

مقایسه‌ی رفتار تغییر شکل گرم دو نوع فولاد زنگ نزن دوفازی ریختگی

محبوبه پویامنش^{۱*}، بیت اله اقبالی^۲، غلامرضا ابراهیمی^۳، محمد سعادت^۴

چکیده

در این پژوهش، رفتار در حین تغییر شکل گرم دو نوع فولاد زنگ نزن دوفازی ریختگی شده در مقیاس آزمایشگاهی و با درصد‌های گوناگون عناصر کروم، نیکل و مولیبدن مورد مطالعه قرار گرفته است. فولادها در سه دمای گوناگون ۹۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ °C با نرخ کرنش‌های ۰/۱ و $0/001 \text{ sec}^{-1}$ با استفاده از آزمون فشار گرم مورد تغییر شکل گرم قرار گرفتند. منحنی‌های سیلان بدست آمده از هر دو فولاد مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. نتایج بدست آمده بیانگر آن است که رفتار تغییر شکل گرم این دو فولاد به شدت تابع دما و نرخ اعمال کرنش می‌باشد. حساسیت نرخ کرنش (m) برای هر دو نوع فولاد تعیین شد که در محدوده‌ی دمایی ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ °C مقدار m برای فولاد C1 از ۰/۲۷ تا ۰/۲۳ و برای فولاد C2 از ۰/۰۹ تا ۰/۲۲ تغییر یافت. انرژی اکتیواسیون ظاهری در دماهای پایین و بالا برای فولاد C1، ۳۱۶ و ۳۷۵ kJ/mol و برای فولاد C2، ۷۸۰ و ۳۹۰ kJ/mol محاسبه گردید.

واژه‌های کلیدی: فولاد زنگ نزن دوفازی ریختگی، فشار گرم، ضریب حساسیت به نرخ کرنش و انرژی اکتیواسیون.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند.

۲- دانشیار مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند.

۳- استادیار مهندسی مواد، دانشگاه تربیت معلم سبزوار.

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند.

*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: m_estiri2000@yahoo.com

پیشگفتار

رفتار فلزات در حین تغییر شکل در دمای بالا پیچیده بوده و به شدت تابع فراسنج‌های فرایند از قبیل کرنش، نرخ کرنش و دما می‌باشد. در جریان تغییرشکل فلزات و آلیاژها در دماهای بالا معمولاً فرایندهای ترمیم دینامیکی با دو ساز و کار مهم بازیابی دینامیکی و تبلور دوباره دینامیکی می‌تواند در ریزساختار فلزات رخ دهد. وقوع این گونه تحولات ریزساختاری رفتار تغییرشکل فلز را به گونه‌ی قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌دهد [۱, ۲].

وقتی که یک آلیاژ دوفازی در دماهای بالا تغییرشکل داده می‌شود، رفتار کلی تغییرشکل آلیاژ به خصوصیات هر کدام از فازهای تشکیل دهنده از قبیل: خواص مکانیکی آن فازها، مقدار، مورفولوژی، اندازه و توزیع فاز دوم نیز بستگی پیدا می‌کند. تحقیقاً دیده شده است که مورفولوژی میکروساختار و کسر حجمی هر دو فاز، نقش مهمی را در فرایندهای تغییرشکل گرم ایفا می‌کند [۳, ۴].

تا به امروز مطالعات زیادی در خصوص رفتار تغییر شکل گرم فولادهای زنگ نزن دوفازی در شرایط کار شده^۱ صورت گرفته و نتایج آن منتشر شده است، اما در ارتباط با بررسی رفتار تغییر شکل این فولادها در شرایط ریختگی^۲ داده‌های زیادی در دسترس نیست. لذا، در این پژوهش، رفتار تغییر شکل گرم دو نوع فولاد زنگ نزن ریختگی با ترکیب شیمیایی گوناگون مطالعه شده است. هدف اصلی بررسی تاثیر فراسنج‌های فرایند تغییر شکل بر قابلیت کار گرم این فولادها بوده ضمن این‌که تاثیر ترکیب شیمیایی نیز بر رفتار تغییرشکل آن‌ها مقایسه شده است.

