تاثیر مولیبدن بر روی خواص و ریز ساختار فولاد TWIP

سید غلامرضا رضوی*[1]، حسین مناجاتی زاده[2]، محمد رضا طرقی نژاد[3] و احمد رضائیان[4]
۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، دانشکده مهندسی مواد، اصفهان، ایران
۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، دانشکده مهندسی مواد، اصفهان، ایران
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
۴- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
*Reza.Razavi64@gmail.com
(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۸/۰۵، تاریخ پذیرش:۱۳۸۹/۱۱/۱۲)

چکیده
فولادهای TWIP گروه خاصی از فولادهای آستنیتی منگنز بالا هستند که بهترین ترکیب استحکام و داکتیلیته را در بین فولادهای مورد کاربرد در خودرو دارا می‌باشند. در این مقاله تاثیر افزودن مولیبدن بر بهبود خواص مکانیکی فولاد Fe-33Mn-3Si-2Al مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور درصدهای مختلف مولیبدن به ترکیب شیمیایی فولاد اضافه شده و پس از ریخته گری، نورد گرم و آنیل، خواص مکانیکی و ریزساختار و فازهای تشکیل شده در فولاد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزودن مولیبدن به فولاد، خواص مکانیکی بهبود پیدا می‌کند، لیکن بالاترین استحکام با مقدار مولیبدن ۰/۳ درصد حاصل شد که منجر به حدود ۵۰ درصد افزایش استحکام نهایی و حدود ۴۰ درصد کاهش در اندازه دانه گردید.

واژه‌های کلیدی:
فولاد پرمنگنز، دوقلویی، مولیبدن، خواص مکانیکی، کاربید.

Archive of SID

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر انواع مختلفی از فولادها برای کاربرد در صنعت خودرو توسعه یافته‌اند که باعث پیشرفت قابل توجهی در ایمنی، اقتصاد سوخت، مقاومت به ضربه و سایر خواص شده‌اند. با این حال ملاحظات ایمنی و افزایش رفاه باعث نیاز به تجهیزات جانبی شده است که می‌تواند در تضاد با اصل کاهش وزن خودرو قرار گیرد[۱].

فولادهای TRIP[1] به عنوان فولادهایی که سطوح استحکام بالا را با داکتیلیته بالا تلفیق می‌کنند، شناخته شده و بنابراین در صنایع خودرو مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند. پدیده پلاستیسیته القا شده در اثر استحاله شامل تشکیل مارتنزیت از آستنیت باقیمانده در اثر کرنش و اعمال تغییر شکل می‌باشد که منتهی به افزایش استحکام و داکتیلیته می‌گردد[۲]. در فولادهای TRIP، تحت تنشهای داخلی و یا خارجی، مارتنزیت ε(HCP) و α(BCC) در

www.SID.ir

شبکه (FCC)γ تشکیل می‌شود[۲]. اما استفاده از این فولادها در صنایع خودرو به دلیل وجود مقادیر زیاد عناصر آلیاژی گران قیمت مقرون به صرفه نبوده است. در نتیجه دسته‌ای دیگر از فولادهای پرمنگنز ابداع و مورد بررسی قرار گرفتند[۲].

فولادهای TWIP[۲] فولادهای با درصد منگنز بالا (۱۷-۳۵٪) هستند که در دمای اتاق نیز آستنیتی می‌باشند. به‌موجب این علت (آستنیته بودن) تغییر شکل در آنها به‌وسیله دوقلویی در داخل دانه‌ها رخ می‌دهد. ایجاد دوقلویی و میزان آن به نرخ سخت کردن فولاد بستگی دارد که هرچه بالاتر باشد باعث می‌شود ساختار ریزتر شود. در نتیجه باندهای دوقلویی، مشابه با مرز دانه‌ها فعالیت می‌کنند که منجر به استحکام بیشتر در فولاد می شود[۳]. در فولادهای TWIP استحکام فوق‌العاده بالا با شکل‌پذیری بالا تلفیق شده است[۳]. تشکیل دوقلویی‌ها و یا انجام استحاله فازی با میزان SFE[۳] فاز آستنیت (γ_{fcc}) ارتباط دارد. SFE زیاد $\left[80 > \gamma_{FCC} > 20mJ/m^2\right]$ موجب ترغیب تشکیل دوقلویی‌ها وSFE پایین $\left[\gamma_{FCC} < 20mJ/m^2\right]$ موجب انجام استحاله آستنیت به مارتنزیت ε و سپس مارتنزیت α می‌شود[۴].

