

تأثیر عملیات ترمومکانیکی بر ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی فولاد TWIP دارای مولیبدن

سید غلامرضا رضوی^{۱*}، امیر انصاری پور^۲ و حسین مناجاتی زاده^۳

چکیده

فولادهای TWIP، فولادهای با درصد منگنز بالا (۳۵-۱۷ درصد) مورد استفاده در بدنه‌ی خودرو هستند که در دمای اتاق نیز آستنیتی می‌باشند. سازوکار غالب تغییر شکل در این فولادها به دلیل کمبود انرژی در چیده شدن پایین، ایجاد دوقلویی در داخل دانه‌هاست که سبب استحکام بیشتر در فولاد می‌شود. در بین پژوهش‌های انجام شده برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی، افزودن عنصر کاربیدزا به این فولادها استحکام آنها را به‌طور چشمگیری افزایش داده است. از آنجایی که مولیبدن عنصری کاربیدزا و استحکام بخش در فولادها می‌باشد، در این پژوهش ریزساختار دسته‌ای از این فولادها با مولیبدن در حالت نورد گرم و سرد مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور پس از ریخته‌گری فولاد موردنظر، ریزساختار به کمک میکروسکپ نوری و الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با انجام نورد سرد بر این فولادها استحکام و داکتیلیته به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: فولاد TWIP، نورد گرم، نورد سرد، مولیبدن، ویژگی‌های مکانیکی.

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان، ایران.

۲- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، باشگاه پژوهشگران جوان، اصفهان، ایران.

۳- استادیار بخش مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان ایران.

* - ایمیل نویسنده مسئول: Reza.Razavi64@gmail.com

پیشگفتار

فولادهای پرمنگنز به‌عنوان نسل جدیدی از فولادهای AHSS^۱ معرفی شده‌اند. اگرچه پیش از پیدایش فولادهای پراستحکام و داکتیل، دسته‌ای از فولادهای پرمنگنز توسط Hadfield (در سال ۱۸۸۰ میلادی) کشف شده بودند، اما برای استفاده در صنعت خودرو در حالت نورد سرد شده مناسب نبودند [۱]. بدین منظور مطالعات گسترده‌ای توسط Schumann و Remy [۲] روی دیگرام فازی و سازوکارهای تغییر شکل فولادهای Fe-Mn-C انجام گرفت. همچنین، Arcelor و TKS [۳] نیز گروهی از فولادهای آلیاژی پرمنگنز را به‌عنوان فولادهای TWIP^۲ برای دست‌یابی به بهترین ویژگی‌های مکانیکی در کاربردهای صنعت خودرو توسعه دادند.

فولادهای TWIP، فولادهایی با ترکیب شیمیایی Fe-Mn-Al-Si هستند که به‌دلیل داشتن مگنز بالا (۳۵-۱۷ درصد) دارای زمینه آستنیتی حتی در دمای محیط بوده و تغییر شکل در آنها به‌وسیله‌ی دوقلوبی در داخل دانه‌ها رخ می‌دهد. ایجاد دوقلوبی و اندازه‌ی آن به نرخ کار سرد انجام شده روی فولاد بستگی دارد که هرچه بالاتر باشد، سبب ریزتر شدن ساختار می‌شود، زیرا باندهای دوقلوبی، مشابه با مرزدانه‌ها فعالیت می‌کنند که سبب استحکام بیشتر در فولاد می‌شود [۴]. در فولادهای TWIP استحکام فوق‌العاده بالا با شکل‌پذیری بالا همراه شده است [۴]. تشکیل دوقلوبی‌ها و یا انجام استحاله‌ی فازی با میزان SFE^۳ فاز آستنیت (γ_{fcc}) ارتباط دارد. SFE زیاد $[80 > \gamma_{FCC} > 20 \text{ mJ/m}^2]$ سبب ترغیب تشکیل دوقلوبی‌ها و SFE پایین $[\gamma_{FCC} < 20 \text{ mJ/m}^2]$ سبب انجام استحاله‌ی آستنیت به مارتنزیت ϵ و سپس مارتنزیت α می‌شود [۵].

