بررسی تاثیر مولیبدن بر روی دمای آنیل کامل فولاد TWIP

سید غلامرضا رضوی*[۱]، محسن سبکتکین[۱]، حسین مناجاتی زاده[۲] و محمدرضا طرقی نژاد[۳]

چکیده

فولادهای TWIP، فولادهایی با درصد منگنز بالا (۳۵-۱۷ درصد) هستند که در بدنه‌ی خودرو بکار می‌رود و در دمای اتاق نیز آستنیتی بوده و سازوکار غالب تغییر شکل در آن‌ها به دلیل کمبود انرژی در چیده شدن پایین، ایجاد دوقلویی در داخل دانه‌هاست که سبب استحکام بیش‌تر در فولاد می‌شود. با توجه به نقش عملیات حرارتی در ویژگی‌های مکانیکی فولادهای TWIP، در این پژوهش به بررسی عملیات حرارتی آنیل کامل و تاثیر مولیبدن بر دمای آنیل کامل این فولادها پرداخته شده است. بدین منظور، فولاد پس از ریخته‌گری و نورد گرم، در دماهای گوناگون آنیل شده و سپس به کمک میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی و عبوری مورد مطالعه‌ی ساختاری قرار گرفت. نتایج نشان داد که دمای آنیل کامل این فولادها، بدون مولیبدن ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد بوده و افزودن مولیبدن به این فولادها دمای آنیل کامل را ۱۵۰ درجه‌ی سانتیگراد کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی : فولاد TWIP، آنیل کامل، دوقلویی آنیل، مولیبدن.

Archive of SID

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.
۲- استادیار گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.
۳- دانشیار گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان.
*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: Reza.Razavi64@gmail.com

www.SID.ir

پیشگفتار

فولادهای TWIP[1]، فولادهایی با درصد منگنز بالا (۳۵-۱۷درصد) هستند که ساختار آن‌ها به دلیل وجود منگنز بالا در دمای اتاق، آستنیتی می‌باشد. سازوکار غالب تغییر شکل در این فولادها به دلیل انرژی نقص در چیده شدن پایین که لغزش را مشکل می‌کند، دوقلویی شدن در داخل دانه‌هاست. ایجاد دوقلویی و میزان آن به دما و کرنش اعمالی روی فولاد بستگی دارد که هرچه بالاتر باشد، سبب می‌شود ساختار ریزتر شده و مرزهای دوقلویی، مشابه با مرز دانه‌ها فعالیت کنند که سبب استحکام بیش‌تر در فولاد می‌شود [۱]. این فولادها به دلیل داشتن دو ویژگی متضاد، یعنی استحکام و داکتیلیته‌ی بالا، مورد توجه صنایع خودروسازی قرار گرفته‌اند [۲]. برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی این فولادها دو راه عمده وجود دارد: ۱) استفاده از عناصر کاربیدزا بمنظور افزایش استحکام این فولادها: در این رابطه پژوهش‌ها نشان می‌دهد که افزودن مولیبدن به این فولادها در مقادیر کم، سبب افزایش ۵۰ درصدی استحکام شده است [۳]. هم‌چنین، افزودن نیوبیم نیز تاثیری بسزا در میزان استحکام این فولادها داشته است [۴].

۲) ریزکردن دانه‌ها برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی در مقدار ریزکردن دانه‌ها در فولادهای TWIP، نقش عملیات حرارتی از جمله: عملیات آنیل کامل دارای اهمیت است.

عملیات آنیل و هم‌چنین، دوقلویی‌های آنیلینگ بوجود آمده در حین عملیات حرارتی و تاثیر عناصر بر شروع و پایان دمای آنیل کامل و هم‌چنین، میزان دوقلویی‌های ناشی از آنیل بر استحکام فولادها توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است [۶و۵]. دوقلویی‌ها ممکن است در حین بازیابی و یا در زمان رشد دانه‌های تبلور دوباره یافته، تشکیل شوند [۸و۷]. عامل‌هایی مهم میزان دوقلویی‌های آنیل حین رشد را تحت تاثیر قرار می‌دهند که عبارتند از: میزان تغییر شکل اولیه پیش از آنیل، دما و زمان آنیل، اندازه‌ی دانه، انرژی مرزدانه، سرعت مهاجرت مرزدانه، انرژی نقص در چیده شدن، بافت و ناخالصی‌ها [۹].