تاثیر عناصر آلیاژی بر SFE، فاز آستنیت Fe-Mn هنوز به طور گسترده و دقیق مورد بررسی قرار نگرفته است. اما طبق بررسی های انجام شده مشخص شد که عناصر Cu و Al مقدار SFE آستنیت را به طور قابل توجهی افزایش می دهند. این در حالی است که Cr موجب کاهش SFE این فولاد می شود[۵]. اثر Si تا حدی پیچیده است، به طوری که افزودن این عنصر تا مقادیر کم (تقریبا تا ۴٪ وزنی) موجب افزایش SFE شده و با افزودن بیشتر آن، مقدار SFE کاهش می یابد[۶-۷].

در این تحقیق تأثیر عنصر آلیاژی مولیبدن بر روی خواص مکانیکی نوعی فولاد TWIP مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق:

فولاد مورد استفاده در این تحقیق با ترکیب شیمیایی نشان داده شده در جدول (۱)، در کوره القایی تحت اتمسفر خنثی ریخته‌گری شده و سپس به منظور حذف جدایش عناصر آلیاژی (خصوصاً منگنز در مرز دانه‌ها) به مدت ۱ ساعت در دمای ۱۲۰۰ °C تحت عملیات همگن سازی قرار گرفت. سپس عملیات نورد گرم در ۵ پاس متوالی به منظور اعمال کرنش حقیقی ۷۰ درصد روی آن انجام و در هوا سرد شد (دمای انتهایی نورد ۹۰۰ °C بود). پس از نورد گرم، به منظور آنیل کامل، نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۱۱۰۰ °C در کوره نگهداری و سپس در هوا سرد شدند.

جدول(۱): 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	۱/۹	۰/۳	Bal.	<۰/۰۰۶
۳	۰/۱۳	۳۳	۳	۲	۱/۳	Bal.	<۰/۰۰۶

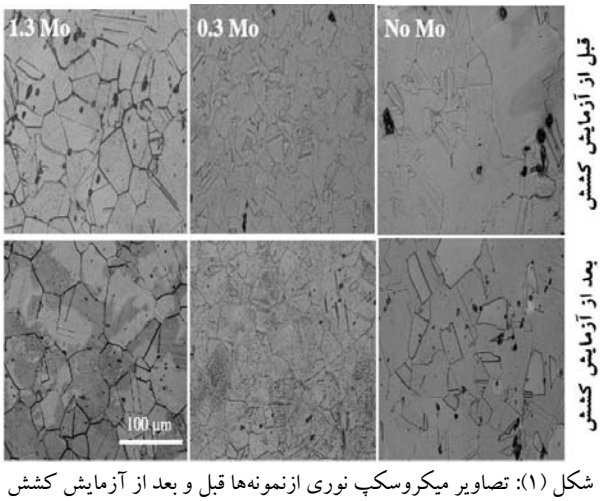
به منظور انجام آزمایش کشش در دمای محیط و با نرخ کرنش رایج $10^{-3}S^{-1}$ نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM E8M-04 به وسیله ماشینکاری آماده شده و سپس در دستگاه کشش Instron 4486 مورد آزمایش قرار گرفتند. به علاوه، به منظور بررسی ساختاری، نمونه‌ها طبق روال معمول (سنباده زنی، پولیش، حکاکی با نایتال ۵۰٪) آماده‌سازی شده و بوسیله میکروسکپ نوری (Olympus Ck40M) و همچنین میکروسکپ الکترونی روبشی (VEGA//Tescan) و عبوری (Philips CM200 200 kV) مورد بررسی قرار گرفتند. اندازه دانه‌ها از روی تصاویر میکروسکپ نوری و مطابق روش خطی محاسبه گردید. بدین منظور، از هر نمونه ۱۰ عکس تهیه شده و در هر عکس ۵ خط با طول‌های متفاوت به صورت تصادفی انتخاب و اندازه دانه ها با استفاده از رابطه Jefree محاسبه شد. شناسایی فازها در ساختار نیز بوسیله XRD انجام گرفت.

