



ارایه معادلات ساختاری، مدل اصلاح شده دینامیکی مواد و نقشه ضریب حساسیت به نرخ کرنش برای بررسی ناپایداری کار داغ و گرم فولاد زنگ نزن دوفازی 2205

علی سنبللی^{1*}، فردین نعمت زاده¹، علی مژگانی²، علیرضا نوری³

1- استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

3- کارشناسی ارشد متالورژی، شرکت ماشین سازی اراک، اراک، ایران

* اراک، ایران، کد پستی 38156-88349، a-sonboli@araku.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

فولاد زنگ‌نزن دوفازی 2205 به دلیل مقاومت به خوردگی عالی همراه با خواص مکانیکی فوق‌العاده و کاربرد فراوان آن در صنایع مختلف در گستره‌ی دمایی متفاوت، بسیار مورد توجه است و می‌تواند جایگزین مناسبی برای فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی یا فریتی باشد. در پژوهش حاضر، آزمایش فشار داغ جهت شناخت رفتار کار داغ و گرم آلیاژ 2205 و تأثیر پارامترهای دما، نرخ کرنش و کرنش بر تنش سیلان آن انجام گرفت. نمونه‌های استوانه‌ای شکل به قطر 8 mm و ارتفاع 12 mm در دماهای 600، 700، 800، 900، 1000، 1100°C و نرخ کرنش‌های 0/3، 0/1، 0/01، 0/001 تا 0/6 تغییر شکل داده شدند. از معادلات ساختاری در جهت پیش‌بینی رفتار مکانیکی و آنالیز تنش سیلان این فولاد به کار گرفته شد و در نهایت از مدل اصلاح شده دینامیکی مواد و نقشه‌های ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m) برای نشان دادن محدوده‌ی دما و نرخ کرنش ایده‌آل برای کار داغ و گرم این آلیاژ مورد استفاده قرار گرفت. نقشه‌های ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m) نشان داد پایداری کار داغ و گرم فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 در سه ناحیه با دمای 800°C و نرخ کرنش $0/3 \text{ s}^{-1}$ دمای 1050°C و نرخ کرنش $0/001 \text{ s}^{-1}$ و دمای 1050°C و نرخ کرنش $0/3 \text{ s}^{-1}$ است.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 آذر 1400
داوری اولیه: 12 دی 1400
پذیرش: 25 بهمن 1400
کلیدواژگان:
فولاد زنگ‌نزن دوفازی 2205
معادلات ساختاری
مدل اصلاح شده دینامیکی مواد
نقشه ضریب حساسیت به نرخ کرنش
کار داغ و گرم

Construction of constitutive equations, modified dynamic materials model and strain-rate sensitivity coefficient map for investigation of hot and warm working instability of 2205 duplex stainless steel

Ali Sonboli^{1*}, Fardin Nematzadeh¹, Ali Mojgani¹, Alireza Nouri²

1- Materials Engineering and Metallurgy, Engineering Faculty, Arak University, Arak, Iran

2- Master Science of Metallurgy, Arak Machine-Building Company, Arak, Iran

* P.O.B. 38156-88349, Arak, Iran, a-sonboli@araku.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 14 December 2021
First Decision: 2 January 2022
Accepted: 14 February 2022

Keywords:

Duplex stainless steel 2205
Constitutive equations
Modified dynamic materials model
Strain-rate sensitivity coefficient map
Hot and warm working

Abstract

Duplex stainless steel 2205, famous for its excellent combination of high corrosion resistance and good mechanical properties, is widely used in the industrial fields in different temperature ranges, and can be a suitable alternative to austenitic or ferritic stainless steels. In the present study, the hot compression tests were performed to identify the hot and warm working behavior of duplex 2205 stainless steel and the effect of temperature, strain rate and strain parameters on its flow stress. Cylindrical specimens with a diameter of 8 mm and a height of 12 mm at temperatures of 600, 700, 800, 900, 1000, 1100 °C and strain rates of 0.3, 0.1, 0.01, 0.001 s^{-1} were compressed to a strain of 0.6. The constitutive equations were used to predict the mechanical behavior and flow stress analysis of this steel, and finally the modified dynamic materials model and strain rate sensitivity(m) maps were used to indicate the best temperature and strain rate ranges for hot and warm working of this alloy. The strain rate sensitivity(m) maps showed the hot and warm stable workability of duplex 2205 stainless steel is in three domains with 800 °C temperature and 0.3 s^{-1} strain rate, 1050 °C temperature and 0.001 s^{-1} strain rate and 1050 °C temperature and 0.001 s^{-1} strain rate.

1- مقدمه

نتیجه‌ی ترکیب کروم و نیکل است که به طور مناسب در ترکیب شیمیایی آلیاژ به تعادل رسیده‌اند. این فولادها به دلیل استحکام بالا و مقاومت به خوردگی فوق‌العاده‌ی ناشی از عملکرد همزمان کروم، مولیبدن، تنگستن و نیتروژن به عنوان جایگزینی مناسب

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی-فریتی که به آن‌ها فولادهای زنگ‌نزن دوفازی گفته می‌شود، نام خود را از حضور مخلوط آستنیت و فریت در ساختار در دمای محیط می‌گیرند؛ که این

Please cite this article using:

A. Sonboli, F. Nematzadeh, A. Mojgani, A. Nouri, Construction of constitutive equations, modified dynamic materials model and strain-rate sensitivity coefficient map for investigation of hot and warm working instability of 2205 duplex stainless steel, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 12, pp. 1- 10, 2022 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تک محوره در گستره‌ی دمایی و نرخ کرنش متفاوت؛ تغییرات ریزساختاری و تأثیر بر تغییر شکل داغ را در شرایط متفاوت توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشخصات سیلان پلاستیک هر دو فولاد زنگ‌نزن دوفازی بر حسب معادله‌ی کلاسیک هایپرپولیک تفسیر کرده‌اند [10].

فرونش و همکاران ویژگی‌های تغییر شکل دما بالای فولاد زنگ‌نزن دوفازی 2205 به وسیله‌ی رفتار هر فاز تشکیل دهنده را مورد مطالعه قرار دادند. آنالیز تنش سیلان به کمک آزمون فشار داغ در دمای 800°C تا 1100°C و نرخ کرنش از s^{-1} تا 10^{-3} نشان از تفاوت در ثوابت تجربی کار داغ در دماهای پایین و بالا دارد. آن‌ها حساسیت به نرخ کرنش را در این فولاد بین 0/12 تا 0/21 محاسبه کرده‌اند [11].

در اکثر این کارها از مدل دینامیکی مواد (DMM^8)، پیشنهاد شده برای اولین بار توسط پراساد و همکارش [12] استفاده شده است (در این مدل به طور معمول، ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m)، فقط تابعی از دما است و به نرخ کرنش وابسته نیست). در کارهای جدیدتر، از مدل اصلاح شده دینامیکی مواد، پیشنهاد شده توسط مورتی و رو [13، 14] استفاده می‌شود (در این مدل ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m)، هم تابع دما است و هم تابع نرخ کرنش). به عنوان مثال نایان و همکاران [15] در سال 2021، رفتار کار داغ فولاد Monel®400 (Ni-30Cu) را به وسیله این مدل اصلاح شده و به کمک نقشه ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m map) مورد بررسی داده و محدوده پایداری کار داغ این فولاد را گزارش کرده‌اند.

