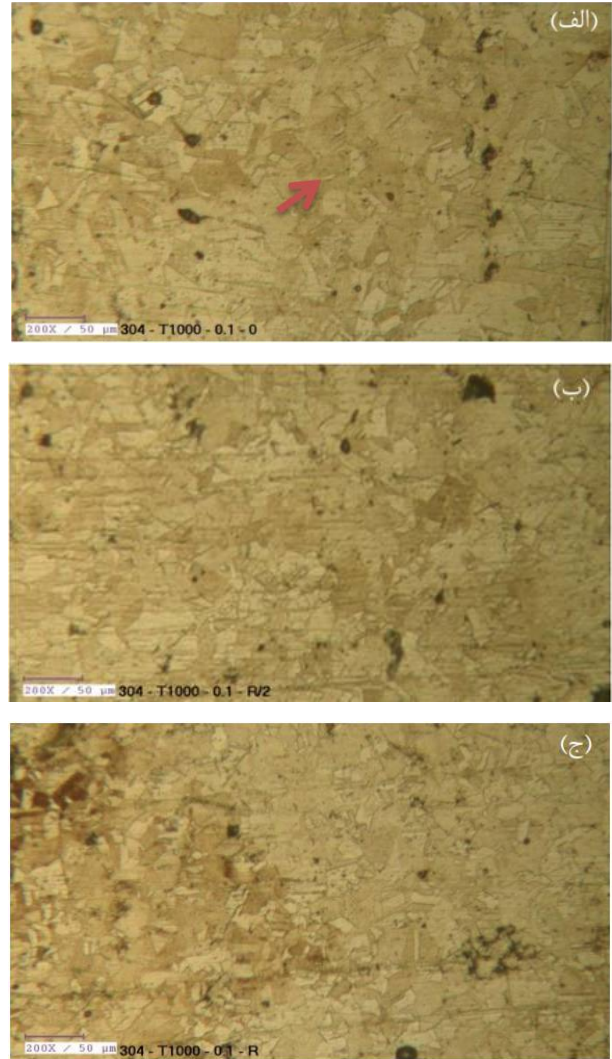


Fig. 5 Microstructure of AISI 304 at 1000 ° C and with a strain rate of 0.1 S-1 in: (a) center; (b) R/2; (c) R.

شکل 5 تصویر میکروسکوپ نوری فولاد 304 بعد از آزمون پیش‌گرم گرم در دمای 1000 درجه سانتی‌گراد و با نرخ کرنش 0/1 بر ثانیه در الف) مرکز، ب) R/2 و ج) R

3-2- توسعه معادلات رفتاری

در رابطه (3)، معادله جانسون-کوک جهت پیش‌بینی رفتار کارگرم فولاد آورده شده است، همان‌طور که مشخص است قسمت اول مدل جانسون-کوک، بیانگر وابستگی به کرنش و عبارت قسمت دوم معادله بیانگر وابستگی به نرخ کرنش و قسمت سوم آن معرف وابستگی تنش به دما می‌باشد. در واقع معادله جانسون-کوک از سه قسمت مجزا تشکیل شده است که تأثیرات سخت‌شوندگی کرنشی¹، سخت‌شوندگی نرخ کرنشی² و نرم‌شوندگی دمایی³ را نشان می‌دهد [16].