Archive of SID

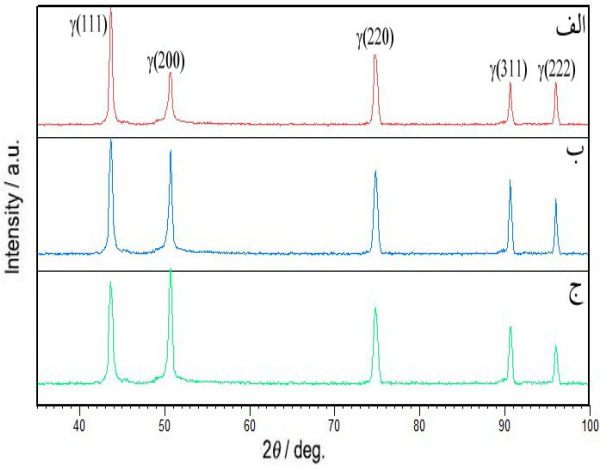
www.SID.ir

۳- نتایج و بحث

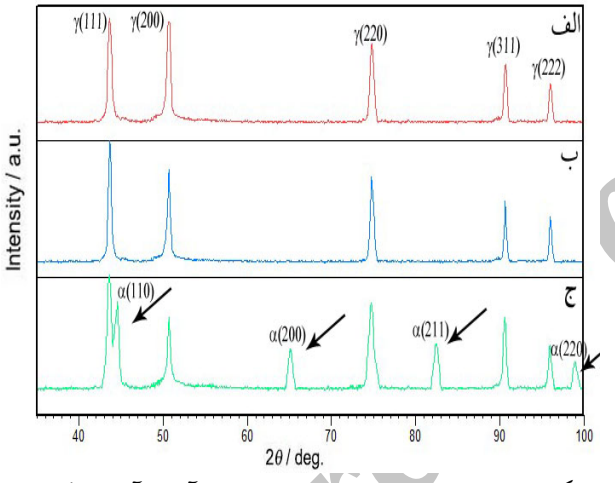
ساختار میکروسکپی نمونه‌های مورد آزمایش قبل و بعد از آزمایش کشش در شکل (۱) نشان داده شده است. در تمامی ساختارها، دانه های هم محور آستنیت با مرزهای صاف به همراه دوقلویی های آنیل تشکیل شده در ساختار مشاهده می شود. همچنین در شکل ۲ و ۳ به ترتیب آنالیز فازی از نمونه ها قبل از آنیل و نتایج بعد از آزمایش کشش نشان داده شده است. با توجه به تصاویر مشاهده می شود که با افزایش مولیبدن فاز زمینه در تمامی نمونه های قبل از آزمایش کشش تک فاز آستنیت می‌باشد و نمونه‌ی بدون مولیبدن و حاوی ۰/۳ درصد مولیبدن این فاز را حتی بعد از تغییرشکل پلاستیکی حفظ کرده اند، اما در نمونه حاوی ۱/۳ درصد مولیبدن بعد از تغییر شکل پلاستیکی پیکهای فاز α مربوط به مارتنزیت که ناشی از تغییرشکل است به وجود آمده است (در تصویر با فلش مشخص شده‌اند). این مطلب مؤید آن است که در این فولاد در اثر اعمال کارسرد استحاله آستنیت به مارتنزیت اتفاق افتاده که نوعی استحاله TRIP است.