همانطور که ملاحظه می‌شود از یک طرف استفاده از یک مدل ساختاری اصلاح شده برای بررسی کار داغ فولاد زنگ‌نزن دوفازی 2205 ضروری به نظر می‌رسد و از طرف دیگر رفتار کار گرم این فولاد مورد کم توجهی قرار گرفته است. در این پژوهش رابطه‌ی بین تنش سیلان، نرخ کرنش و دما در محدوده دمایی 600°C تا 1100°C برای فولاد زنگ‌نزن دوفازی 2205 مورد بررسی قرار گرفته و یک مدل ساختاری اصلاح شده برای رفتار کار داغ و گرم این فولاد ارایه شده است. در این مدل اصلاح شده محدوده‌ی دمای کار داغ و گرم به طور همزمان برای اولین بار برای این فولاد در نظر گرفته شده است. با استفاده از این مدل و نقشه ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m)، پایداری این فولاد برای تغییر شکل در این محدوده دمایی، مورد بررسی قرار گرفته و بهترین شرایط کار داغ و گرم این فولاد (محدوده دما و نرخ کرنش) تبیین شده است.

برای فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، مارتنزیتی و فریتی در صنایع دریایی و پتروشیمی محسوب می‌شوند. مقاومت به خوردگی در فولادهای زنگ‌نزن دو فازی نتیجه‌ی عناصر موجود در این فولادهاست [1-4]. فولادهای زنگ‌نزن دو فازی به طور معمول توسط اکستروژن، نورد، ریخته‌گری و عملیات فورج در دماهای بالا تولید می‌شوند. عمده‌ترین مشکلاتی که در تغییر شکل داغ فولادهای زنگ‌نزن دو فازی به وجود می‌آید ناشی از ساختار فریتی و آستنیتی است؛ چرا که کرنش تقسیم شده بین فریت و آستنیت به ایجاد تنش داخلی در مرز فازها منجر می‌شود و این تنش ممکن است باعث ایجاد ترک شود [5]. از طرفی فازهای نامطلوب در این فولادها از قبیل ترکیبات بین فلزی، نیتrideها و کاربیدها خود در رفتار خوردگی و چقرمگی آن‌ها تأثیر گذار است. در میان این فازها، فاز σ با سرعت تشکیل بالا مورد توجه است، چراکه تأثیرات نامطلوبی بر خواص خوردگی و چقرمگی این فولادها دارد [6]. این در حالی است که در این فولادها ترکیب آستنیت و فریت، برتری خواص مکانیکی همراه با خواص فیزیکی بسیار عالی را در مقایسه با نمونه‌های تک فاز فولادهای زنگ‌نزن، رقم می‌زند. بنابراین کار پذیری داغ فولادهای زنگ‌نزن دوفازی همواره مورد توجه بوده که گاهاً محدودیت‌هایی را به وجود می‌آورد. در واقع کارپذیری داغ، میزان تغییر شکل پلاستیک داغ یک آلیاژ به صورت همگن است. یعنی در منطقه دمایی تغییر شکل داغ (معمولاً بالای $0/6 T_m$)، چه میزان تغییر شکل پلاستیک را می‌توان در ماده ایجاد کرد، قبل از این که ناپایداری¹ در آن رخ دهد. لازم به ذکر است که ناپایداری عمدتاً به صورت باندهای برشی آدیاباتیک²، تمرکز سیلان³، پیرکرنشی دینامیکی⁴ (باندهای لودرز⁵)، کینگ باندها⁶، دوقلویی مکانیکی⁷ دیده می‌شود [7]. بنابراین بهینه‌سازی پارامترهای تغییر شکل داغ این فولادها هنوز یک چالش جدی به حساب می‌آید، به طوری که پیش‌بینی رفتار مکانیکی این فولادها و ارتباط پارامترهای فرایند تولید آنها با شکل‌پذیری داغ، همواره مورد علاقه محققین بوده است. کارهای زیادی در جهت پیش‌بینی رفتار مکانیکی این فولادها به کمک مدل‌هایی که ارتباط شکل‌پذیری با پارامترهای فرایند را بیان می‌کند، انجام شده است [8، 9].

کابرا و همکاران [10] بر روی دو نوع فولادهای زنگ‌نزن دوفازی 4462 و 4410 مطالعه کردند. آن‌ها با آزمون فشار داغ

¹ Instability

² Adiabatic shear band

³ Flow localization

⁴ Dynamic strain aging

⁵ Luder's band

⁶ King bands

⁷ Mechanical twinning

⁸ Dynamic Material Model

2- روش انجام آزمایشات

1-2- مواد اولیه و ترکیب شیمیایی

ترکیب شیمیایی آلیاژ استفاده شده در این تحقیق (فولاد زنگ نزن دوفازی آستنیتی - فریتی 2205) به کمک اسپکتروسکوپی نشری تعیین و در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 (درصد وزنی)

Table 1 Chemical composition of the 2205 duplex stainless steel (weight percentage)

Fe	V	Cu	Mo	Cr	Ni
مابقی	0/053	0/19	3/13	22/60	5/18
Mn	P	S	Si	C	N
1/15	0/019	0/002	0/53	0/02	0/17

2-2- آماده سازی نمونه‌ها و انجام آزمون فشار داغ

برای انجام آزمون فشار، نمونه‌هایی به صورت استوانه‌ای مطابق با استاندارد ASTM E209 با نسبت ارتفاع به قطر 1/5 (8 mm × 12 mm) در جهت اکستروژن ماشین کاری شدند. برای کاهش اثر اصطکاک بین نمونه‌ها و فک، شیارهای دایره‌ای هم‌محور بر روی مقطع بالایی و پایینی نمونه‌ها ایجاد شد.

آزمایش فشار داغ برای تمامی نمونه‌ها با هدف بررسی اثر دما و نرخ کرنش بر رفتار سیلان و تحولات ساختاری، در محدوده دمایی 600 تا 1100 °C و نرخ کرنش‌های 10^{-3} تا s^{-1} 0/3 انجام گرفت. دستگاه آزمایش کشش/فشار یونیورسال از نوع Gotech-AI7000 LA30 مجهز به فک‌های مخصوص فشار داغ، کوره مقاومتی به همراه کنترل‌کننده دما و سیستم خنک‌کننده خارجی (توسط جریان آب سرد) برای انجام آزمایش‌های فشار به کار گرفته شد. آنیل کوتاه‌مدت (7 دقیقه) با هدف برقراری تعادل دمایی در هر یک از دماهای آزمایش انجام گرفت. همچنین به منظور کاهش اصطکاک و در نتیجه کاهش نواحی مرده و ناحیه بشکه‌ای¹ ایجاد شده در طی آزمایش فشار داغ، در حین اعمال کرنش از ورق‌های میکا به ضخامت حدود 0/1 میلی‌متر بین سطوح فک‌ها و نمونه استفاده شد. به منظور ثبت ریزساختار آلیاژ قبل و بعد از تغییر شکل، دو نمونه در هر دما حرارت داده شد؛ نمونه تحت نرخ کرنش مشخص تا کرنش نهایی برابر با 0/6 فشرده و پس از آن در آب کوئنچ شد. دماها و نرخ کرنش‌های انتخاب شده برای عملیات فشار داغ مطابق با جدول 2 است. تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد که روان‌کار مناسب برای آلیاژ مورد نظر، بورون نیتراید² است [16] که از چسبیده شدن نمونه در دماهای بالا و نرخ کرنش‌های زیاد به سطح فک‌ها

¹ Barreling² Boron nitride

جلوگیری می‌کند. در این پژوهش از همین روانکار استفاده شده است.