در بین کارهای انجام شده برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی این فولادها، افزودن عنصر کاربیدزا استحکام آنها را به‌طور چشمگیری افزایش داده است [۶ و ۷ و ۸ و ۹]. در پژوهش انجام شده، تاثیر افزودن مولیبدن روی این فولادها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که

افزودن ۰/۳ درصد سبب افزایش ۵۰ درصدی استحکام در حالت نورد گرم این فولادها می‌گردد [۶ و ۷]. همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد که کاهش اندازه‌ی دانه نیز تاثیر بسزایی در بالا بردن استحکام این فولادها دارد [۱۰].

در این پژوهش، تاثیر عملیات نورد بر ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی دسته‌ای از فولادهای TWIP آلیاژی با ترکیب Fe-33Mn-3Si-2Al-1.3Mo مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش پژوهش

فولاد مورد استفاده در این پژوهش با ترکیب شیمیایی نشان داده شده در جدول ۱، در کوره‌ی القایی تحت اتمسفر خنثی ریخته‌گری شده و سپس به‌منظور حذف جدایش عناصر آلیاژی (به‌ویژه مگنز در مرزدانه‌ها) به‌مدت ۱ ساعت در دمای ۱۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تحت عملیات همگن‌سازی قرار گرفت. سپس عملیات نورد گرم در ۵ پاس پشت سر هم و به اندازه‌ی ۷۰ درصد روی آن انجام شد (دمای انتهایی نورد ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بود). همچنین، نورد سرد به اندازه‌ی ۵۰ درصد روی نمونه‌های نورد گرم شده صورت گرفت و درنهایت نمونه در هوا سرد شد. برای انجام آزمایش کشش در دمای محیط و با نرخ کرنش 10^{-3} s^{-1} ، نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM E8M-04 ماشین‌کاری شده و سپس در دستگاه کشش Instron4468 مورد آزمایش قرار گرفتند.

به‌منظور بررسی ریزساختاری، نمونه‌ها (سنباده‌زنی، پولیش، حکاکی با نایتال ۵ درصد) آماده‌سازی شده و به وسیله‌ی میکروسکوپ نوری (Olympus CK40M) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (VEGA/Tescan) مورد بررسی قرار گرفتند. برای بررسی اندازه‌ی دانه نیز از نرم‌افزار Image analyzer استفاده شد. همچنین، برای یکسان نمودن شرایط نمونه‌ها در هر دو حالت نورد گرم و سرد، هر دو نمونه در دمای آنیل کامل خود براساس پژوهش‌های انجام شده عملیات حرارتی شدند [۱۱ و ۱۲].

آنالیز فازی نمونه‌ها به‌روش پراش پرتو ایکس به‌کمک دستگاه Bruker ساخت کشور آلمان در محدوده‌ی زاویه‌ای ۳۵ تا ۱۰۰ درجه و با استفاده از اشعه‌ی $K_{\alpha} \text{Cu}$ و فیلتر نیکلی در دمای محیط انجام شد.

- 1- Advanced High Strength Steel
- 2- Twinning Induced Plasticity.
- 3- Stacking Fault Energy

نتایج و بحث

در شکل ۱، ریزساختار و آنالیز XRD فولاد پس از عملیات همگن‌سازی نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، ریزساختار دارای دانه‌های ناشی از عملیات همگن‌سازی با اندازه‌ی میانگین در حدود $180\mu\text{m}$ می‌باشد. بررسی‌های XRD نیز آستینیتی بودن زمینه را تایید می‌کند. همچنین، دوقلویی‌های آنیل بسیار اندک در ریزساختار فولادهای همگن شده مشاهده شده است. براساس بررسی‌های Vercammen و همکارانش، وجود دوقلویی‌های آنیل در ماده، نشان‌دهنده‌ی پایین بودن SFE در آن است [۸]. به‌همین دلیل، به‌نظر می‌رسد که مقدار SFE نمونه‌های همگن شده بالا باشد.