شکل (۱): تصاویر میکروسکپ نوری ازنمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش کشش



شکل (۲): نتایج حاصل از XRD نمونه های قبل از آنیل : الف- فولاد بدون مولیبدن، ب- فولاد حاوی ۰/۳ درصد مولیبدن، ج- فولاد حاوی ۱/۳ درصد مولیبدن.

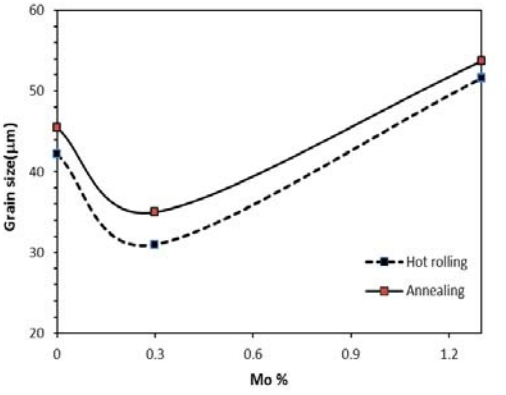


شکل (۳): نتایج حاصل از XRD نمونه های بعد از آنیل و آزمایش کشش: الف- فولاد بدون مولیبدن، ب- فولاد حاوی ۰/۳ درصد مولیبدن، ج- فولاد حاوی ۱/۳ درصد مولیبدن.

تغییر اندازه دانه بر حسب درصد مولیبدن فولاد در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود کمترین اندازه دانه در درصد مولیبدن ۰/۳ حاصل شده است. به علاوه مشاهده می‌شود که در همه مقادیر مولیبدن، اندازه دانه‌ها پس از آنیل نسبت به حالت نورد گرم شده اندکی افزایش یافته است. لیکن این میزان افزایش در درصد مولیبدن ۰/۳ بیش از سایر درصدها است.

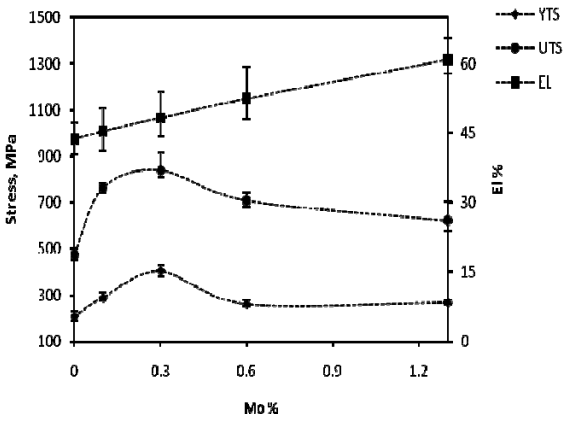
Archive of SID

www.SID.ir



شکل (۴): تغییرات اندازه دانه بر حسب تغییرات مولیبدن .

نتایج حاصل از منحنی تنش – کرنش مهندسی آزمایش کشش در شکل (۵) آورده شده است. در این شکل نیز می‌توان مشاهده نمود در مقدار مولیبدن ۰/۳ درصد بالاترین میزان استحکام در این فولاد حاصل شده است. مقایسه منحنی های تنش – کرنش مهندسی به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش مولیبدن تا ۰/۳ درصد استحکام نهایی به میزان ٪۵۸ (از ۴۶۸ به ۸۱۰ MPa) و تنش تسلیم به میزان ٪۵۰ (از ۲۰۰ به ۴۰۰ MPa) افزایش یافته است. با توجه به اینکه فولاد بدون مولیبدن و فولاد حاوی ۰/۳ درصد مولیبدن قبل و بعد از آزمایش کشش زمینه آستنیتی خود را حفظ کرده‌اند می‌توان گفت که در این فولادها مکانیزم غالب برای تغییر شکل، مکانیزم دوقلویی بوده است [۶-۵]. در نتیجه بهبود خواص فولاد حاوی ۰/۳ درصد مولیبدن به دلیل تغییر شکل و ریزتر شدن دانه‌ها بر اساس مکانیزم دوقلویی (TWIP) و افزایش دوقلویی در ساختار می‌باشد. زیرا مرزهای دوقلویی در ساختار نظیر مرزدانه عمل کرده و استحکام فولاد را بالا می برد[۴]. همچنین با توجه به شکل (۴) با افزایش مولیبدن تا ۰/۳ درصد اندازه دانه کاهش می‌یابد و این کاهش اندازه دانه به دلیل افزایش دوقلوهای مکانیکی در ساختار است[۴]. ریز شدن دانه‌ها از طریق رابطه هال-پچ باعث افزایش استحکام می‌شود.