جدول 2 دماها و نرخ کرنش‌های آزمایش فشار داغ در تحقیق حاضر

Table 2 Temperatures and strain rates of hot compression test in the present study

نرخ کرنش‌ها (s^{-1})	دماها (°C)	نام آلیاژ
0/1 - 0/3	800 - 700 - 600	2205
0/001 - 0/01	1100 - 1000 - 900	

2-3- آنالیز داده‌ها پس از آزمایش فشار داغ

در طی آزمایش فشار داغ، داده‌های مربوط به جابجایی لحظه‌ای فک‌ها و نیروی لحظه‌ای وارد شده به سطح مقطع نمونه ثبت گردید. برای تبدیل داده‌های خروجی به تنش و کرنش از روابط (1) و (2) استفاده شد.

$$\sigma = \frac{F(h_0 - d)}{\pi r_0^2 h_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{h}{h_0} = \ln \frac{h_0 - d}{h_0} \quad (2)$$

در روابط بالا، σ تنش حقیقی (MPa)، F نیرو (N)، r_0 شعاع اولیه نمونه (mm)، h_0 ارتفاع اولیه نمونه (mm)، h ارتفاع لحظه‌ای نمونه (mm)، d میزان جابجایی فک‌ها (mm) و ε کرنش حقیقی است [17].

با استفاده از نرم‌افزار Excel 2016 تمامی منحنی‌های سیلان و منحنی‌های مربوط به معادلات ساختاری رسم شد. نقشه‌های پایداری نیز به کمک نرم‌افزار Origin pro 8.6 64bit ترسیم شدند.

3- نتایج و بحث

3-1- آنالیز تنش سیلان و ارایه یک مدل ساختاری

نمودارهای تنش - کرنش مهندسی اندازه‌گیری شده در آزمون فشار داغ در دماها و نرخ کرنش‌های مختلف برای فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 در شکل 1 دیده می‌شود. همان گونه که در این شکل مشخص است تنش سیلان با کاهش دما، در تمامی نرخ کرنش‌ها، افزایش می‌یابد.

به منظور مطالعه رفتار تغییر شکل داغ آلیاژها، به ویژگی‌های نمودارهای تنش سیلان و ارتباط آنها با پارامترهای فرآیند پرداخته می‌شود. در این راستا نقطه پیک این نمودارها از اهمیت بالایی برخوردار است. رابطه (3) به پارامتر زرن- هولمن معروف است و ارتباط بین تنش پیک، سرعت کرنش و دمای تغییر شکل را با یک معادله سینوس‌های پربولیکی بیان می‌کند:

$$z = \varepsilon \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = f(\sigma_p) = A[\sinh(\alpha\sigma_p)]^n \quad (3)$$

برای محاسبه α و n ، منحنی $\ln(\dot{\epsilon})$ بر حسب $\ln(\sinh(\alpha\sigma_p))$ در شکل 2 رسم و با تغییر مقادیر α تا موازی شدن خطوط منحنی در دماهای مختلف، مقدار α مشخص شد. با توجه به رابطه (3)، n نیز از میانگین شیب منحنی‌های این شکل بدست آمد.

همچنین منحنی‌های $\ln(\sinh(\alpha\sigma_p))$ بر حسب $\frac{1000}{T} (K^{-1})$ در شکل 3 رسم شد به گونه‌ای که میانگین شیب این نمودارها نشان‌دهنده مقدار انرژی فعال‌سازی تغییر شکل داغ (Q) است.

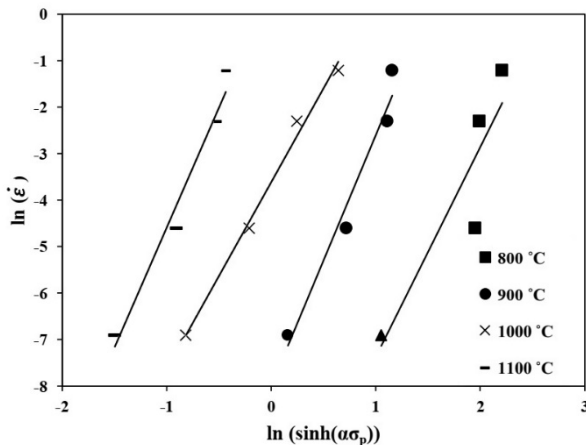


Fig. 2 $\ln(\dot{\epsilon})$ vs. $\ln(\sinh(\alpha\sigma_p))$ diagram in different temperatures
شکل 2 منحنی $\ln(\dot{\epsilon})$ بر حسب $\ln(\sinh(\alpha\sigma_p))$ در دماهای مختلف

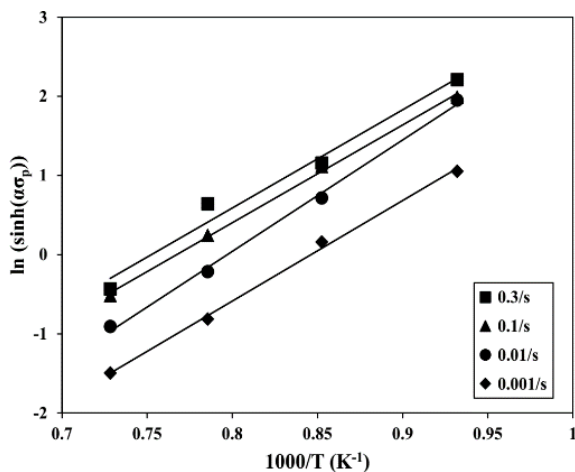


Fig. 3 $\ln(\sinh(\alpha\sigma_p))$ vs. $1000/T (K^{-1})$ diagram in different strain rate
شکل 3 منحنی $\ln(\sinh(\alpha\sigma_p))$ بر حسب $1000/T (K^{-1})$ در نرخ کرنش‌های متفاوت

منحنی $\ln z$ بر حسب $\ln(\sinh(\alpha\sigma_p))$ در شکل 4 آمده است که عرض از میانه آن نشان‌دهنده $\ln A$ و شیب آن نشان‌دهنده n است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، انطباق خط عبور داده شده از این نقاط بسیار خوب است ($R^2=0.9623$) و این درستی و صحت ثوابت بدست آمده را در این مدل نشان می‌دهد.

در رابطه (3)، α ضریب تنش و n توان تنش هستند که به صورت آزمایشگاهی به کمک نمودارهای تنش سیلان تعیین می‌شوند و Q انرژی فعال‌سازی است.