¹ Strain Hardening

² Strain Rate Hardening

³ Thermal Softening

جدول 2 مقادیر ثوابت مادی معادله جانسون-کوک بدست آمده برای فولاد ضد زنگ 304

Table 2 Material constants of Johnson-Cook Model

مقدار	ضرایب
210 MPa	A
508 MPa	B
0/026	C
0/63	n
0/98	m

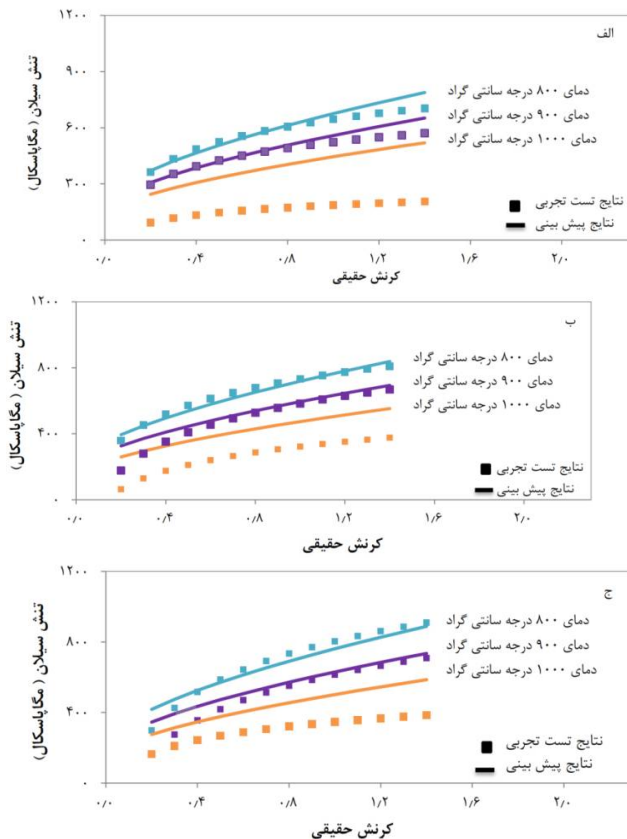


Fig. 9 Graphs showing experimental and predicted stress for JC model at various strains for strain rates of: (a) 0.01; (b) 0.1; (c) 1S-1

شکل 9 نمودار تنش-کرنش فولاد 304 با استفاده از نتایج تست آزمایشگاهی و پیش‌بینی به وسیله معادله جانسون-کوک توسعه داده شده در نرخ‌های کرنش الف) 0/01، ب) 0/1 و ج) 1 برثانیه.

در شکل 9- الف نمودارها در سه دمای 800، 900 و 1000 درجه سانتی‌گراد و در نرخ کرنش 0/01 برثانیه ترسیم شده است. نقاط مربعی نشان داده شده در نمودارها حاصل از نتایج تست تجربی و خط‌های ترسیم شده مقادیر پیش‌بینی شده حاصل از معادله رفتاری جانسون-کوک می‌باشد. همان‌طور که در نمودار قسمت الف مشاهده می‌شود پیش‌بینی‌ها در دمای 800 و 900 درجه سانتی‌گراد تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی آزمایشگاهی دارد. برای نمودارهای شکل 9- ب نیز که

m با توجه به شیب نمودار شکل 8 برابر 0/98 استخراج می‌گردد. در محاسبه T^* مقدار T_m دمای ذوب برای فولاد 304 برابر با 1673 درجه کلونین می‌باشد [17].

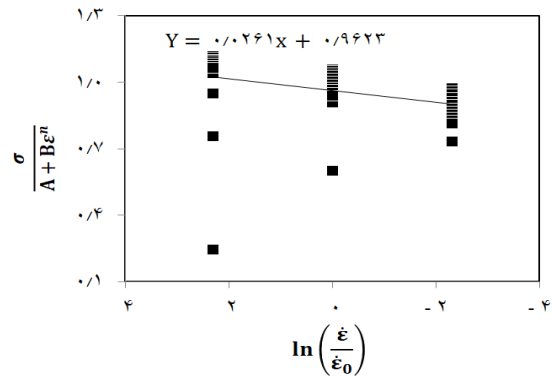


Fig. 7 Relationship between $\frac{\sigma}{A+B\epsilon^n}$ and $\ln\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)$ under the reference conditions

شکل 7 نمودار $\frac{\sigma}{A+B\epsilon^n}$ و $\ln\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)$ فولاد 304 در دمای مرجع و نرخ‌های کرنش مختلف.

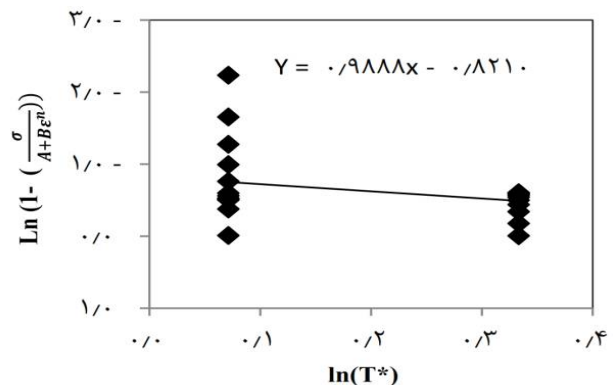


Fig. 8. Relationships between $\ln T^*$ and $\ln\left(1 - \frac{\sigma}{A+B\epsilon^n}\right)$ under the reference conditions.

شکل 8 نمودار $\ln T^*$ و $\ln\left(1 - \frac{\sigma}{A+B\epsilon^n}\right)$ فولاد 304 در نرخ کرنش مرجع و دماهای تغییر شکل مختلف.