مواد و روش پژوهش

در این پژوهش، ابتدا دو نوع فولاد در مقیاس آزمایشگاهی و با مقادیر گوناگون کروم، نیکل و مولیبدن و با کنترل دقیق ترکیب شیمیایی در یک کوره‌ی القایی ذوب و در قالب‌های ماسه‌ای استاندارد Y بلوک ریخته‌گری شد که ترکیب شیمیایی آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در جدول یاد شده دو فولاد ریخته‌گری

شده با کدهای C1 و C2 نامگذاری شده‌اند و از این به بعد، در مورد هر کدام از آن‌ها از این نامگذاری استفاده می‌شود. سپس از فولادهای خام ریخته شده، نمونه‌های فشاری به شکل استوانه به قطر اولیه‌ی ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع اولیه‌ی ۱۵ میلی‌متر تهیه گردید. گفتنی است که پیش از آزمون فشار گرم، تمام فولادها در دمای 1250°C به مدت ۲ ساعت تحت عملیات حرارتی همگن‌سازی قرار گرفتند.

در مورد هر دو فولاد، نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در دمای 1350°C پیش‌گرم شده و سپس تا دمای تغییر شکل ($900, 1000, 1100^{\circ}\text{C}$) سرد شدند. پس از نگهداری نمونه‌ها به مدت ۱ دقیقه در دمای تغییرشکل، تحت فشار گرم با نرخ کرنش 0.1 و 1 sec^{-1} قرار گرفتند.

نتایج و بحث

همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، ریز ساختار فولادها پس از فرآیند همگن‌سازی دارای کسر حجمی گوناگونی از آستنیت و فریت می‌باشند. در شکل ۱ مشاهده می‌شود که در دمای اتاق کسر حجمی آستنیت در فولاد C2 بیش‌تر از فولاد C1 است. گفتنی است نسبت فریت به آستنیت در این فولادها با دما تغییر می‌کند [۴, ۵].

منحنی‌های سیلان فولادهای زنگ نزن دوفازی C1 و C2 در شکل ۲ نشان داده شده است. به خوبی از منحنی‌های سیلان مربوط به فولاد C1 (شکل ۲ الف) دیده می‌شود که تنش سیلان تا تنش بیشینه به سرعت افزایش یافته و سپس با افزایش کرنش، تغییری محسوس در آن صورت نگرفته است، اما مشاهده می‌شود که با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش (شکل ۲ ب)، منحنی‌ها یک پیک تنش تکی را نشان می‌دهند که در پی آن کاهش تدریجی تا کرنش حدود 0.7 ایجاد شده است. ملاحظه می‌گردد که عمدتاً پیک‌ها (شکل ۲ الف) با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش ظاهر شده‌اند. با مقایسه‌ی شکل‌های ۲(الف) و ۲(ب) نتیجه می‌شود که سطح تنش سیلان و تنش بیشینه در همه‌ی شرایط در فولاد C2

¹- As- Wrought

²-As-Cast

آستنیت در دو فولاد متفاوت است و دوم، کسر حجمی آستنیت در دماهای پایین و بالا تغییر می‌کند. مقدار m به دانسیته‌ی نابه‌جایی‌ها وابسته است. هر چه تحرک نابه‌جایی‌ها بیشتر باشد، مقدار m بالاتر است [۳]. در دماهای بالا، حذف نابه‌جایی‌ها و آرایش دوباره، یعنی بازیابی دینامیکی آن‌ها در فریت راحت‌تر صورت می‌گیرد، ولی در آستنیت بازیابی دینامیکی آهسته است و نابه‌جایی‌های بیشتری در هم قفل می‌شوند و تحرک کم‌تری دارند و در نتیجه، مقدار m پایین‌تری ایجاد می‌کنند. مقدار m در فولاد C1 با افزایش دما کاهش یافته است که این نتیجه با منحنی شکل ۳ نیز سازگار است زیرا با افزایش دما کسر حجمی آستنیت افزایش یافته است. در فولاد C2 کسر حجمی آستنیت با افزایش دما کاهش یافته است (شکل ۳)؛ مقدار m نیز با افزایش دما افزایش یافته است. مقادیر m در تمام محدوده‌ی دمایی در فولاد C1 کم‌تر از فولاد C2 می‌باشد که این تفاوت به دلیل اختلاف کسر حجمی فریت و آستنیت در دو فولاد می‌باشد.