[1] - TWinning Induced Plasticity

در این پژوهش تاثیر مولیبدن بر میزان دوقلویی‌های آنیل و هم‌چنین، تاثیر آن بر دمای آنیل کامل از نوع فولادهای TWIP مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش پژوهش

فولاد بکار رفته در این پژوهش با ترکیب شیمیایی نشان داده شده در جدول ۱، در کوره‌ی القایی در اتمسفر خنثی ریخته‌گری شده و سپس بمنظور حذف جدایش عناصر آلیاژی (بویژه منگنز و مولیبدن در مرزدانه‌ها) به مدت یک ساعت در دمای ۱۲۰۰ درجه‌ی سانتیگراد تحت عملیات همگن‌سازی قرار گرفت. سپس بمنظور اعمال کرنش حقیقی ۷۰ درصد عملیات نورد گرم در دمای ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد در پنج پالس پشت سر هم انجام گرفت و در نهایت، نمونه‌ها در هوا سرد شدند (دمای انتهایی نورد ۹۰۰ درجه‌ی سانتیگراد بود).

برای محاسبه‌ی دمای بهینه‌ی آنیل، نمونه‌هایی از سطح فولاد تهیه و به مدت ۱۰دقیقه در بازه‌ی دمایی ۵۵۰ تا $1200^{\circ}c$ در کوره نگه‌داری و سپس در هوا سرد شدند. سپس سختی نمونه‌ها بر اساس مقیاس راکول C در پنج نقطه، اندازه گیری و نتایج میانگین گزارش شد.

بمنظور بررسی ریزساختاری، نمونه‌ها با سنباده زنی، پولیش و حکاکی با نایتال ۵ درصد آماده‌سازی شدند و به وسیله‌ی میکروسکوپ نوری (Olympus CK40M) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (VEGA//Tescan) و عبوری (Philips CM200 200 kV) مورد بررسی قرار گرفتند. اندازه‌ی دانه‌ها از روی تصاویر میکروسکوپ نوری و بر اساس روش خطی محاسبه گردید. بدین منظور، از هر نمونه ۱۰ عکس تهیه شده و در هر عکس پنج خط با طول‌های متفاوت به گونه‌ای تصادفی انتخاب و اندازه‌ی دانه‌ها با استفاده از رابطه‌ی Jefree بر اساس معیار (ASTM-E112) محاسبه گردید. برای محاسبه‌ی درصد دوقلویی‌های آنیل در ساختار نیز از روش شمارش دو قلویی‌ها و محاسبه‌ی مساحت دوقلویی‌های آنیل استفاده شد. در روش شمارش دوقلویی‌ها با قرار دادن صفحه‌ای شطرنجی با ابعاد خانه‌های ۱۰×۱۰mm روی عکس‌های متالوگرافی با بزرگ‌نمایی ۱۵۰ برابر، نسبت خانه‌های دارای دوقلویی به تعداد کل خانه‌ها به‌عنوان درصد

Archive of SID

www.SID.ir

دوقلویی در ساختار گزارش شد. بدین منظور از هر نمونه و در هر دما ۱۰ عکس متالوگرافی به تصادف انتخاب شده و در نهایت، از مقادیر بدست آمده از ۱۰ عکس میانگین‌گیری شد. هم‌چنین، برای محاسبه‌ی مساحت دو قلویی‌های آنیل نیز به کمک نرم افزار Image Tools مساحت دوقلویی‌ها محاسبه گردید. از آن‌جایی که نتایج هر دو روش تقریبا با همدیگر هم‌خوانی داشت، در این پژوهش، نتایج بدست آمده از محاسبه‌ی درصد دوقلویی‌های آنیل گزارش شده است. هم‌چنین، آنالیز فازی نمونه‌ها به روش پراش پرتو ایکس به کمک دستگاه Bruker ساخت کشور آلمان در محدوده‌ی زاویه‌ای ۳۵ تا ۱۰۰ درجه و با استفاده از اشعه‌ی $K\alpha_{Cu}$ و فیلتر نیکلی در دمای محیط انجام شد.