شکل ۲، ریزساختار و الگوی XRD نمونه را پس از نورد گرم نشان می‌دهد. به‌نظر می‌رسد که تبلور دوباره‌ی دینامیکی^۱ (DRX) در ساختارهای همگن‌سازی شده با دانه‌های درشت (شکل ۱) رخ داده است. با این حال، وقوع فرآیند DRX برای نمونه‌ها کامل نبوده و دانه‌های تازه به‌وجود آمده ابعاد متفاوتی دارند. همچنین، نتایج آنالیز فازی از نمونه‌های نورد گرم شده نیز زمینه‌ی تک‌فاز آستینیت را نشان می‌دهد.

شکل ۳، ریزساختار و آنالیز فازی از نمونه را پس از نورد سرد نشان می‌دهد. نتایج بررسی‌های ریزساختاری به‌کمک میکروسکپ الکترونی روبشی از سطح نورد شده‌ی نمونه، نشانگر شکسته شدن ریزساختار بر اثر نورد سرد می‌باشد. همچنین، در ریزساختار، دوقلویی مکانیکی ناشی از تغییر فرم مشاهده می‌شود. از آن‌جایی که در بعضی موارد، ظاهر مارتنزیت تشکیل شده در اثر تغییر شکل مشابه دوقلویی‌های مکانیکی می‌باشد، از XRD نیز برای تشخیص تحولات ریزساختاری استفاده گردید. ارزیابی‌های XRD پیدایش هیچ‌گونه فاز جدیدی را در ساختار نمونه‌ی مورد آزمایش نشان نمی‌دهد.

در شکل ۴، ریزساختار و پراکندگی عناصر مولیبدن و کربن برای نمونه نورد گرم و نورد سرد پس از آزمایش کشش نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص شده است، اندازه‌ی دانه پس از نورد سرد بسیار کاهش پیدا

کرده و به‌گونه‌ای که این کاهش در اندازه‌ی دانه در حدود ۹۰ درصد (از ۵۲ میکرون در حالت نورد گرم به ۳ میکرون در نورد سرد) می‌باشد. همچنین، در نمونه‌ی نورد گرم تجمعی از عناصر کربن و مولیبدن در اطراف مرزخانه‌ها مشاهده می‌شود. از آن‌جایی که مولیبدن عنصر کاربیدزای قوی می‌باشد، تجمع در اطراف مرزخانه‌ها، نشانگر ایجاد کاربید تشکیل شده از مولیبدن در نمونه‌ی نورد گرم می‌باشد [۱۲]. اما از آن‌جایی که در نمونه‌ی نورد سرد شده هیچ‌گونه تجمعی در اطراف مرزخانه‌ها مشاهده نشد و پراکندگی یکنواختی از عناصر کربن و مولیبدن در ریزساختار را شاهد هستیم، می‌توان گفت که کاربید تشکیل شده به‌گونه‌ی یکنواخت در ریزساختار پخش شده است که این موضوع سبب افزایش استحکام و داکتیلیته در نمونه‌ی نورد سرد شده است.

در شکل ۵، نمودار به‌دست آمده از آزمایش کشش در حالت نورد گرم و سرد نمونه نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص می‌باشد، استحکام نهایی و ازدیاد طول نهایی در نمونه‌ی نورد سرد شده نسبت به نمونه‌ی نورد گرم شده افزایش چشمگیری داشته است. به‌گونه‌ای که استحکام نهایی در نمونه‌ی نورد سرد نسبت به نمونه‌ی نورد گرم در حدود ۳۰ درصد (از 684 MPa در حالت نورد گرم به 983 MPa در حالت نورد سرد) و ازدیاد طول نهایی در نورد گرم نسبت به نورد سرد در حدود ۱۵ درصد (از ۵۹ در حالت نورد گرم به ۷۰ در حالت نورد سرد) افزایش یافته است.

همچنین، در شکل ۶ مشاهده می‌شود که در اثر اعمال بار مکانیکی در حالت نورد گرم، فاز مارتنزیت آلفا ناشی از تغییر شکل ایجاد شده است، در حالی که در نمونه‌ی نورد سرد، این فاز به‌وجود نیامده یا در صورت تشکیل، مقدار آن به حدی نیست که به‌کمک XRD شناسایی شود (از آن‌جایی که مشاهده‌ی فاز مارتنزیت آلفا در ریزساختار مشکل و نیاز به میکروسکوپ TEM است، از XRD برای تعیین این فاز استفاده شده است).