با ترکیب مقادیر بدست آمده‌ی m و شیب حاصل شده از شکل ۵، انرژی اکتیواسیون ظاهری در دماهای پایین و بالا برای فولاد C1 به ترتیب 316 kJ/mol و 375 kJ/mol و برای فولاد C2 به ترتیب 780 kJ/mol و 390 kJ/mol محاسبه شد. تغییرات انرژی اکتیواسیون با دما در شکل ۶ آورده شده است. در مواد با انرژی نقص چیدن بالا مثل فریت، در دماهای بالا ساز و کار لغزش متقاطع و صعود نابه‌جایی‌ها به راحتی رخ می‌دهد. بنابراین، حذف و آرایش دوباره‌ی نابه‌جایی‌ها در اثر بازیابی دینامیکی منجر به مقاومت تغییرشکل پایین می‌شود [۳]. ولی آستنیت انرژی نقص چیدن پایینی دارد و سرعت اندک بازیابی دینامیکی منجر به تبلور دوباره‌ی دینامیکی می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که انرژی اکتیواسیون Q برای تبلور دوباره‌ی دینامیکی در مواد آستنیتی، بالاتر از بازیابی دینامیکی در آلیاژهای فریتی است. با توجه به این‌که فولاد C1 در مقایسه با فولاد C2 مقدار فریت بالاتری دارد، پایین بودن مقدار Q آن قابل توجیه می‌باشد.

بیش‌تر از فولاد C1 است که این امر به دلیل کسر حجمی بالاتر آستنیت در فولاد C2 نسبت به فولاد C1 می‌باشد. نرخ کرنش $\dot{\epsilon}$ و دمای تغییرشکل اغلب به وسیله‌ی فراسنج معروف زرن- هولومان بر اساس رابطه‌ی زیر به هم مربوط می‌شوند [۶]:

$$\dot{\epsilon} = \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

که Q و R به ترتیب انرژی اکتیواسیون و ثابت جهانی گازها می‌باشند. تغییر شکل مواد فلزی دمای بالا به وسیله‌ی اکتیواسیون حرارتی کنترل می‌شود. در واقع، انرژی اکتیواسیون، سد انرژی است که برای ایجاد تغییرشکل باید بر آن غلبه شود. در طول تغییر شکل گرم، بسته به این‌که میکروساختار فریتی یا آستنیتی در ساختار غالب باشد، انرژی اکتیواسیون (انرژی تغییر شکل گرم) تغییر می‌کند.

در یک کرنش مشخص، تنش سیلان و نرخ کرنش می‌توانند به صورت زیر با هم رابطه داشته باشند [۷]:

$$\sigma = c \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (2)$$

که c یک مقدار ثابت است. با دیفرانسیل‌گیری از معادله (۲)، مقدار m می‌تواند به صورت فرمول زیر بیان شود [۲، ۸، ۹]:

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \quad (3)$$

با ترکیب معادله‌های ۱-۳ رابطه‌ی زیر برای محاسبه‌ی Q بدست می‌آید [۲، ۸، ۹]:

$$Q = \frac{R}{m} \cdot \frac{\partial \ln \sigma}{\partial (1/T)} \quad (4)$$

شکل ۴ تغییرات تنش سیلان با نرخ کرنش را در منطقه‌ی حالت پایدار منحنی تنش-کرنش حقیقی برای دو فولاد C1 و C2 نشان می‌دهد. مقدار m (ضریب حساسیت به نرخ کرنش) شیب منحنی می‌باشد و برای فولاد C1 با افزایش دما از 900°C به 1100°C به ترتیب از 0.268 تا 0.226 و برای فولاد C2 از 0.096 تا 0.219 تغییر کرده است. تفاوت در مقدار m در هر دو فولاد و همچنین، اختلاف این مقدار در دماهای پایین و بالا به این دلیل است که نخست، کسر حجمی فریت و

Metallurgical and Materials Transactions A, 2002. 33(7): p. 1931-1938.