نتایج و بحث

در شکل ۱، سیکل عملیات حرارتی آنیل برای نمونه‌های مورد آزمایش، نشان داده شده است. از آن‌جایی که فولاد مورد بررسی از خانواده‌ی فولادهای پرمنگنز آستنیتی می‌باشد و به دلیل داشتن منگنز بالا حتی در دمای محیط نیز آستنیتی است [۱۰]، تمامی نمونه‌ها در هوا سرد شده‌اند و سرد کردن در کوره، تنها سبب رشد بیش از حد دانه‌ها می‌شود.

در شکل ۲، تصاویر گرفته شده به کمک میکروسکوپ نوری از دو نمونه‌ی فولاد بدون مولیبدن و حاوی ۱/۳ درصد مولیبدن در دماهای گوناگون آنیل و در شکل ۳، منحنی درصد تشکیل دوقلویی‌های آنیل بر حسب دماهای مورد بررسی، نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش دما به تعداد دوقلویی‌های آنیل افزوده می‌شود به گونه‌ای که برای فولاد بدون مولبیدن، این افزایش تعداد دوقلویی‌ها تا دمای ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد ادامه یافته و بیش‌ترین تعداد دوقلویی‌های ناشی از عملیات حرارتی برای این فولاد در این دما محاسبه گردید، در حالی‌که برای فولاد حاوی ۱/۳ درصد مولیبدن، این افزایش درصد تعداد دوقلویی‌های آنیل تا دمای ۹۵۰ درجه‌ی سانتیگراد ادامه پیدا کرد و پس از آن از مقدار دو قلویی‌های آنیل کاسته شد. هم‌چنین، اندازه‌گیری اندازه‌ی دانه نیز بیان‌گر کاهش اندازه‌ی دانه با افزودن مولیبدن در ساختار است که با توجه به شکل ۲، به روشنی قابل مشاهده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مولیبدن سبب کاهش اندازه‌ی دانه می‌شود [۳]. هم‌چنین، آنالیز فازی نمونه‌ها بیان‌گر وجود فاز آستنیت در تمامی نمونه‌ها و دماهای مورد بررسی است. برای مثال، در شکل ۴، آنالیز فازی نمونه‌ها در دمای ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد نشان داده شده است.

بر اساس بررسی‌های انجام شده دوقلویی‌های آنیل در حین بازیابی و تبلور دوباره، شکل می‌گیرند و با وارد شدن ماده به ناحیه‌ی رشد، دانه‌ی دوقلویی‌های آنیل جدیدی بوجود نیامده و دوقلویی‌های ناشی از مراحل پیش رشد می‌کنند [۷و۸]. با توجه به نمودار شکل ۳، بنظر می‌رسد که برای نمونه‌ی بدون مولیبدن، دمای ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد و برای فولاد حاوی ۱/۳ درصد مولیبدن، دمای ۹۵۰ درجه‌ی سانتیگراد که پس از این دماها از میزان دو قلویی‌های آنیل در ساختار کاسته شده است، دمای آنیل کامل می‌باشد.