همان‌گونه که بیان شد، با کاهش اندازه‌ی دانه‌های آستینیت، مقدار مارتنزیت در ساختار کاهش پیدا می‌کند. تاثیر اندازه‌ی دانه‌های فاز مادر روی دمای شروع استحاله‌ی مارتنزیت توسط پژوهشگران بسیاری مورد

نتیجه گیری

در این پژوهش، تاثیر عملیات نورد بر ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی دسته‌ای از فولادهای TWIP آلیاژی با ترکیب Fe-33Mn-3Si-2Al-1.3Mo مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج زیر به دست آمد:

۱- نورد سرد سبب افزایش استحکام و داکتیلیته در این فولاد می‌گردد.

۲- افزودن مولیبدن سبب بهبود ویژگی‌های مکانیکی در حالت نورد سرد این فولاد می‌شود.

۳- با کاهش اندازه‌ی دانه از تشکیل مارتنزیت در این فولاد جلوگیری می‌شود.

مطالعه قرار گرفته است [۱۳ و ۱۴ و ۱۵]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مرزدانه‌ها می‌توانند مکان‌های مناسب‌تری در استحاله‌ی مارتنزیت باشند. زیرا مکان‌هایی هستند که دارای کمبود گسترده‌ای می‌باشند. اگر چه در بیشتر موارد، مرزدانه‌ها سبب استحکام فاز مادر (آستنیت) می‌شوند و براساس آن دمای شروع استحاله‌ی مارتنزیت را با کاهش اندازه‌ی دانه کاهش می‌دهند [۱۳ و ۱۴ و ۱۵].

افزون بر این، تعدادی از پژوهشگران تاثیر اندازه‌ی دانه‌ی آستنیت را روی SFE بررسی کرده‌اند. برای مثال بیان شده است که با کاهش اندازه‌ی دانه‌های آستنیت (به‌ویژه زیر ۳۰ میکرومتر)، در فولاد پرمنگنز SFE افزایش پیدا می‌کند و مانع استحاله‌ی مارتنزیت می‌شود [۱۶].

References:

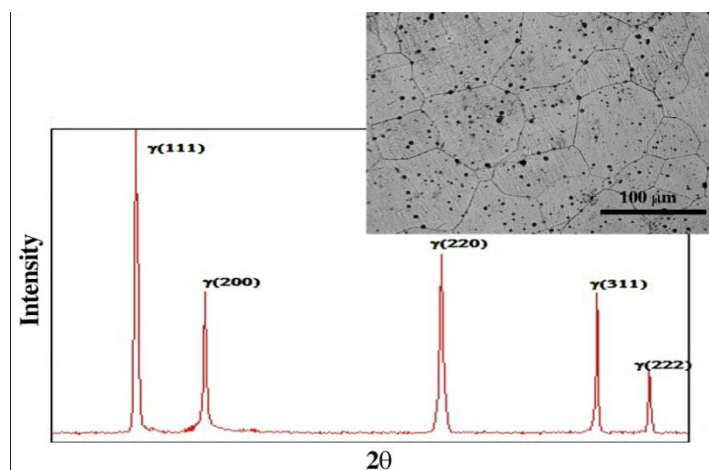
- 1- J Majta, R Kuziak, M Pietrzyk, H Krzton. "use of the computer simulation to predict mechanical properties of C-Mn steel. after thermomechanical processing", materials processing technology, Vol. 60, pp. 581-588, 1996.
- 2- K Sipos, L Remy, A Pineau. "Influence of austenite predeformation on mechanical properties and strain-induced martensitic transformations of a high manganese steel" metallurgical and materials transactions A, Vol. 7, pp. 857-864, 1976.
- 3- D Cornette, P Cugy, A Hildenbrand, M Bouzekri, G Lovato. "Ultra High Strength FeMn TWIP Steels for automotive safety parts", Revue de Metallurgic, Vol. 12, pp. 905-918, 2005.
- 4- Reed-Hill, Robert, E, Physical metallurgy principles, Publishing company, New York, 1994.
- 5- S Vercammen, B Blanpain, B C De Cooman. "cold rolling behavior of an austenitic Fe-30Mn-3Al-3Si TWIP-steel: the importance of deformation twinning", Acta Material, Vol. 52, pp. 2005-2012, 2004.
- ۶- ر. رضوی، ح. مناجاتی و م. طرقي نژاد، "بررسی تاثیر مولیبدن بر ویژگی‌های مکانیکی و ریزساختار فولاد پرمنگنز Fe-33Mn-3Si-2Al"، چهارمین همایش مشترک متالورژی ایران، تهران، ۱۳۸۹.
- ۷- ر. رضوی، ح. مناجاتی، م. طرقي نژاد و م. سبکتکین، "تاثیر مولیبدن بر سازوکار TWIP و TRIP در حین تغییر شکل پلاستیکی در فولاد Fe-33Mn-3Si-2Al"، سمپوزیوم آهن و فولاد ایران، اصفهان، ۱۳۸۹.
- 8- 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, Vol. 438, pp. 306-311, 2006.
- 9- J P Chateau, A Dumay, S Allain, A Jacques. "Precipitation hardening of a Fe-Mn-C TWIP steel by vanadium carbides". 15th International Conference on the Strength of Materials (ICSMA-15), 2011.
- 10- G Dini, A Najafizadeh, R Ueji, S M Monir-Vaghefi. "Tensile deformation behavior of high manganese austenitic steel: The role of grain size", Materials and Design, Vol. 31, pp. 3395-3402, 2010.
- ۱۱- ر. رضوی، ح. مناجاتی و م. طرقي نژاد "تاثیر مولیبدن بر ویژگی‌های مکانیکی فولاد TWIP"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، زمستان ۸۹.
- ۱۲- ع. باقری، ح. مناجاتی و م. طرقي نژاد " تاثیر مولیبدن بر نورد سرد و آنیل فولادهای TWIP"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، تابستان ۹۰.
- 13- B. H. Jiang, Xuan Qi, Weiming Zhou, T. Y. Hsu, "Comment on "influence of austenite grain size on $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensitic transformation temperature in Fe-Mn-Si-Cr alloys" Scripta Materialia, Vol. 34, pp. 771-773, 1996.
- 14- T.N. Durlu, "Effect of austenite grain size on ϵ martensite formation in an Fe-Mn-Mo alloy", Journal of Materials Science Letters, Vol. 16, pp. 320-321, 1997.
- 15- J. Jun, Ch. Choi, "Variation of stacking fault energy with austenite grain size and its effect on the M_s temperature of $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensitic transformation in Fe-Mn alloy", Materials Science and Engineering: A, Vol. 257, pp. 353-356, 1998.
- ۱۶- ق. دینی، ع. نجفی زاده، م. منیرواقفی و ر. یوجی " بررسی ریز ساختار و ویژگی‌های مکانیکی فولاد Fe-31Mn-3Si-TWIP در هنگام تغییر شکل سرد" پایان نامه دکتری، دانشگاه صنعتی اصفهان، پائیز ۸۹.

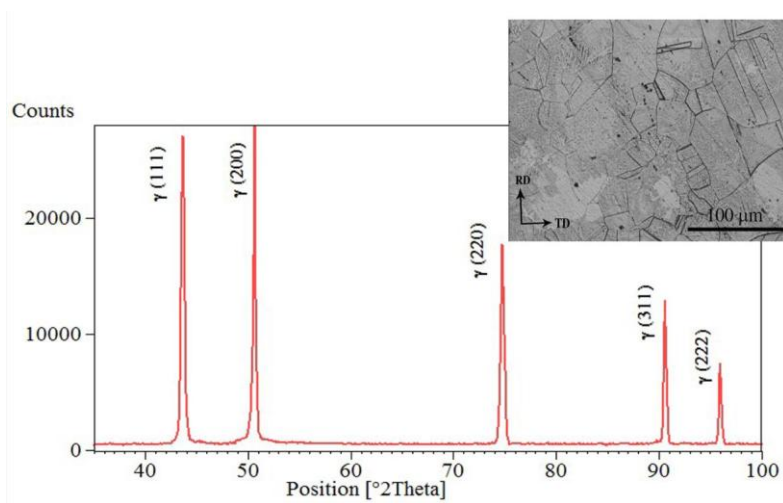
پیوست‌ها

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده (درصد وزنی)