3- H. Farnoush., A. Momeni., K. deghani., J. Aghazadeh Mohandesi., and H. Keshmiri., "Hot deformation characteristics of 2205 duplex stainless steel based on the behavior of constituent phases". Materials & Design. 31(1): p. 220-226.

4- P. Mao., K. Yang., and G. Su., "Hot deformation behavior of an as-cast duplex stainless steel". Cailiao Kexue Yu Jishu (Journal of Materials Science & Technology) (China), 2003. 19: p. 379-381.

5- O. Balancin., W.A.M. Hoffmann., and J.J. Jonas., "Influence of microstructure on the flow behavior of duplex stainless steels at high temperatures". Metallurgical and Materials Transactions A, 2000. 31(5): p. 1353-1364.

6- F.J. Humphreys., and M. Hatherly., "Recrystallization and related annealing phenomena". 2004: Pergamon Pr.

7- W.F. Hosford., and R.M. Caddell., I. Books24x., "Metal forming: mechanics and metallurgy". 2007: Cambridge University Press.

8- J. Luo., "Effect of the strain on the deformation behavior of isothermally compressed Ti-6Al-4V alloy". Materials Science and Engineering: A, 2009. 505(1-2): p. 88-95.

9- S. Bruschi., "Workability of Ti-6Al-4V alloy at high temperatures and strain rates". Materials Letters, 2004. 58(27-28): p. 3622-3629.

نتیجه‌گیری

۱- با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش در هر دو فولاد C1 و C2 تبلور دوباره‌ی دینامیکی رخ می‌دهد.

۲- با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش در هر دو فولاد C1 و C2 تبلور دوباره‌ی دینامیکی رخ می‌دهد.

۳- مقدار ضریب حساسیت نرخ کرنش (m) در دماهای پایین و بالا برای فولاد C1 به ترتیب ۰/۲۶۸ و ۰/۲۲۶ و برای فولاد C2 ۰/۰۹۶ و ۰/۲۱۹ محاسبه شد.

۴- انرژی اکتیواسیون ظاهری (Q) در دماهای پایین و بالا برای فولاد C1 به ترتیب ۳۱۶ kJ/mol و ۳۷۵ kJ/mol و برای فولاد C2 به ترتیب ۷۸۰ kJ/mol و ۳۹۰ kJ/mol بدست آمد که در فولادهای زنگ نزن دوفازی، نیرو محرکه تغییر شکل گرم می‌باشد.

۵- مقدار Q برای فولاد C2 نسبت به فولاد C1 بیش‌تر است که این اختلاف به کسر حجمی بالاتر آستنیت در فولاد C2 مربوط می‌باشد.

منابع

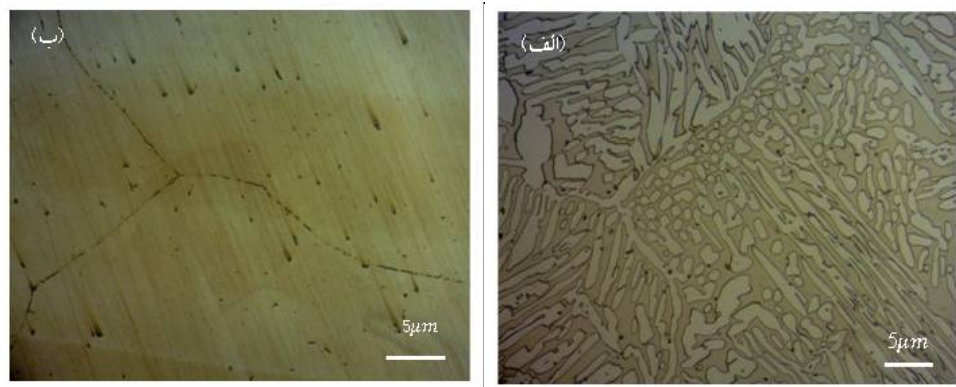
1- P. Cizek., and B.P. Wynne., "A mechanism of ferrite softening in a duplex stainless steel deformed in hot torsion". Materials Science and Engineering A, 1997. 230 (1-2): p. 88-94.