برای بررسی بیش‌تر، از نمونه‌های مورد آزمایش سختی گرفته شد که در شکل ۵، نتایج آن بر حسب دمای آنیل نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزودن مولیبدن به فولاد، سختی در تمامی دماهای آنیل افزایش یافته است، از آن‌جایی که مولیبدن عنصر کاربیدزای قوی است، می‌توان گفت که افزایش سختی به دلیل ایجاد کاربید است [۱۱و۸]. هم‌چنین، با مقایسه‌ی منحنی سختی نسبت به دمای آنیل برای دو نمونه‌ی مورد آزمایش می‌توان دریافت که دمای آنیل کامل فولاد حاوی مولیبدن حدود ۱۵۰ درجه کم‌تر از فولاد بدون آن است.

در شکل ۶، تصاویر گرفته شده به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی و تجزیه سطحی از دو عنصر مولیبدن و کربن برای فولاد بدون مولیبدن در دمای ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد و فولاد حاوی مولیبدن در دمای ۹۵۰ درجه‌ی سانتیگراد (دمای بدست آمده برای آنیل کامل این دو فولاد) نشان داده شده است. مشاهده شد که در نمونه‌ی حاوی مولیبدن، انباشته‌ای از عناصر کربن و مولیبدن پیرامون مرزدانه‌ها وجود دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که

Archive of SID

www.SID.ir

مولیبدن با ایجاد کاربید پیرامون مرزدانه‌ها از مهاجرت آن‌ها جلوگیری می‌کند و سبب می‌شود که زمان آنیل کامل کاهش یابد و هم‌چنین، سبب جلوگیری از رشد بیش از اندازه‌ی دانه‌ها می‌گردد [۱۲]. از آن‌جایی که مولیبدن نسبت به بقیه‌ی عناصر موجود در فولاد مورد آزمایش، کاربیدزای قوی‌تری است، این عنصر، کاربید چندگانه تشکیل نمی‌دهد [۱۳]. در شکل (الف-۷)، ریز ساختار نمونه‌ی حاوی ۱/۳ درصد مولیبدن و کاربیدهای تشکیل شده، مشخص شده است. نتایج بدست آمده از آنالیز نقطه‌ای به کمک TEM نشان داد که کاربیدهای تشکیل شده، از نوع $(Fe,Mo)_3C$ است.

نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر مولیبدن بر دمای آنیل کامل فولاد Fe-33Mn-3Si-2Al مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

۱- دمای آنیل کامل فولاد Fe-33Mn-3Si-2Al با توجه به دوقلویی‌های آنیل و سختی ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد می‌باشد.

۲- دمای آنیل کامل فولاد Fe-33Mn-3Si-2Al-1.3Mo ۹۵۰ درجه‌ی سانتیگراد می‌باشد.

۳- مولیبدن به دلیل کاربید تشکیل‌دهنده، دمای آنیل کامل این دسته از فولادها را ۱۵۰ درجه کاهش می‌دهد.

۴- مولیبدن سبب کاهش اندازه‌ی دانه‌ی فولاد Fe-33Mn-3Si-2Al می‌گردد.

منابع

1- R.E. Reed-Hill, R. Abbaschian, Physical metallurgy principles, PWS Co ,London, pp. 826-828, 1991.

2- P. Cugy, A. hildenbrand, M. Bouzekri, "A Super high strength Fe-Mn-C austenitic steel with excellent formability for automobile applications", Arcelor Research SA, maizieres, France, pp. 98-106, 2003.

۳- ر. رضوی، ح. مناجاتی، م. طرقی نژاد، "بررسی تاثیر مولیبدن بر ویژگی‌های مکانیکی و ریزساختار فولاد پرمنگنز-Fe-33Mn-3Si-2Al" ، چهارمین همایش مشترک متالورژی ایران، تهران، ۱۳۸۹.

4- B.X. Huang, X.D. Wang, Y.H. Rong, L. Wang, L. Jin, "Mechanical behavior and martensitic transformation of an Fe–Mn–Si–Al–Nb alloy", Materials Science and Engineering A 438–440, pp. 306–311, 2006.

5- B.B. Rath, M.A. Imam, C.S. Pande, "Nucleation and growth of twin interfaces in FCC metals and alloys", Materials Physics and Mechanic, Vol. 1, pp. 61-66, 2000.