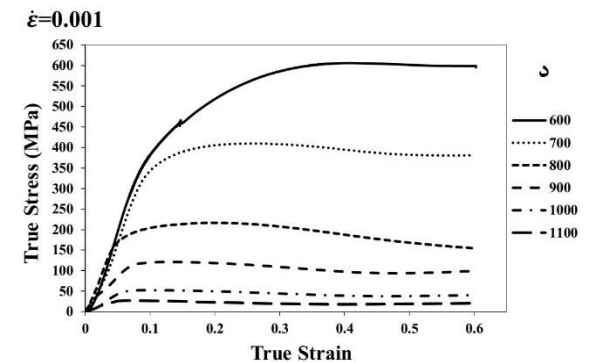
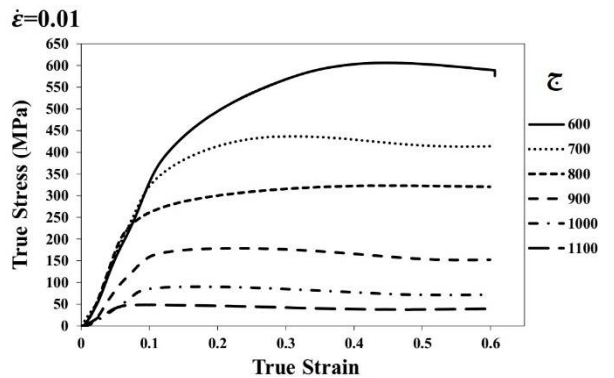
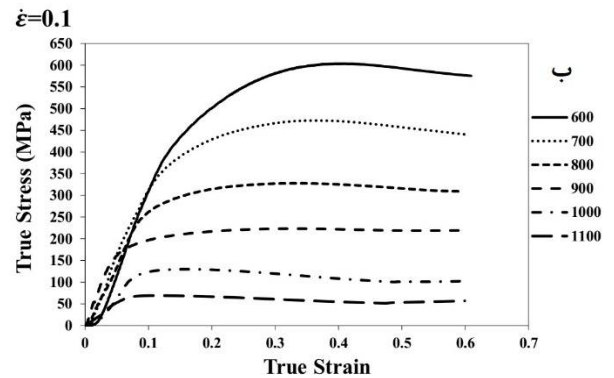
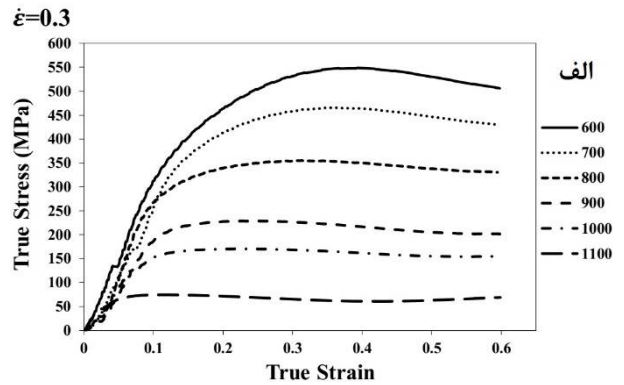


Fig. 1 Stress curves of duplex stainless steel 2205 at different temperatures and strain rates: a) $0.3 s^{-1}$ b) $0.1 s^{-1}$ c) $0.01 s^{-1}$ d) $0.001 s^{-1}$
شکل 1 منحنی‌های تنش سیلان فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 در دماهای مختلف و در نرخ کرنش‌های: الف) $0.3 s^{-1}$ ب) $0.1 s^{-1}$ ج) $0.01 s^{-1}$ و د) $0.001 s^{-1}$

کرنش برای فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 به صورت زیر است:

$$\dot{\epsilon} = 3.51273 * 10^{13} [\sinh(0.0082 \sigma_p)]^{4.7757} \exp\left(\frac{-368105.1502}{T}\right) \quad (7)$$

3-2- مدل اصلاح شده دینامیکی مواد و نقشه ضریب حساسیت به نرخ کرنش

با توجه به این که ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m) وابسته به چگالی نابجایی‌ها از طریق تأثیر نرخ کرنش بر تولید نابجایی‌ها است، می‌تواند به عنوان فاکتور کارپذیری داغ بیان شود. براساس مدل دینامیکی مواد (DMM)، فرآیند مکانیکی به عنوان یک سیستم در نظر گرفته می‌شود که شامل تولید کننده توان، ذخیره کننده توان و اتلاف کننده یا مصرف کننده توان است. جزء مصرف کننده توان و معادلات حاکم بر رفتار سیستم، نحوه تبدیل برگشت‌ناپذیر انرژی به دو شکل حرارتی و تغییرات ریزساختاری را در هر لحظه مشخص می‌کند [20]. روش ساده و مستقیم برای نشان دادن وضعیت مصرف توان توسط ریزساختار وجود ندارد. از این رو، اصول اکستریم ترمودینامیک برگشت‌ناپذیر برای تغییرشکل‌های بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. زیگلر [21] نشان داده است که رفتار چنین سیستمی از اصل حداکثر نرخ آنتروپی تولیدی پیروی می‌کند. در دمای معین طی فرآیند کار داغ، نرخ توان مصرف شده به صورت مستقیم متناسب با نرخ تولید آنتروپی داخلی است و به دلیل برگشت‌ناپذیر بودن تغییر شکل، همیشه مثبت است.

$$P = \sigma \cdot \dot{\epsilon} = \frac{d^1 S}{dt} T \geq 0 \quad (8)$$

در رابطه (8)، P تمام توان مصرف شده، σ تنش، $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش، T دما و $\frac{d^1 S}{dt}$ نرخ تولید آنتروپی داخلی است. کل نرخ تولید آنتروپی به دو بخش مکمل تفکیک می‌شود. بخش اول آنتروپی ناشی از هدایت حرارتی و بخش دوم آنتروپی متأثر از تغییرات متالورژیکی (ریزساختاری) است. در بخش اول، حرارت تولید شده ناشی از سیلان پلاستیک به قسمت‌های سردتر منتقل می‌شود و توان بیشتری را مصرف می‌کند. در بخش دوم، تنش سیلان به دلیل حرکت نابجایی‌ها کاهش می‌یابد و سهم کوچکی در مصرف توان دارد. بنابراین توان مصرفی از دو بخش مکمل هم تشکیل شده است:

G: توان مصرف شده توسط تغییرشکل پلاستیک که بیشتر این توان به صورت حرارت و بخشی از آن به صورت عیوب شبکه ذخیره می‌شود.

L: توان مصرف شده ناشی از فرآیندهای متالورژیکی و

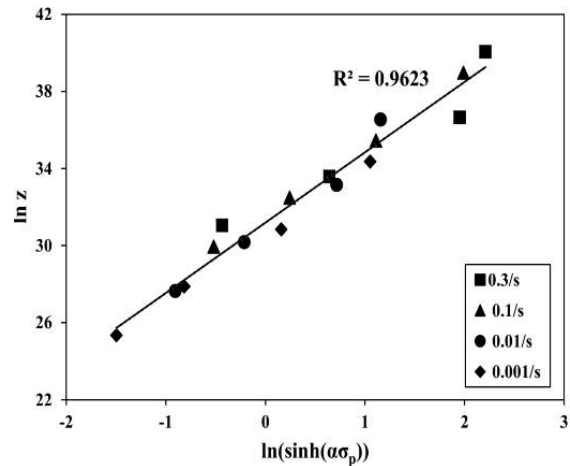


Fig. 4 $\ln z$ vs. $\ln(\sinh(\alpha\sigma_p))$ diagram

شکل 4 منحنی $\ln z$ برحسب $\ln(\sinh(\alpha\sigma_p))$

مقادیر n , α , Q و $\log(A)$ در جدول 3 آمده است.