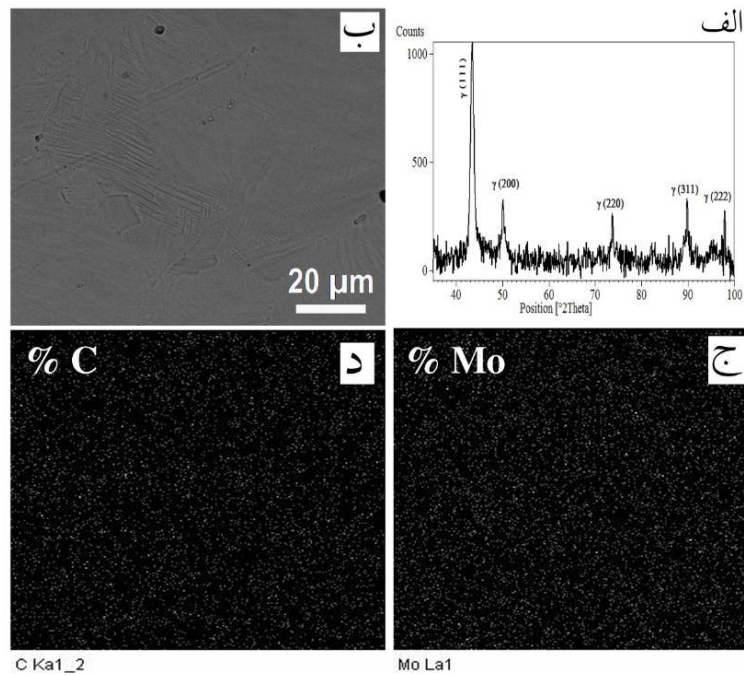
فولاد	C	Mn	Si	Al	Mo	Fe	S
۲	۰/۱۳	۳۳	۳	۲	۱/۳	Bal.	<۰/۰۰۶



شکل ۱- ساختار نمونه‌ی بدون مولیبدن همگن شده



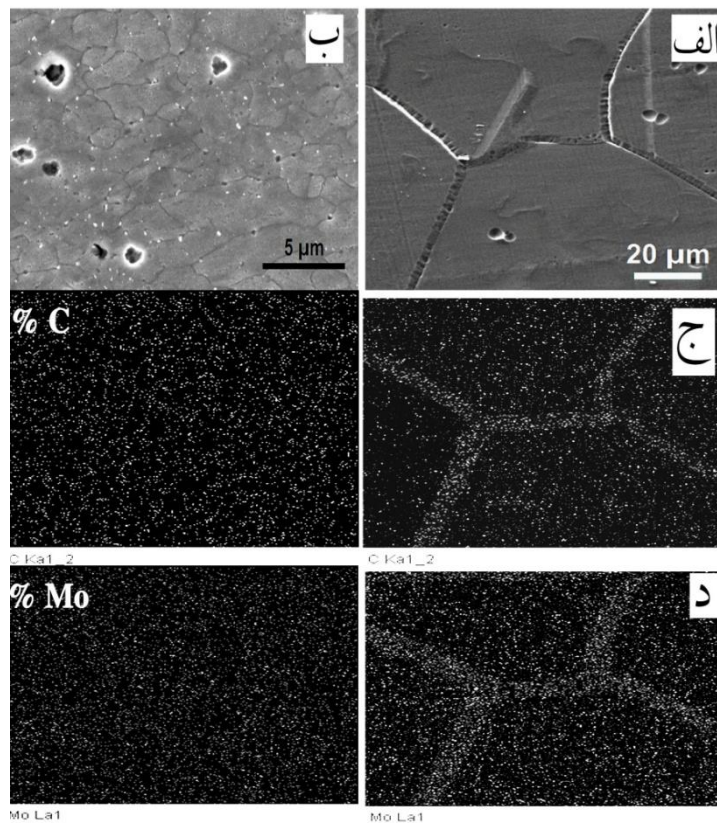
شکل ۲- ریزساختار و الگوی XRD در نمونه‌ی نورد گرم شده