6- Mi, Z., Tang, D., Yan, L., Guo, J., "High strength and high plasticity TWIP steel for modern vehicle", Mater. Sci. Technol., Vol. 21, No. 4, pp. 451-454, 2005.

7- G.E. Totten, Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies, 2ed CRC Press, London,, pp. 2-9, 1996.

8- S. Vercammen, B. Blanpain, B. C. De Cooman, P. Wollants, "Cold rolling behaviour of an austenitic Fe–30Mn–3Al–3Si TWIP-steel:the importance of deformation twinning " Acta Materialia, Vol. 52(7), pp. 2005-2012, 2004.

9- S. Mahajan, C.S. Pande, M.A. Imam, B.B. Rath, "Formation of annealing twins in f.c.c. crystals", Actamaterialia, Vol. 45, pp. 2633-2638., 1997.

10- O. Grassel, L. Kruger, G. Frommeyer, L. W. Meyer, "High strength Fe-Mn-(Al,Si) TRIP/TWIP steels development-properties-application", International Journal of Plasticity, Vol. 16, pp. 1391-1409, 2000.

11- George. E. Totten, Ph.D. Fasm, "Steel Heat treatment Handbook 2ed", Taylor & Francis, pp. 17-18, 2006.

12- I. Tamura, H. Sekine, T. Tanaka, C. ouchi, Thermomechanical processing of high-strength Low-alloy steel, Butterworth & Co, pp. 32-58, 1998.

13- H.O. pierson, Handbook of refractory carbides and nitrides, NOYES Co, Newjersey, pp. 100-112, 1996.

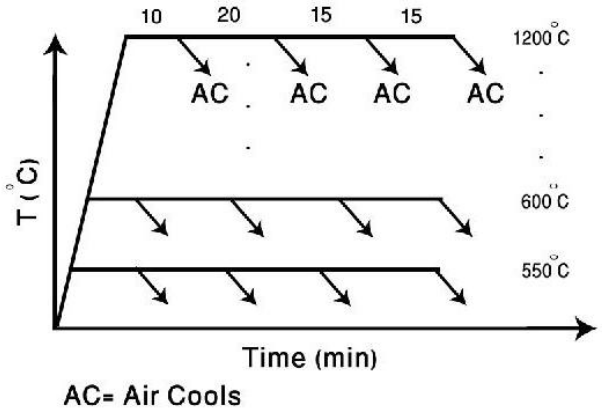
Archive of SID

www.SID.ir

پیوست‌ها

جدول۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده (درصد وزنی).

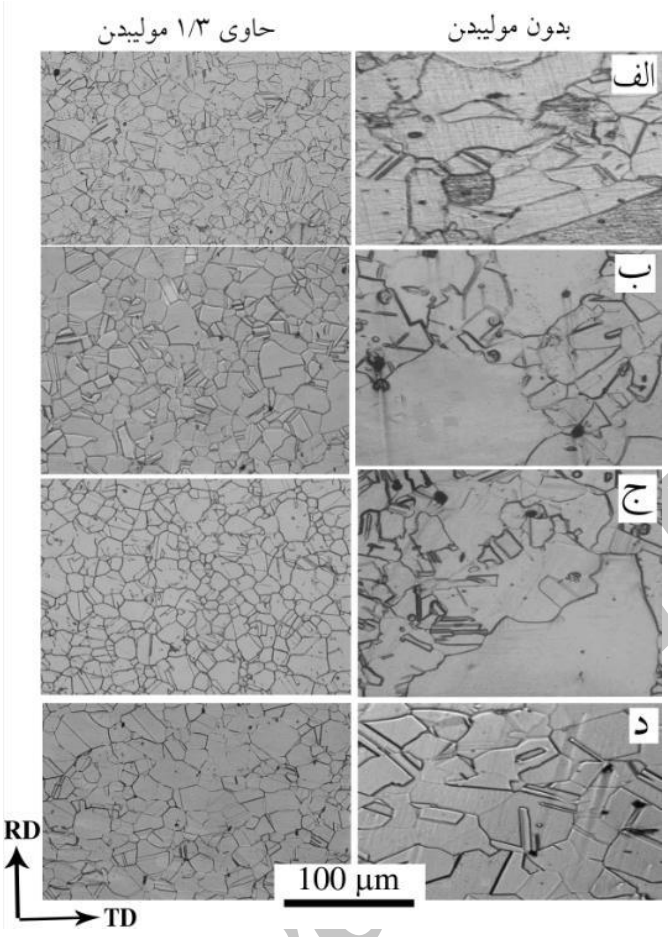
فولاد	C	Mn	Si	Al	Mo	Fe	S
۱	۰/۱۳	۳۲/۹	۳	۲	-	Bal.	<۰/۰۰۶
۲	۰/۱۳	۳۳	۳	۲	۱/۳	Bal.	<۰/۰۰۶