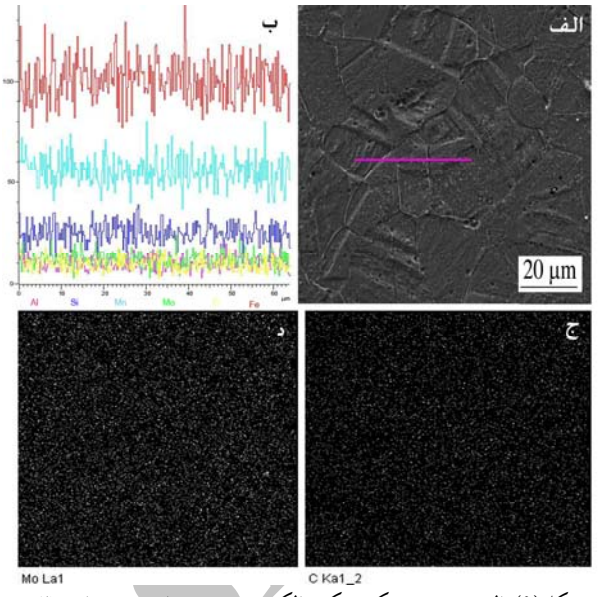


شکل (۵): نتایج حاصل از منحنی تنش – کرنش مهندسی به‌دست آمده از آزمایش کشش با نرخ کرنش $10^{-3}S^{-1}$.

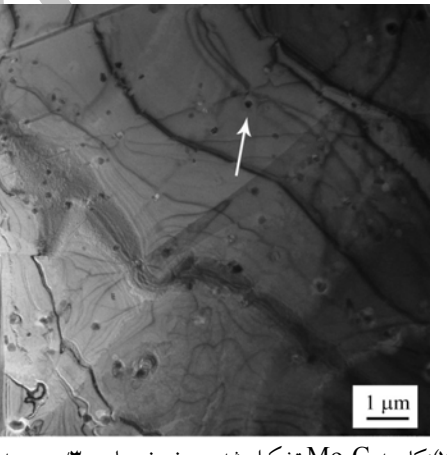
در شکلهای (۶) و (۸) به ترتیب تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی از نمونه‌های با ۰/۳ و ۱/۳ درصد مولیبدن نشان داده شده است. در این تصویر مجدداً مشاهده می‌شود اندازه دانه‌های فولاد ۰/۳ درصد خیلی ریزتر بوده و حضور بارز دوقلویی‌ها در این نمونه و عدم حضور آنها در نمونه ۱/۳ درصد مشهود است. بر روی نمونه اول آنالیز خطی EDX برای عناصر Al، Si، Mn، Mo، C و Fe و نیز آنالیز سطحی برای عناصر C و Mo انجام گرفت که نتایج آن در شکل (۶) نشان داده شده است. هر دو آنالیز خطی و سطحی حاکی از یکنواختی توزیع این عناصر در ساختار اعم از درون دانه‌ها و مرز دانه‌هاست. از آنجا که مولیبدن یک عنصر کاربیدزای قوی است[۸]، تشکیل رسوبات کاربیدی در این فولاد اجتناب ناپذیر است. لیکن توزیع یکنواخت هر دو عنصر کربن و مولیبدن در ساختار نشان می‌دهد که کاربید تشکیلی به صورت یکنواخت در ساختار توزیع شده است. در شکل(۷) تصویر گرفته شده به کمک میکروسکپ الکترونی عبوری از این کاربیدهای غنی از مولیبدن برای نمونه حاوی ۰/۳ درصد مولیبدن مشاهده می شود. طبق بررسی های انجام شده کاربید Mo_2C در ساختار ایجاد شده است. همچنین افزایش استحکام در فولاد ۰/۳ درصد می‌تواند ناشی از تشکیل محلول جامد همگن نیز باشد.