جدول 3 مقادیر ثوابت معادله (1) بدست آمده برای فولاد زنگ نزن دوفازی 2205

Table 3 Constant values of Equation 1 obtained for duplex stainless steel 2205

α (MPa ⁻¹)	n	$\log(A)$ (s ⁻¹)	Q (kJ.mol ⁻¹)
$\pm 0/0002$	$\pm 0/1$	$13/5456 \pm 2$	$368/105 \pm 7$
0/0082	4/7757		

مقدار Q تقریباً نزدیک به مقادیر انرژی فعال‌سازی تغییر شکل داغ برای آلیاژهای با ترکیب مشابه است [18]. تمامی ثوابت بدست آمده نزدیک به یک تحقیق مشابه است که اخیراً انجام شده است [19]. در نتیجه با توجه به ثوابت بدست آمده، پارامتر z را می‌توان از طریق رابطه زیر برای تنش‌های قله و دماهای مختلف محاسبه کرد.

$$z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{44.27 * 10^3}{T}\right) = 3.51273 * 10^{13} [\sinh(0.0082 \sigma_p)]^{4.7757} \quad (4)$$

با توجه به ثوابت به دست آمده برای آلیاژ مورد نظر، معادله پیش‌بینی تنش نقطه قله به صورت روابط (5) و (6) بیان می‌شود [17]:

$$\sigma_p = \frac{1}{0.0082} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{z}{(3.51273 * 10^{13})^{1/4.7757}} \right) \right] \quad (5)$$

$$\sigma_p = \frac{1}{0.0082}$$

$$(6)$$

برای محاسبه پارامتر z در روابط (5) و (6) از رابطه (4) استفاده می‌شود. در نتیجه رابطه بین تنش نقطه قله با دما و نرخ

نمودارهای $\ln \sigma$ بر حسب $\ln \dot{\epsilon}$ ، در هر نقطه ضریب حساسیت به نرخ کرنش است.

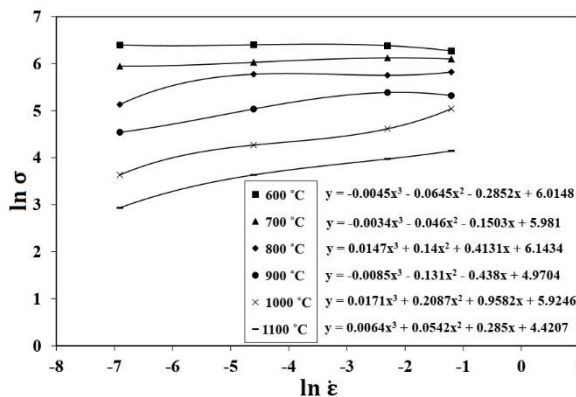


Fig. 5 Variation of $\ln \sigma$ vs. $\ln \dot{\epsilon}$ diagrams (in order to determine the values of strain rate sensitivity parameter (m) for duplex stainless steel 2205 at the strain of 0.5)

شکل 5 نمودارهای $\ln \sigma$ بر حسب $\ln \dot{\epsilon}$ (به منظور تعیین مقادیر ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m) برای فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 در کرنش 0/5)

این مفهوم در بسیاری از تحقیقات اخیر به منظور رسم نقشه ضریب حساسیت به نرخ کرنش انجام شده است [14, 15, 22]. لازم به ذکر است برای دقت بهتر در محاسبات، بهترین تابع چندجمله‌ای درجه 3 عبور کننده از نقاط در نظر گرفته شده است [22] (مراجعه شود). با توجه به رابطه 10، مشتق این تابع که یک چندجمله‌ای درجه 2 است، مقدار m برای تمامی نقاط را نشان می‌دهد. از آنجا که این نمودار برای هر کرنشی قابل رسم است می‌توان گفت m در هر کرنشی وابسته به دما و نرخ کرنش است.

از طرفی می‌توان یک مقدار میانگین برای m در یک دمای مشخص در نظر گرفت. بهترین حالت برای بیان این مقدار میانگین رسم بهترین خط گذرنده از نقاط هم دمای شکل 5 و تعیین شیب آن است (استفاده از یک تابع خطی به جای تابع چند جمله‌ای درجه 3). این مساله در شکل 6 دیده می‌شود و شیب هر خط همان متوسط m است که جهت تمایز با m (که تابع نرخ کرنش است)، در این تحقیق با m -value بیان می‌شود. تغییرات m -value نسبت به دما در کرنش 0/5 برای فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 در شکل 7 آمده است.

این کار برای کرنش‌های مهم یعنی کرنش پیک و کرنش قبل از پیک نیز انجام شده و تغییرات متوسط m با دما به ترتیب در شکل‌های 8 و 9 آمده است. شکل 8 نمودار تغییرات متوسط m برحسب دما را در کرنش 0/4 و شکل 9 نمودار تغییرات متوسط m برحسب دما را در کرنش 0/3 نشان می‌دهد. در هر دو

تغییرات ریزساختاری که شامل بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی، رشد یا حل شدن ذرات و فازها تحت شرایط دینامیکی، استحاله‌های ناشی از تغییر شکل و عیوب داخلی مانند تشکیل حفره و ترک‌های گوه‌ای می‌شود.

زیگلر این دو بخش را به عنوان توابع مصرف توان به صورت زیر نشان داده است:

$$P = \sigma \cdot \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (9)$$

در رابطه (9)، P تمام توان مصرف شده، σ تنش و $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش است. G و J توسط دو انتگرال به صورت رابطه (9) تعریف شده است. رابطه بین مقادیر G و J توسط پارامتر حساسیت به نرخ کرنش (m) به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\left(\frac{\partial J}{\partial G}\right)_{\dot{\epsilon}, T} = \left(\frac{\dot{\epsilon} d\sigma}{\sigma d\dot{\epsilon}}\right)_{\dot{\epsilon}, T} = \left(\frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln \dot{\epsilon})}\right)_{\dot{\epsilon}, T} = m \quad (10)$$

بنابراین، m به عنوان فاکتور تقسیم کننده توان بین تولید حرارت و تغییرات ریزساختار شناخته می‌شود. اگر در طی فرآیند کار داغ m ثابت بماند، بیانگر عدم تغییر در مکانیزم تغییر شکل است. تغییر پارامتر m به معنای تغییر مکانیزم است. پراساد [12] با فرض حاکم بودن قانون توانی ($\sigma = k\dot{\epsilon}^m$) و ثابت بودن m ، سهم J را مشخص کرده است. در مدل اصلاح شده دینامیکی مواد پیشنهاد شده توسط مورتی و رو [14]، دیگر قانون توانی حاکم نیست و ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m)، تابع دما و نرخ کرنش است. با افزایش میزان m ، مصرف توانی ناشی از تغییرات ریزساختار افزایش می‌یابد و در نتیجه مقادیر بالای m بیانگر کارپذیری داغ بهتر و عدم مقاومت در برابر تغییر شکل در دمای بالا است. مقدار m برای مواد جامد ویسکوپلاستیک¹ بین صفر تا یک است. به گونه‌ای که اگر m منفی باشد پیرکرنشی دینامیکی² رخ می‌دهد؛ یعنی بر اثر حرکت سریعتر عناصر محلول، نابجایی‌ها، در آلیاژ به طور مداوم قفل شده و بر اثر نیروی ناشی از تغییر شکل، رها می‌شوند. اگر m بالاتر از 1 باشد در مکانیک محیط‌های پیوسته، به جامدات قفل کننده اطلاق می‌شود. در هر دو حالت ناپایداری رخ می‌دهد [7]. پس بررسی تغییرات m با پارامترهای فرایند می‌تواند شرایط بهینه برای تغییر شکل داغ فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 را مشخص کند.