2- L. Duprez., B.C. De Cooman., and N. Akdut., "Flow stress and ductility of duplex stainless steel during high-temperature torsion deformation". Metallurgical and deformation".

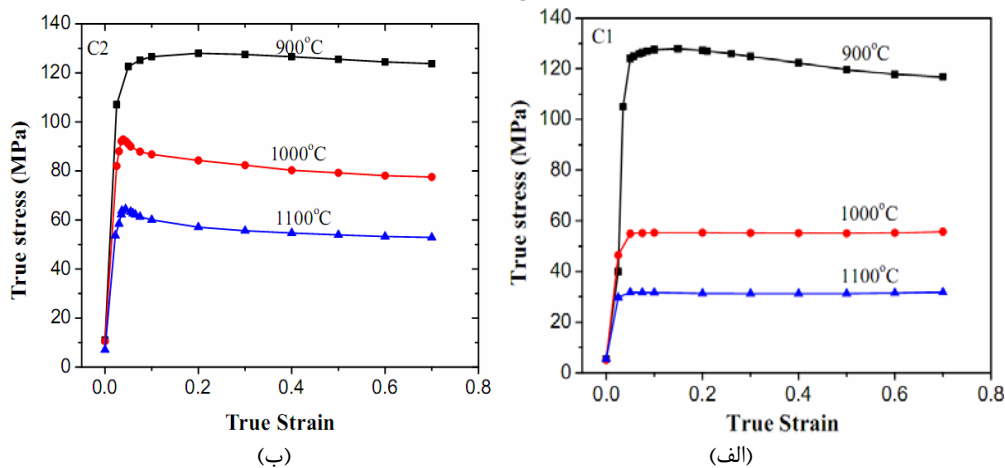
پیوست‌ها

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولادهای مورد استفاده.

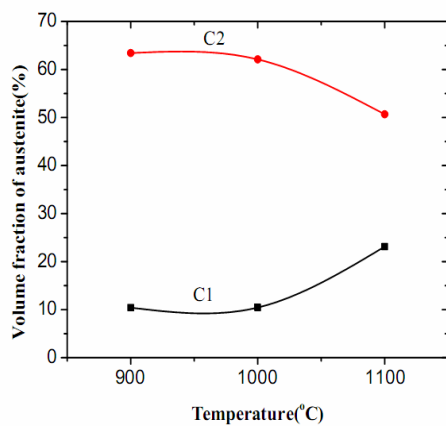
فولاد	%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Si	%N	%Nb	%Mn	%Cu	%Ti	Cr _{eq} /Ni _{ea}
C1	۰/۰۸	۲۷/۹۰	۳/۳۹	۱/۵۹	۰/۴۰	۰/۰۶	۰/۰۶	۱/۱۲	۰/۳۷	۰/۰۰۴	۴/۶
C2	۰/۰۷	۲۰/۷۶	۶/۴	۲/۸	۰/۲۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۶۷	۰/۳۷	۰/۰۰۴	۲/۶