Archive of SID

www.SID.ir



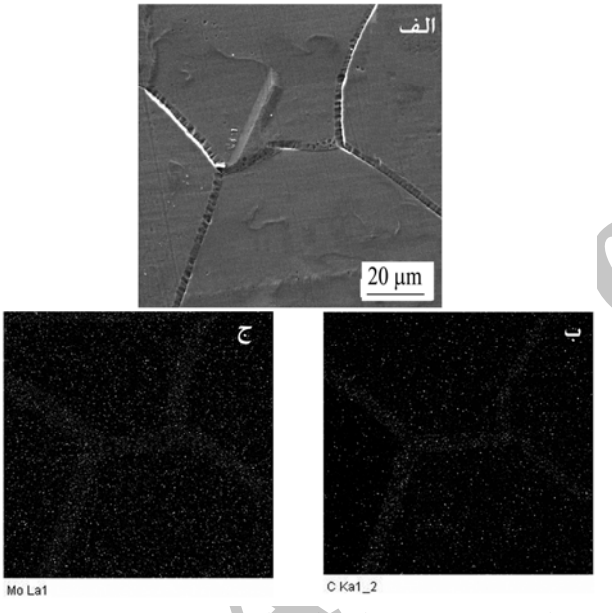
شکل(۶): الف-تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی از نمونه حاوی ۰/۳ مولیبدن، ب-آنالیز خطی نمونه، ج و د-آنالیز سطحی عناصر کربن و مولیبدن در زمینه.



شکل(۷):کاربید Mo_2C تشکیل شده در نمونه حاوی ۰/۳ درصد مولیبدن.

عدم حضور دوقلویی‌ها در ساختار فولاد ۱/۳ درصد مولیبدن همانگونه که قبلاً نیز اشاره شد، به دلیل انجام استحاله $\gamma_{fcc}(Austenite)\rightarrow\alpha_{bcc}(bcc\text{-}Martensite)$ است. این استحاله با افزایش درصد مولیبدن فولاد و در نتیجه کاهش SFE به مقادیر کمتر از $20 mJ/m^2$ ترغیب می‌شود. در حالی که در مقادیر کمتر مولیبدن یعنی ۰/۳ درصد میزان این کاهش در SFE هنوز آنقدر نیست که مکانیزم تغییر شکل از دوقلویی به استحاله آستنیت به مارتنزیت تغییر یابد. بیان شده که مکانیزم غالب تغییر شکل در مقادیر SFE بالای $80 mJ/m^2$ عمدتاً لغزش نابجایی‌هاست[۹].

از طرف دیگر در نمودار شکل (۴) مشاهده می‌شود که درصد ازدیاد طول در نمونه ۱/۳درصد مولیبدن کمی بیش از نمونه ۰/۳ درصد است. برای بررسی علت این موضوع آنالیز سطحی EDX از عناصر کربن و مولیبدن در نمونه ۱/۳ درصد گرفته شد که در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این دو عنصر در این نمونه در مرز دانه‌ها تجمع یافته‌اند. این تجمع باعث تشکیل کاربید M_2C غنی از مولیبدن در مرزدانه‌ها شده که از جدایش آنها جلوگیری کرده و باعث افزایش میزان تغییر شکل می شود[۱۱-۱۰].