سرانجام با توجه به مطالب فوق و با استفاده از ضرایب مدل جانسون-کوک استخراج شده، به ترتیب توضیح داده شده از نمودارها، ثوابت با دقت قابل قبولی استخراج شده که به شرح جدول 2 می‌باشد. پس از استخراج ضرایب معادله رفتاری جانسون-کوک با قرار دادن مقادیر مختلف کرنش و انجام محاسبات نمودارهای پیش‌بینی تنش-کرنش با ضرایب استخراج شده در جدول 2 ارائه شده است.

در شکل 9 نمودارهای تنش-کرنش حاصل از پیش‌بینی تنش سیلان با استفاده از معادله رفتاری جانسون-کوک توسعه داده شده و نتایج تجربی نشان داده شده است.

می‌باشد. درصد میانگین خطای مطلق کل داده‌های پیش شده و تجربی حدود 4% است، که نشان دهنده دقت نسبتاً خوب و قابل قبول در پیش‌بینی است.

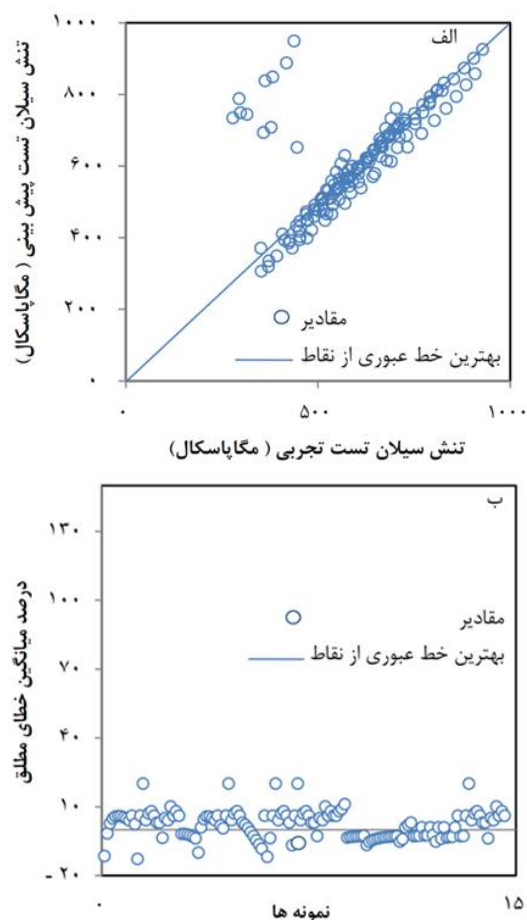


Fig. 10. (a) Experimental and predicted values by Johnson-Cook equation; (b) Scattering of the mean absolute error between the predicted and experimental data.

شکل 10 الف) مقایسه مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده توسط معادله جانسون کوک و ب) پراکندگی میانگین خطای مطلق بین داده‌های پیش‌بینی و تجربی

به‌طور کلی، مقادیر ضریب همبستگی و خطای مطلق، مؤید این مطلب می‌باشند که مدل رفتاری ارائه‌شده و معادله رفتاری توسعه داده‌شده از تخمین نسبتاً مناسبی برای پیش‌بینی تنش شارش فولاد ضدزنگ 304 در تغییر شکل گرم برخوردار می‌باشد. لذا می‌توان از این مدل رفتاری با اطمینان قابل‌قبولی جهت تحلیل مسائل شکل‌دهی گرم این فولاد استفاده کرد. مقایسه مقادیر تنش سیلان تجربی حاصل از تست پیچش گرم و پیش‌بینی شده توسط مدل جانسون کوک توسعه داده شده در شکل 10 نمایش داده شده است. خط فرضی 45 درجه در شکل 10- الف نشان می‌دهد که مدل ارائه شده توانایی پیش‌بینی

در همان دماهای 800، 900 و 1000 درجه سانتی‌گراد و در نرخ کرنش 0/1 برثانیه رسم شده نیز بیانگر دقت بالای پیش‌بینی توسط معادله جانسون-کوک توسعه داده شده در دماهای 800 و 900 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. نمودارهای شکل 9- ج نیز وضعیتی مشابه نمودارهای شکل 9- الف و ب دارد که در دمای 800، 900 و 1000 درجه سانتی‌گراد و در نرخ کرنش 1 برثانیه ترسیم شده است. با بررسی نتایج مشخص شد که معادله رفتاری توسعه داده شده می‌تواند با دقت بالایی رفتار فولاد را در دماهای 800 و 900 درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی کند در حالیکه با افزایش دمای تغییرشکل به دمای 1000 درجه سانتی‌گراد از دقت پیش‌بینی معادله رفتاری توسعه داده شده کاسته می‌شود. همان‌طور که در نمودارها قابل مشاهده است با افزایش نرخ کرنش دقت پیش‌بینی معادله رفتاری جانسون-کوک توسعه داده شده برای فولاد 304 در کرنش‌های بالای 0/8 بیشتر می‌شود و در نقطه مقابل برای نرخ کرنش‌های پایین‌تر در کرنش‌های کمتر از 0/8 دقت پیش‌بینی نتایج بالاتر است.