با توجه به رابطه (10) و مدل اصلاح شده دینامیکی مواد، شکل 5 به منظور تعیین مقادیر m برای فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 در کرنش 0/5 رسم شده است؛ به گونه‌ای که شیب

¹ Viscoplastic solids

² Dynamic strain aging

بسیار سریع تر افزایش می یابد. در این هنگام اگر تغییر شکل پلاستیک به صورت موضعی رخ دهد (شروع ناپایداری) به دلیل افزایش موضعی نرخ کرنش و بالا بودن m کار سختی موضعی رخ داده و ادامه ی تغییر شکل به مناطق تغییر شکل نیافته منتقل می شود. بنابر این بالا بودن m از ناپایداری جلوگیری کرده و یکنواختی کرنش را به همراه دارد. از این رو مقدار ضریب حساسیت به نرخ کرنش بالاتر (البته کمتر از 1) به معنی کار پذیری داغ بهتر است.

همان طور که قبلا بیان شد، ضریب حساسیت به نرخ کرنش یا همان m علاوه بر دما، به نرخ کرنش نیز بستگی دارد. از این رو تغییرات m با دما و نرخ کرنش بایستی همزمان بررسی گردد. تغییرات m با دما و نرخ کرنش در کرنش های 0/5، 0/4، 0/3 و 0/6 به ترتیب در شکل های 10 تا 13 رسم شده است.

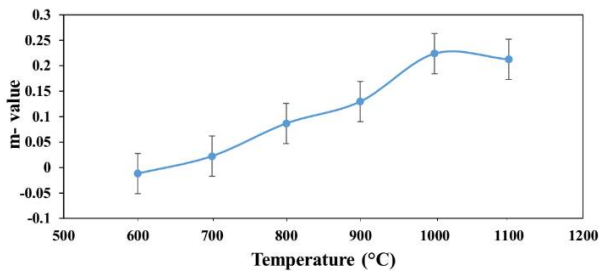


Fig. 9 Variation of mean strain rate sensitivity parameter (m - value) with deformation temperature for duplex stainless steel 2205 at the strain of 0.3

شکل 9 تغییرات متوسط m نسبت به دما در کرنش 0/3 برای فولاد زنگ نزن دوفازی 2205

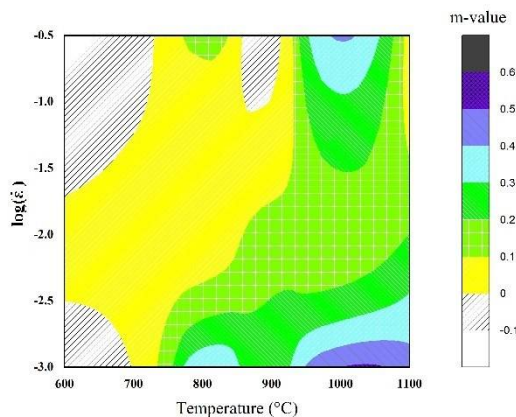


Fig. 10 m map for duplex stainless steel 2205 at a strain of 0.3

شکل 10 نقشه m در کرنش 0/3 برای فولاد زنگ نزن دوفازی 2205

مناطق که m در آن ها منفی است، ناپایداری رخ می دهد که در تمامی شکل ها به رنگ سفید است. با مقایسه این شکل ها

نمودار دیده می شود مقدار m با افزایش دما افزایش پیدا کرده و سپس کاهش می یابد.

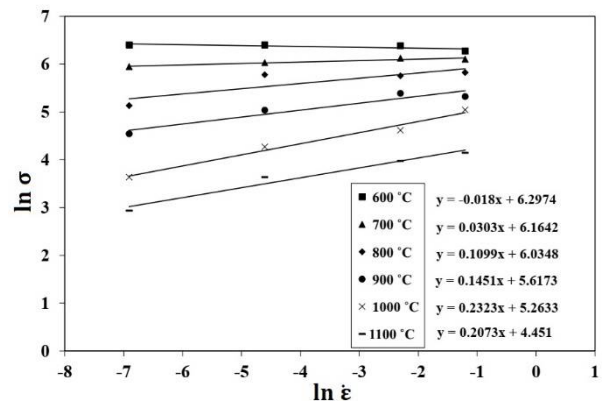


Fig. 6 linear variation of $\ln \sigma$ vs. $\ln \dot{\epsilon}$ diagrams (in order to determine the values of mean strain rate sensitivity parameter (m - value) for duplex stainless steel 2205 at the strain of 0.5)

شکل 6 نمودارهای خطی $\ln \sigma$ بر حسب $\ln \dot{\epsilon}$ (به منظور تعیین مقادیر متوسط ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m - value) برای فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 در کرنش 0/5)

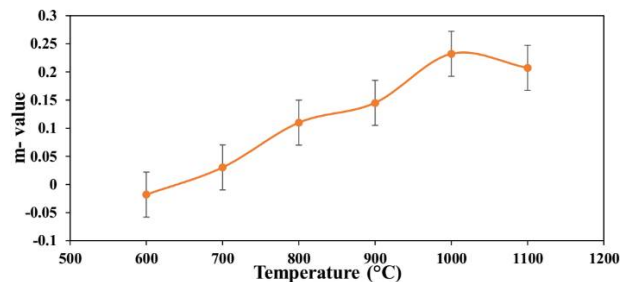


Fig. 7 Variation of mean strain rate sensitivity parameter (m - value) with deformation temperature for duplex stainless steel 2205 at the strain of 0.5

شکل 7 تغییرات متوسط m نسبت به دما در کرنش 0/5 برای فولاد زنگ نزن دوفازی 2205

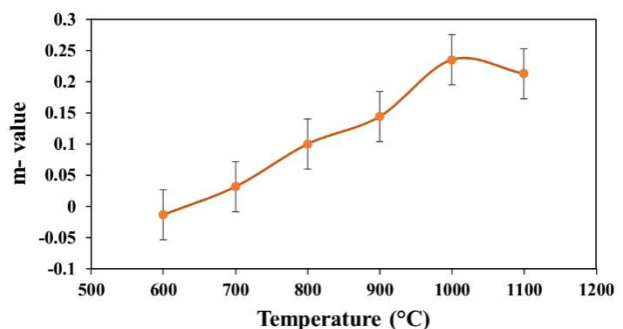


Fig. 8 Variation of mean strain rate sensitivity parameter (m - value) with deformation temperature for duplex stainless steel 2205 at the strain of 0.4