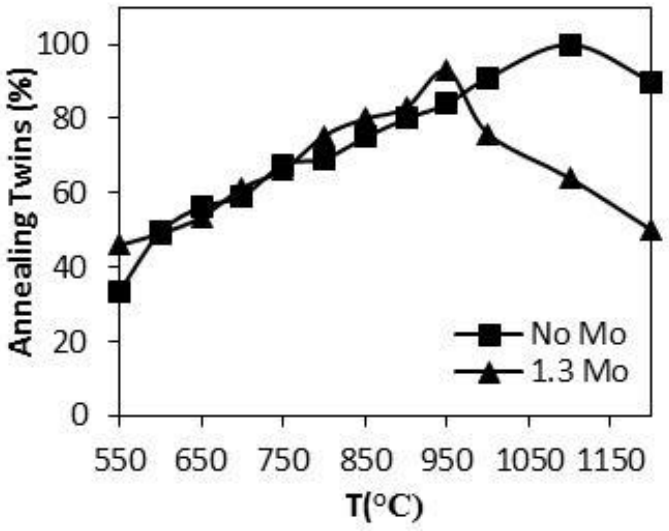
شکل ۱- سیکل عملیات حرارتی آنیل کامل برای نمونه‌های مورد آزمایش.

Archive of SID

www.SID.ir



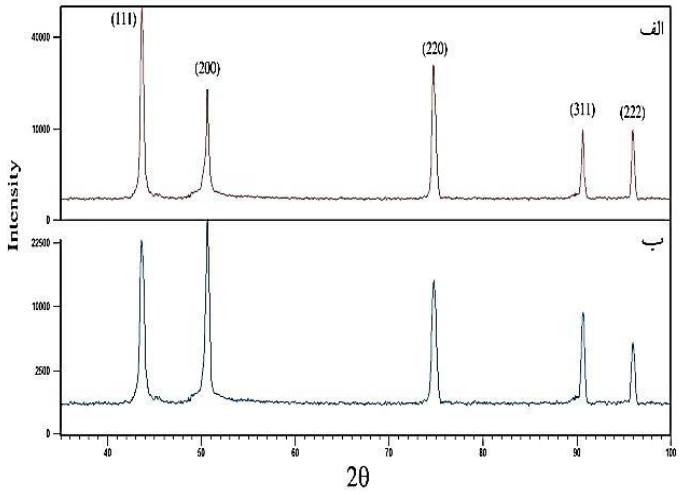
شکل ۲- ریزساختار فولاد بدون مولیبدن و حاوی ۱/۳ مولیبدن در دماهای گوناگون آنیل: الف) ۷۰۰°C، ب) ۸۵۰°C، ج) ۹۵۰°C، د) ۱۱۰۰°C.