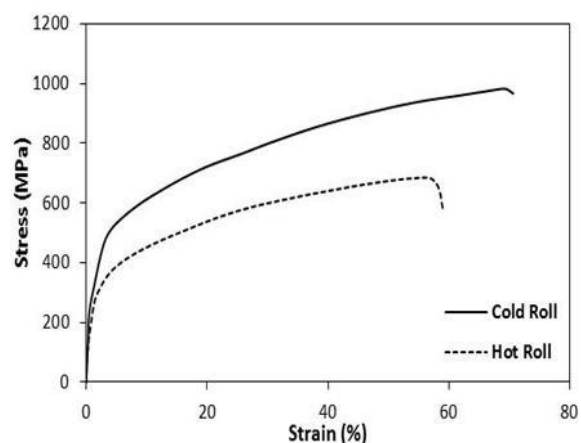
شکل ۳- نمونه‌ی دارای ۱/۳ درصد مولیبدن نورد سرد شده: الف- الگوی XRD، ب- ریزساختار، ج- پراکندگی عنصر کربن در ساختار، د- پراکندگی عنصر مولیبدن در ساختار

نورد سرد

نورد گرم

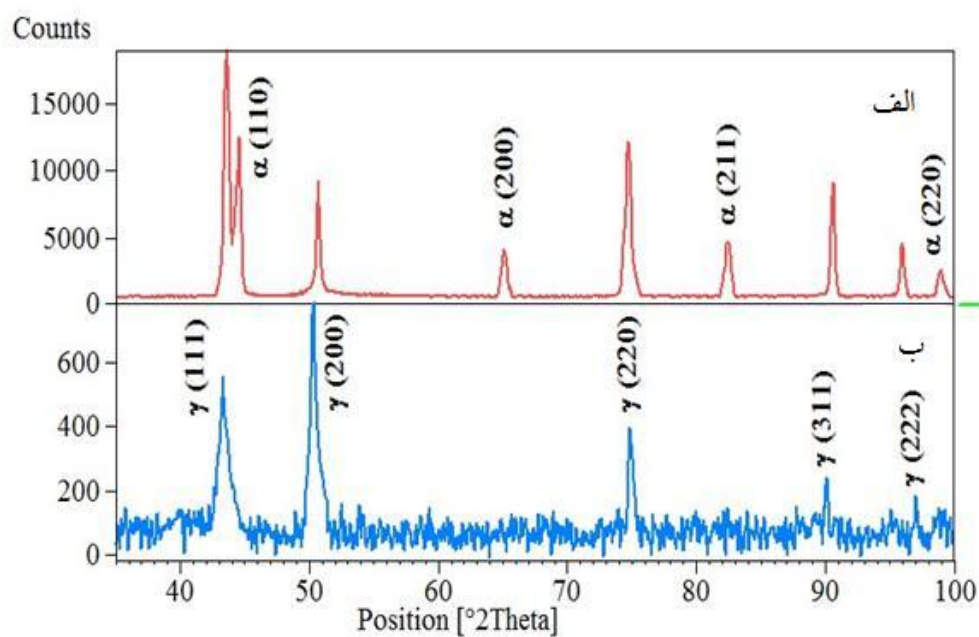


شکل ۴- ریزساختار نمونه‌ی دارای ۱/۳ درصد مولیبدن: الف- نورد گرم، ب- نورد سرد، ج- الگوی پراکندگی عنصر کربن در ریزساختار، د- الگوی پراکندگی عنصر مولیبدن در ریزساختار



	تنش تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	داکتیلیته
نورد گرم	۳۴۵	۶۸۴	۵۶/۵
نورد سرد	۴۹۸	۹۸۳	۶۹

شکل ۵- منحنی تنش- کرنش مهندسی برای نمونه‌ی بدون مولیبدن در حالت نورد گرم و نورد سرد



شکل ۶- آنالیز فازی از نمونه‌ی دارای ۱/۳ درصد مولیبدن: الف- نورد گرم، ب- نورد سرد