شکل 8 تغییرات متوسط m نسبت به دما در کرنش 0/4 برای فولاد زنگ نزن دوفازی 2205

وقتی مقدار m زیاد است، با توجه به رابطه 6، تنش سیلان

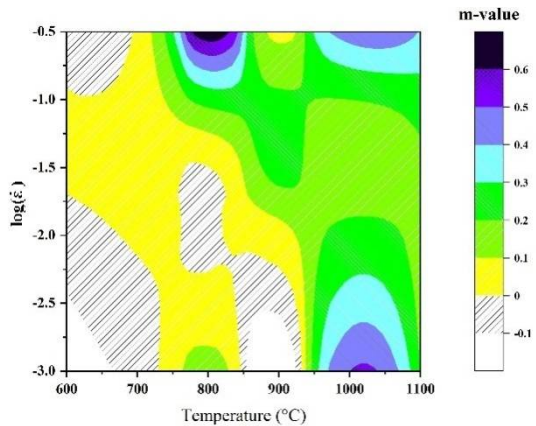


Fig. 13 m نقشه 13 نقشه m در کرنش 0/6 برای فولاد زنگ نزن دوفازی 2205

در این حالت یعنی کرنش 0/6، مناطق ناپایداری در دماهای میانی و سرعت کرنش‌های بالا (900°C و $0/3\text{ s}^{-1}$) حذف شده و آلیاژ در دمای میانی و سرعت کرنش‌های پایین (900°C و $0/001\text{ s}^{-1}$) ناپایدار شده است. برای مناطق پایداری، همین روند برای کرنش 0/6 مشهود است. به گونه‌ای که در نرخ کرنش پایین ($0/001\text{ s}^{-1}$) در دمای 950°C به بعد و در نرخ کرنش بالا ($0/3\text{ s}^{-1}$) از دمای 750°C به بعد ماده پایدار است.

نکته‌ی قابل تأمل دیگر در کرنش 0/6 به وجود آمدن مناطق پایدار در دمای 800°C در نرخ کرنش‌های بالا می‌باشد؛ روندی که در کرنش‌های 0/3، 0/4 و 0/5 دیده نمی‌شود. در کرنش 0/6 در نرخ کرنش بالا ($0/3\text{ s}^{-1}$ و $0/1\text{ s}^{-1}$) از دمای 720°C به بعد مناطق پایدار وجود دارند که از مناطق بهینه و مناسب برای تغییر شکل می‌باشد. بنابراین بهترین مناطق برای تغییر شکل در کرنش 0/6 در سه ناحیه با دمای 800°C و نرخ کرنش $0/3\text{ s}^{-1}$ ، دمای 1050°C و نرخ کرنش $0/001\text{ s}^{-1}$ و دمای 1050°C و نرخ کرنش $0/3\text{ s}^{-1}$ می‌باشد.

در هر سه کرنش ذکر شده بهترین شرایط تغییر شکل داغ در سه نقطه با مختصات دما و نرخ کرنش به ترتیب (800°C و $0/001\text{ s}^{-1}$)، (1050°C و $0/001\text{ s}^{-1}$)، (1000°C و $0/3\text{ s}^{-1}$) می‌باشد؛ و در مقابل نامطلوب ترین شرایط تغییر شکل داغ در سه نقطه با مختصات دما و نرخ کرنش به ترتیب (600°C و $0/001\text{ s}^{-1}$)، (600°C و $0/3\text{ s}^{-1}$)، (900°C و $0/3\text{ s}^{-1}$) است.

4- فهرست علائم

- d میزان جابجایی فکها (mm)
- F نیرو (N)
- r_0 شعاع اولیه نمونه (mm)

درمی‌یابیم که در تمامی کرنش‌ها مناطق سفید رنگ (m منفی) یعنی مناطق ناپایدار وجود دارد و روند کلی برای تمام کرنش‌ها یکسان است؛ از طرف دیگر تمام m ها کمتر از 1 است و با افزایش کرنش، اولاً مناطق ناپایدار گسترده‌تر شده و ثانیاً مناطق پایدار تغییرات محسوسی دارند. در سه کرنش 0/3، 0/4 و 0/5 مناطق ناپایدار مربوط به دماهای پایین و نرخ کرنش‌های $0/001\text{ s}^{-1}$ و $0/3\text{ s}^{-1}$ است. این ناپایداری در دماهای میانی و نرخ کرنش $0/3\text{ s}^{-1}$ نیز دیده می‌شود. این در حالی است که مناطق پایدار در این سه کرنش مربوط به دماهای بالا و نرخ کرنش‌های $0/001\text{ s}^{-1}$ و $0/3\text{ s}^{-1}$ و دماهای میانی و نرخ کرنش $0/001\text{ s}^{-1}$ می‌باشد. به بیان دیگر در سرعت کرنش‌های پایین، پایداری از دمای 750°C به بالا رخ می‌دهد و در سرعت کرنش‌های بالا پایداری از دمای 950°C به بالا حاصل می‌شود. نکته قابل توجه این است که با افزایش کرنش مختصات ناپایداری دیگری در کرنش 0/4 ظاهر می‌شود و در کرنش‌های بعدی گسترش می‌یابد، به گونه‌ای که در کرنش 0/6 مناطق ناپایداری نسبت به سه کرنش قبل متمایز است (شکل‌های 11 تا 13).