توانایی پیش‌بینی مدل توسعه داده شده به‌طور کلی از طریق ضریب همبستگی¹، میانگین خطای مطلق² و موارد مشابه بیان می‌گردد [3-5].

لذا جهت بررسی بهتر قابلیت و دقت پیش‌بینی مدل رفتاری جانسون-کوک توسعه داده شده از پارامترهای آماری استاندارد شامل ضریب همبستگی (R) و درصد میانگین خطای مطلق (AARE) که به ترتیب در رابطه‌های (4) و (5) ارائه شده است، استفاده می‌شوند:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (4)$$

$$AARE (\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100 \quad (5)$$

که در روابط فوق E_i و P_i به ترتیب تنش تجربی و تنش پیش‌بینی شده می‌باشند، همچنین، \bar{E} و \bar{P} مقادیر تنش متوسط تجربی و پیش‌بینی شده هستند. N تعداد داده‌های مورد بررسی در این پژوهش است [3-5].

شکل 10 مقایسه‌ای بین مقادیر تنش حقیقی از آزمایش‌های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده از مدل رفتاری ارائه‌شده را نشان می‌دهد، که حاکی از دقت مناسب مدل رفتاری ارائه‌شده می‌باشد. مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر تنش شارش اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در این حالت نزدیک به 0/98

¹ Correlation coefficient (R)

² Average absolute relative error (AARE)

نمونه‌های مورد تست به سطح خارجی نمونه حرکت می‌شود و دوقلویی‌ها بیشتر مشاهده شد. با افزایش نرخ کرنش اعمال شده دوقلویی‌ها نیز در نمونه افزایش پیدا می‌کنند.

- مقایسه نتایج تجربی حاصل از تست پیچش گرم با نتایج پیش‌بینی شده از معادله رفتاری توسعه داده شده جانسون-کوک، حاکی از دقت قابل قبول پیش‌بینی رفتار مکانیکی فولاد ضدزنگ 304 در دمای بالای تغییرشکل و در کرنش‌های بالا می‌باشد. لذا معادله رفتاری توسعه داده شده از قابلیت پیش‌بینی مناسب رفتار این فولاد برخوردار است.

5- مراجع

- [1] Blandford, R., et al. *Tensile stress-strain results for 304L and 316L stainless steel plate at temperature*. in *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*. 2007.
- [2] Nkhoma, R.K., C.W. Siyasiya, and W.E. Stumpf, *Hot workability of AISI 321 and AISI 304 austenitic stainless steels*. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014. 595: pp. 103-112.
- [3] Ashtiani, H.R. and P. Shahsavari, *A comparative study on the phenomenological and artificial neural network models to predict hot deformation behavior of AlCuMgPb alloy*. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016. 687: pp. 263-273.
- [4] Ashtiani, H.R. and P. Shahsavari, *Strain-dependent constitutive equations to predict high temperature flow behavior of AA2030 aluminum alloy*. *Mechanics of Materials*, 2016. 100: pp. 209-218.
- [5] HR Rezaei Ashtiani, P Shahsavari. *Strain-dependent constitutive equations to predict high temperature flow behavior of AA2030 aluminum alloy*, *Mechanics of Materials Volume 100*, September 2016, Pages 209-218.
- [6] Rezaei Ashtiani, H. *Predication of Hot Flow Behavior of Micro-Alloy Steel Using Modified Johnson-Cook Model*. *Journal Of Metallurgical and Materials Engineering*, 2021; doi: 10.22067/jmme.2021.67108.0
- [7] Rusinek, A., J.A. Rodríguez-Martínez, and A. Arias, *A thermo-viscoplastic constitutive model for FCC metals with application to OFHC copper*. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2010. 52(2): pp. 120-135.
- [8] Li, H.Y., et al., *A modified Johnson Cook model for elevated temperature flow behavior of T24 steel*. *Materials Science and Engineering: A*, 2013. 577: p. 138-146.
- [9] Murugesan, M. and D.W. Jung, *Johnson Cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming applications*. *Materials*, 2019. 12(4): p. 609.
- [10] Korkmaz, M.E., *Determination and verification of Johnson-Cook parameters for 430 ferritic steels via different gage lengths*. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2019. 72(10): p. 2663-2672.

رفتار تغییر شکل گرم فولاد 304 را با دقت قابل قبول دارد.