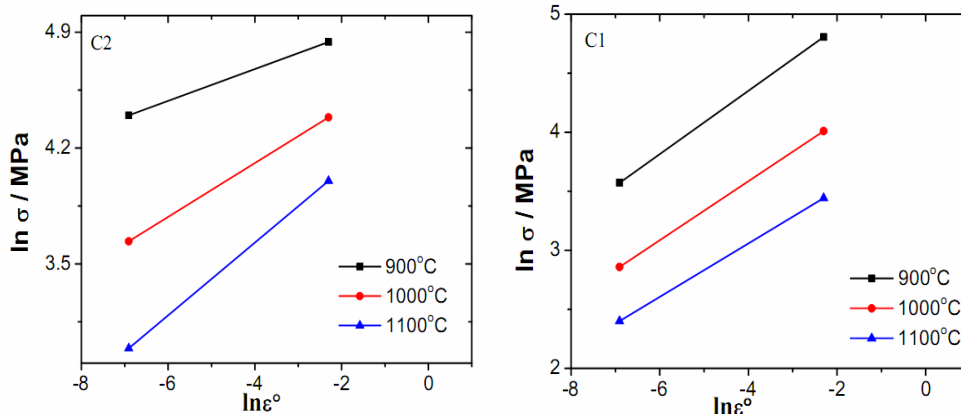
شکل ۱- ریزساختار نمونه‌های همگن شده (الف): فولاد C2 (ب): فولاد C1.



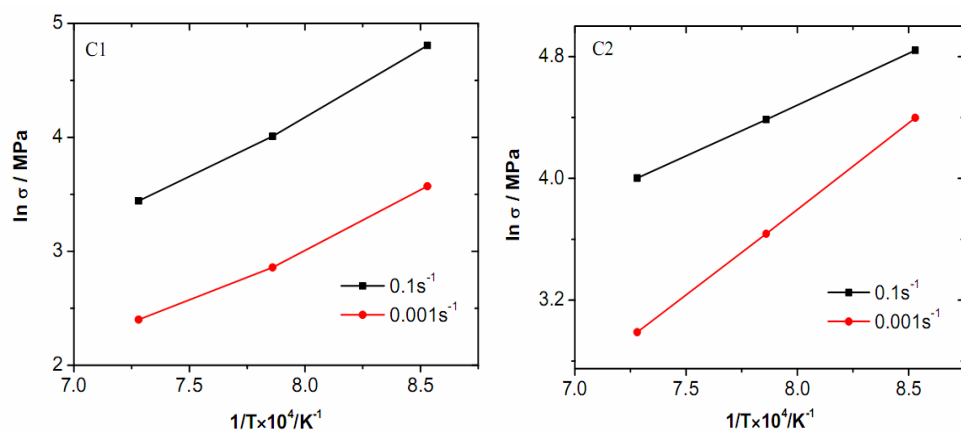
شکل ۲- منحنی‌های تنش حقیقی- کرنش حقیقی فولادهای C1 و C2 حاصل از تغییر شکل گرم در دماهای گوناگون با نرخ کرنش $\dot{\epsilon} = 0.1s^{-1}$.



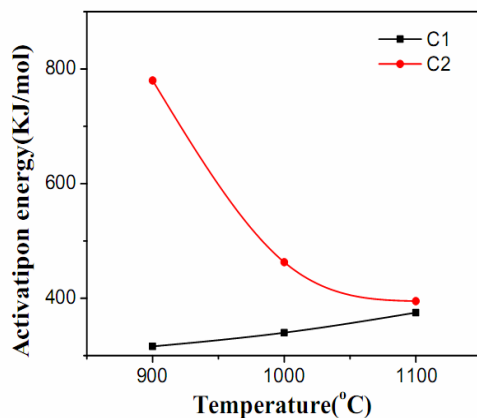
شکل ۳- وابستگی کسر حجمی آستنیت به دما برای دو فولاد C1 و C2 پیش از آزمون فشار گرم.



شکل ۴- تغییرات تنش سیلان با نرخ کرنش برای فولادهای C1 و C2.



شکل ۵- تغییرات تنش سیلان با دمای تغییر شکل برای فولادهای C1 و C2.



شکل ۶- تغییرات انرژی اکتیواسیون با دما برای فولادهای C1 و C2.

C2