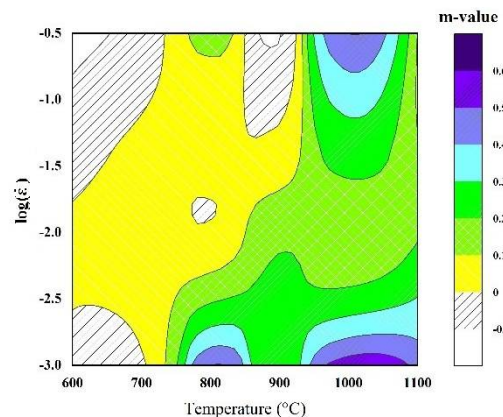


Fig. 11 m نقشه 11 نقشه m در کرنش 0/4 برای فولاد زنگ نزن دوفازی 2205

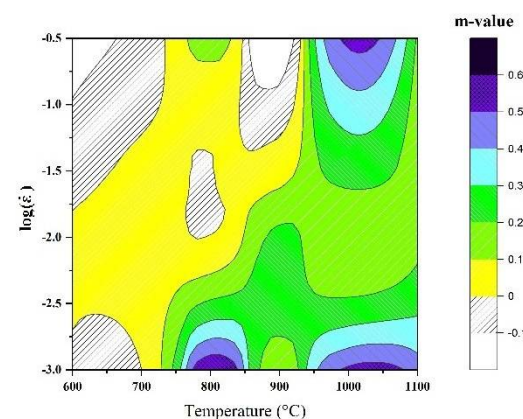


Fig. 12 m نقشه 12 نقشه m در کرنش 0/5 برای فولاد زنگ نزن دوفازی 2205

6- مراجع

- [1] Maj, P., et al., Microstructure and mechanical properties of duplex stainless steel subjected to hydrostatic extrusion. *Materials characterization*, 2014. 93: pp. 110-118.
- [2] Peckner, D., I.M. Bernstein, and D. Peckner, *Handbook of stainless steels*. 1977: McGraw-Hill New York.
- [3] Gunn, R., *Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications*. 1997: Elsevier.
- [4] McQueen, H. and J. Jonas, Recovery and recrystallization during high temperature deformation, in *Treatise on Materials Science & Technology*. 1975, Elsevier. pp. 393-493.
- [5] Momeni, A., K. Dehghani, and X. Zhang, Mechanical and microstructural analysis of 2205 duplex stainless steel under hot working condition. *Journal of Materials Science*, 2012. 47(6): pp. 2966-2974.
- [6] Mirzadeh, H., J.M. Cabrera, and A. Najafzadeh, Modeling and prediction of hot deformation flow curves. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012. 43(1): pp. 108-123.
- [7] Y.V.R.K. Prasad, K.P. Rao, S. Sasidhara, *Hot Working Guide- A Compendium of Processing Maps*, 2015, ASM International.
- [8] Poletti, C., et al., Hot deformation behaviour of low alloy steel. *steel research international*, 2011. 82(6): pp. 710-718.
- [9] Kashiwar, A., et al., Effect of solution annealing temperature on precipitation in 2205 duplex stainless steel. *Materials Characterization*, 2012. 74: pp. 55-63.
- [10] Cabrera, J., et al., Hot deformation of duplex stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003. 143: pp. 321-325.
- [11] Farnoush, H., et al., Hot deformation characteristics of 2205 duplex stainless steel based on the behavior of constituent phases. *Materials & Design*, 2010. 31(1): pp. 220-226.
- [12] Prasad, Y. V. R. K., et al., Modeling of Dynamic Material Behavior in Hot Deformation, *Metall. Trans. A*, 1984, 15A, pp. 1883-1892.
- [13] S.V.S. Narayana Murty, B.N. Rao, On the dynamic material model for the hot deformation of materials, *J. Mater. Sci. Lett.* 18 (1999) 1757-1758.
- [14] S.V.S. Narayana Murty, B.N. Rao, B.P. Kashyap, On the hot working characteristics of 6061Al-SiC and 6061-Al₂O₃ particulate reinforced metal matrix composites, *Compos. Sci. Technol.* 63 (2003) 119-135.
- [15] Niraj Nayan, et al, Hot workability and microstructure control in Monel®400 (Ni-30Cu) alloy: An approach using processing map, constitutive equation and deformation modeling, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 825, 2021, 141855.
- [16] Cizek, P., B. Wynne, and W. Rainforth, EBSD investigation of the microstructure and texture characteristics of hot deformed duplex stainless steel.

T دما (K)

h ارتفاع لحظه‌ای نمونه (mm)

h₀ ارتفاع اولیه نمونه (mm)

n توان تنش

Q انرژی فعال‌سازی (kJ.mol⁻¹)

m ضریب حساسیت به نرخ کرنش

Z پارامتر زنر- هولمن

R² پارامتر انطباق

R ثابت جهانی گازها

علایم یونانی

σ تنش حقیقی (MPa)

ε کرنش حقیقی

ε̇ نرخ کرنش (s⁻¹)α ضریب تنش (MPa⁻¹)σ_p تنش سیلان حقیقی در نقطه پیک (MPa)

5- نتیجه‌گیری

- به کمک آنالیز تنش سیلان در آزمون فشار داغ، رفتار مکانیکی فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 مدل شد.

- به منظور آنالیز تنش سیلان از یک رابطه سینوس‌های پربولیکی برای پارامتر زنر- هولمن استفاده شد.

- از روش ترسیمی جهت بدست آوردن پارامترهای زنر- هولمن استفاده شد و صحت و دقت این ثوابت با رسم منحنی ln z برحسب ln(sinh(ασ_p)) تایید گردید.

- از آنجا که یک پارامتر مناسب در جهت بررسی شکل‌پذیری داغ آلیاژها می باشد، ابتدا مقدار m بر حسب دما در کرنش‌های مختلف برای فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 رسم شد و سپس نقشه m در دماهای مختلف و نرخ کرنش‌های مختلف ترسیم گردید.

- نقشه m نشان دهنده پایداری فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 در سه ناحیه با دمای 800°C و نرخ کرنش 0/001 s⁻¹، دمای 1050°C و نرخ کرنش 0/001 s⁻¹ و دمای 1050°C و نرخ کرنش 0/3 s⁻¹ می‌باشد.

6- نقشه m نشان دهنده ناپایداری فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 در سه ناحیه با دمای 600°C و نرخ کرنش 0/001 s⁻¹، دمای 600°C و نرخ کرنش 0/3 s⁻¹ و دمای 900°C و نرخ کرنش 0/3 s⁻¹ می‌باشد.

- Equation and Thermo-Mechanical Processing Map for Pure Iridium, *Metals* 2020, 10(8), p. 1087.
- [24] Zhang, J., et al. Hot deformation behavior of Ti-15-3 titanium alloy: a study using processing maps, activation energy map, and Zener-Hollomon parameter map. *Journal of Materials Science* 47, pp. 4000-4011 (2012).
- [25] Mozumder, Y.H., Babu, K.A. & Mandal, S. Compressive Flow Behaviour and Deformation Instabilities of Fe-Mn-Al-Ni-C Lightweight Duplex Steel. *Trans Indian Natl. Acad. Eng.* 5, 465-474 (2020).
- [26] Xiaohui Wang, et al, Hot deformation characterization of ultrahigh strength stainless steel through processing maps generated using different instability criteria, *Materials Characterization*, Volume 131, 2017, pp. 480-491.
- [27] A. Sarkar, et al, Hot deformation behavior of Nb-1Zr-0.1C alloy in the temperature range 700-1700°C, *Journal of Nuclear Materials*, Volume 422, Issues 1-3, 2012, pp. 1-7.
- [28] Liwei Zhong, et al, Hot deformation characterization of as-homogenized Al-Cu-Li X2A66 alloy through processing maps and microstructural evolution, *Journal of Materials Science & Technology* 35 (2019), pp. 2409-2421.
- Journal of microscopy*, 2006. 222(2): pp. 85-96.
- [17] Balázs Varbai, Timothy Pickle, Kornél Májlínger, Development and comparison of quantitative phase analysis for Duplex Stainless Steel Weld, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 62(3), pp. 247-253, 2018,
- [18] Momeni, A., S. Kazemi, and A. Bahrani, Hot deformation behavior of microstructural constituents in a duplex stainless steel during high-temperature straining. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2013. 20(10): pp. 953-960.
- [19] Yaohui Song, et al, Hot deformation behavior and microstructural evolution of 2205 duplex stainless steel, *Materials Research Express*, 2020, 7, 046510.
- [20] Poletti, C., et al., Hot deformation behaviour of low alloy steel. *steel research international*, 2011. 82(6): pp. 710-718.
- [21] Ziegler H., Some extremum principles in irreversible thermodynamics, with application to continuum mechanics. In: Sneddon IN, Hill R, editors, *Progress in solid mechanics*, vol. 4. New York: John Wiley and sons; 1963, pp. 93-191
- [22] Changmin Li, et al, Hot Deformation Behavior and Constitutive Modeling of H13-Mod Steel, *Metals* 2018, 8(10), p. 846.
- [23] Mi Zhou, et al, Determination of Constitutive