شکل 10- ب میانگین خطای مطلق بین داده‌های پیش‌بینی و تجربی را نشان می‌دهد با دقت در این شکل مشاهده می‌گردد که خطای مطلق بیش از 90 درصد داده‌های پیش‌بینی کمتر از ± 6 مگاپاسکال می‌باشد. در نتیجه با توجه به شکل 10 می‌توان ادعا کرد معادله رفتاری جانسون-کوک توسعه داده شده می‌تواند با دقت قابل قبول رفتار تغییر شکل گرم فولاد ضدزنگ 304 را در شرایط اشاره شده پیش‌بینی کند و نتایج پیش‌بینی انطباق خوبی با نتایج تجربی دارد.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی رفتار کارگرم فولاد ضد زنگ 304 با استفاده از تست پیچش گرم در محدوده دمای 800 تا 1000 درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش بین 0/001 تا 1 بر ثانیه و در کرنش‌های مقادیر بالا پرداخته شد و معادله رفتاری جانسون-کوک مناسب جهت پیش‌بینی رفتار این فولاد در دمای بالا توسعه داده شد که در زیر به اهم نتایج این تحقیق اشاره می‌شود:

- بررسی نتایج منحنی‌های تجربی تنش-کرنش نشان دهنده افزایش تنش سیلان فولاد با کاهش دمای تغییرشکل یا افزایش نرخ کرنش می‌باشد. همچنین با افزایش دمای تغییرشکل به 1000 درجه سانتی‌گراد نمودار رخ داد پدیده تبلور مجدد دینامیکی را نشان می‌دهد. در حالیکه در دماهای پایین یا نرخ‌های تغییرشکل بالا نمودار نشان دهنده وضعیت سخت شوندگی و گاهی بازیابی دینامیکی می‌باشد.

- بررسی ریز ساختار نمونه تغییرشکل داده شده نشان می‌دهد که اندازه دانه و ریز ساختار از مرکز تا سطح نمونه شرایط متفاوتی را داراست، که یکی از دلایل اصلی آن تغییرات کرنش از مرکز تا سطح نمونه است که از صفر تا بیشترین مقدار آن تغییر می‌کند. بطور کلی اندازه دانه نمونه تغییرشکل داده شده در مقایسه با اندازه دانه اولیه ریزتر می‌شود که حاکی از پدیده‌های نرم شوندگی بازیابی و تبلور مجدد در میکرو ساختار می‌باشد. نتایج ریز ساختاری نشان می‌دهد که با افزایش دمای تغییرشکل بخصوص در مقادیر نرخ کرنش پایین، دانه تبلور مجدد یافته به سرعت رشد کرده و اندازه دانه درشت می‌شود ولی همچنان کمتر از اندازه دانه نمونه اولیه می‌باشد. در حالیکه در دماهای پایین تغییرشکل و نرخ‌های تغییرشکل یا کرنش بالا اغلب ساختار بازیابی شده با چگالی بالای نابجایی‌ها مشاهده می‌شود. در سطح نمونه در مسیر شعاع نمونه هرچه از مرکز

- stainless steel during high-temperature torsion deformation. Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(7), pp. 1931-1938.
- [15] Duprez, L., B. De Cooman, and N. Akdut, *Flow stress and ductility of duplex stainless steel during high-temperature torsion deformation. Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002. 33(7): pp. 1931-1938.
- [16] Davoodi, B. and M.R. Eslami, *Modeling of dynamic behavior of aluminum alloy 5083 in machining process. Modares Mechanical Engineering*, 2016. 16(3): pp. 1-7.
- [17] El Wahabi, M., J. Cabrera, and J. Prado, *Hot working of two AISI 304 steels: a comparative study. Materials Science and Engineering: A*, 2003. 343(1-2): pp. 116-125. (in Persian فارسی)
- [11] Dehghan-Manshadi, A., M.R. Barnett, and P. Hodgson, *Recrystallization in AISI 304 austenitic stainless steel during and after hot deformation. Materials Science and Engineering: A*, 2008. 485(1-2): pp. 664-672.
- [12] Mandal, S., et al., *Artificial neural network modeling to evaluate and predict the deformation behavior of stainless steel type AISI 304L during hot torsion. Applied Soft Computing*, 2009. 9(1): p. 237-244.
- [13] Chavilian, H., et al., *Investigation of Hot Deformation Behavior of 321 Stainless Steel using Hot Compression Test and Modeling with Constitutive Equations. Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, 2017. 36(3): pp. 63-72.
- [14] Duprez, L., De Cooman, B.C. and Akdut, N., 2002. *Flow stress and ductility of duplex*