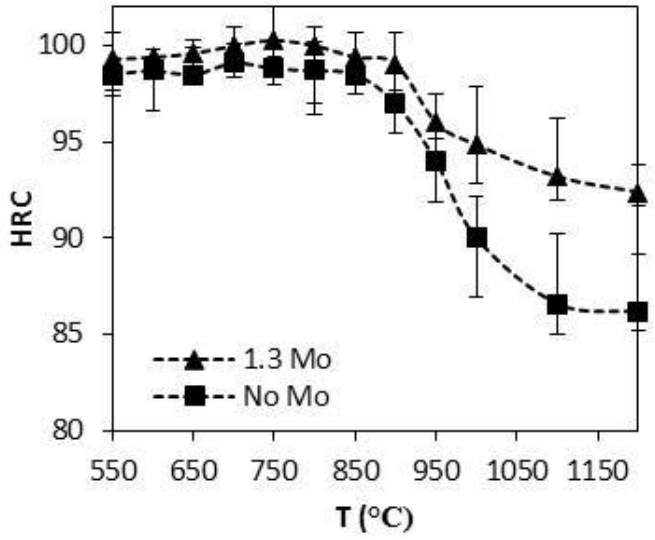
شکل ۳- منحنی تغییرات درصد دوقلویی‌های آنیل در ساختار با دما در زمان‌های گوناگون آنیل.

Archive of SID

www.SID.ir

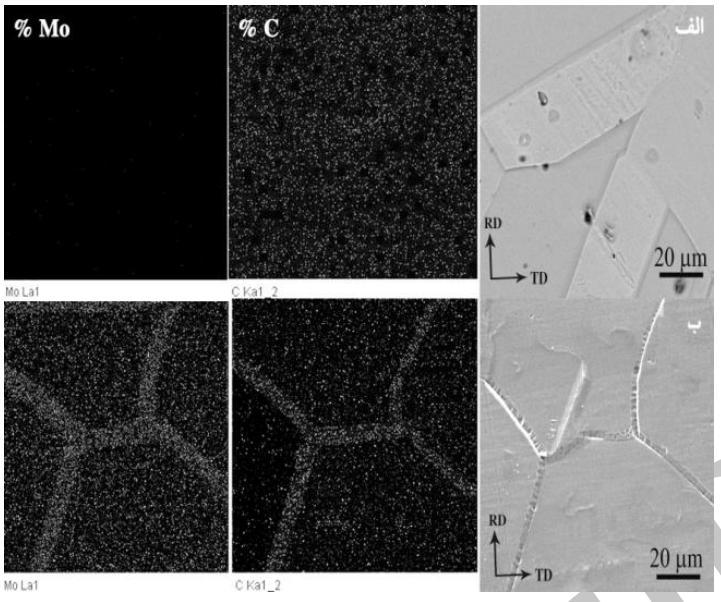


شکل ۴- آنالیز فازی از نمونه‌های مورد آزمایش در دمای ۱۱۰۰°C، الف) بدون مولیبدن، ب) حاوی ۱/۳ درصد مولیبدن.

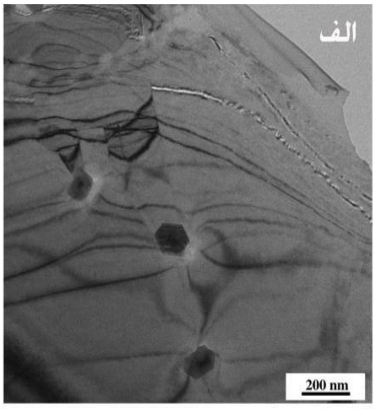


شکل ۵- منحنی تغییرات سختی بر حسب دمای آنیل برای نمونه‌های مورد آزمایش.

www.SID.ir



شکل ۶- ریزساختار و آنالیز سطح نمونه‌های آنیل شده در دماهای آنیل کامل، الف) بدون مولیبدن، ب) ۱/۳ درصد مولیبدن.



شکل ۷- ریز ساختار و کاربید مشاهده شده در نمونه‌ی حاوی ۱/۳ درصد مولیبدن.

Archive of SID

www.SID.ir