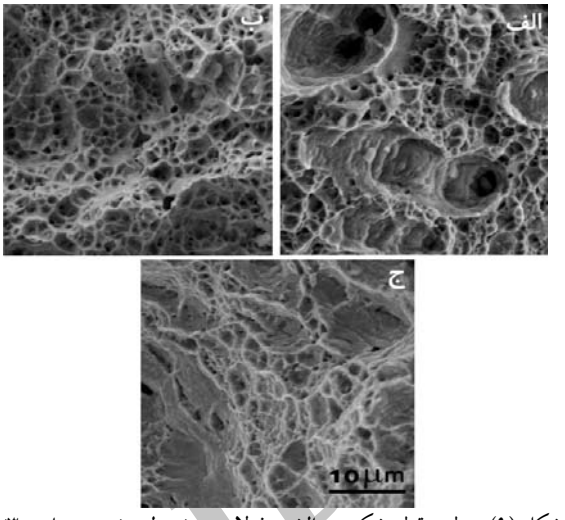


شکل (۸): الف-تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی از فولاد حاوی ۱/۳درصد مولیبدن، ب و ج: آنالیز سطحی کربن و مولیبدن در زمینه.

در شکل (۹) نیز سطح مقطع شکست نمونه های آزمون کشش نشان داده شده است. همانطور که قابل مشاهده است با افزایش مولیبدن سطح شکست از ترد به نرم تغییر حالت داده است که با توجه به شکل (۶) و قرارگیری مولیبدن و کربن در اطراف مرزدانه ها قابل انتظار است.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل (۹): سطح مقطع شکست: الف- فولاد بدون مولیبدن، ب-حاوی ۰/۳ درصد مولیبدن، ج- حاوی ۱/۳ درصد مولیبدن

۴- نتیجه گیری

۱- افزودن ۰/۳ درصد مولیبدن استحکام نهایی فولاد Fe-33Mn-3Si-2Al-0.13C را تقریبا ۵۰ درصد افزایش می‌دهد.

۲- افزودن بیش از ۰/۳ درصد مولیبدن باعث کاهش SFE فاز آستنیت شده و از مکانیزم TWIP جلوگیری کرده و مکانیزم TRIP را ترغیب می‌کند.

۳- حضور دوقلویی‌های مکانیکی در ساختار باعث ریزشدن دانه‌ها و افزایش استحکام می‌شود.

۵- مراجع

[1] 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.

[2] 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.

[3] R. Hill, E. Robert, Physical Metallurgy Principles 3rd Ed., pp. 826-828, Publishing Company, 1994.

[4] S. Vercammen, B. Blanpain, B.C. De Cooman, “Cold Rolling Behavior of An Austenitic Fe-30mn-3al-3si Twip-Steel: The Iimportance of Deformation Twinning”, Acta Material, Vol. 52, pp. 205-212, 2004.

[5] E. Opbroek. “Advanced High Strength Steel” ISIJ, Vol. 3, pp.8-17, 1998.

[6] V.F. Zackay, E.R. Parker, D. Fahr And P. Busch, "Enhancement of Ductility In High Strength Steels", Trans. Asm, Vol. 60, pp. 253-261, 1967.

[7] R.E, Schramm, R.P, Reed, “Stacking Fault Energies of Seven Commercial Austenitic Atainless Steels.Metall”, Matrial Transformation A, Vol. 6a, pp. 1345-1353, 1975.

[8] G.E. Totten, Ph.D. Fasm, “Steel Heat Treatment Handbook 2ed”, Taylor & Francis, pp. 17-18, 2006.

[9] S. Allain, J.P. Chateau, O. Bouaziz, S. Migot And N. Guelton: “A Physical Model of The Twinning-Induced Plasticity Effect In A High Manganese Austenitic Steel “, Material. Science. Engineering. A, Vol, 158, pp. 387-389, 2004.

[10] H. Luo, P. Zhao, “Effect Of Molybdenum And Temperature Reduction on Hot Ductility of 0·2c–Mn Steels”, Iron Making And Steel Making, Vol. 28, No. 6, pp. 439-443, 2001.

[11] W.B. Lee, S.G. Hong, C.G. Park, K.H. Kim, S.H. Park, ”Influence of Mo on Precipitation Hardening In Hot Rolled Hsla Steels Containing Nb”, Scripta Material, Vol. 43, pp. 319–324, 2000.

۶- پی‌نوشت

1- Transformation Induce Plasticity
2- Twinning Induce Plasticity
3- Stacking Fault Energy

Archive of SID

www.SID.ir