

بررسی اثر نواری شدن بر رفتار مقاومت به ضربه فولاد میکرو آلیاژ مورد استفاده در خطوط لوله

احمدرضا سلیمی^{1*}، حسین مناجاتی زاده²، داود آصفی¹ و امیر انصاری پور¹

چکیده

باندینگ یا نواری شدن، به لایه لایه شدن ساختار فولاد به موازات جهت سیلان ماده در طی فرآیند کارگرم گفته می‌شود. این پژوهش به بررسی میزان باندینگ فریتی - پرلیتی موجود در ورق‌های فولاد میکروآلیاژی API GRB مورد مصرف در صنایع لوله‌سازی و تاثیر آن بر میزان انرژی ضربه این نوع فولادها پرداخته است. هدف ویژه در این پژوهش مقایسه خواص ضربه‌ای نمونه‌های بانندی و غیربانندی در دو جهت عمود و موازی نورد است. آزمایش‌های متالوگرافی و ضربه در دمای 20°C - و صفر روی این نمونه‌ها در دو جهت عمود و موازی با نورد صورت گرفت. بررسی‌ها نشان دادند که زاویه نمونه ضربه نسبت به جهت نورد در مقاومت به ضربه آن بسیار مؤثر است، یعنی در حالی که در جهت نورد باعث کاهش مقاومت ضربه‌ای شده در جهت عمود باعث افزایش گردیده است.

واژه‌های کلیدی: فولاد API GRB، باندینگ فریتی-پرلیتی، انرژی ضربه.

Archive of SID

1- کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
 2- استادیار گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
 * - نویسنده مسئول مقاله: salimy.ahmadreza@gmail.com

پیشگفتار

نواری شدن ساختار به موازات جهت سیلان ماده در طی فرایند کارگرم فولادهای میکروآلیاژی را باندینگ می‌نامند. از نظر کلی باندینگ در دو گروه عمده نوارهای ماکروسکپی و میکروسکپی دسته‌بندی می‌شود. باندهای میکروسکپی شامل باندهای تغییر شکل، باندهای انتقالی و باندهای برشی می‌باشند. باندهای ماکروسکپی شامل باندهای کاربرد در فولادهای ابزار هایپرپوتکتوئید، باندهای فرییتی - پرلیتی در فولادهای کم کربن نورد شده و کم کربن آلیاژی و باندهای مارتنزیتی در فولادهای آلیاژی کوئنچ - تمپر شده می‌باشد [1-4]. به خاطر همین خصوصیات و ساختارهای ماکرو و میکرو متفاوت یک تعریف مشخص جهانی برای باندینگ وجود ندارد. این به وضوح مشخص است که مکانیزم‌های متفاوتی باعث تشکیل این ساختار می‌شود.

باندینگ فرییتی - پرلیتی در اثر جدایش برخی عناصر آلیاژی در طی انجماد پس از ریخته‌گری و فرآیند کارگرم بوجود می‌آید [5]. وقتی فولاد به آرامی از منطقه آستنیت سرد می‌شود، در ابتدا فریت پروتکتوئیدی در مناطقی تشکیل می‌شود که دارای عناصر پایدار کننده آستنیت نسبتاً کمی است. با عبور از دمای یوتکتوئید پرلیت در منطقه‌ای که دارای عناصر پایدار کننده آستنیت بیش‌تری است، تشکیل می‌شود. در نتیجه، ریز ساختار باندی بوجود می‌آید که شامل نواحی پرلیت و فریت می‌باشد [6]. بررسی‌هایی به تاثیر ساختار باندی بر خواص مکانیکی پرداخته شده است [7-9]. در این بررسی‌ها نشان داده شده که باندینگ تاثیر ناچیز بر ناهمسانگردی خواص کششی دارد، ولی این ناهمسانگردی در مقاومت ضربه‌ای بسیار بارزتر است. جاتسزک و همکارانش روی فولادی با 3٪ کربن و دارای ساختار باندی شدید کارکرده و دریافتند که همگن‌شدن باعث تغییر اندکی در خواص مکانیکی مقطع طولی می‌شود [10]. گرانج دریافت که هم ساختار باندینگ و هم قرارگرفتن طولی ناخالصی‌ها سبب نایکنواخت شدن خواص مکانیکی در فولادی با 0/25٪ کربن و 1/5٪ منگنز می‌شود. حذف باندینگ در نایکنواختی موثر بوده، ولی چنانچه تعداد زیادی ناخالصی در جهت طولی ردیف شده باشند، این بهبود جزئی خواهد

بود [11]. در بررسی‌هایی به اثر جهت آزمایش فقط روی نمونه‌های باندی پرداخته شده‌است و نشان داده شده است که باندینگ تاثیر زیادی بر نایکنواختی ورق نورد شده ایجاد می‌کند [12-14]. ولی پژوهش‌های کمتری به بررسی تفاوت بین نمونه‌های باندی و غیر باندی در جهات گوناگون پرداخته شده‌است. از این رو پژوهش‌های بیش‌تری در این زمینه لازم است.

روند پژوهش‌های پژوهشگران پیشین این‌گونه بود که نمونه با ساختار باندی انتخاب می‌شد و پس از بررسی خواص ساختاری و مکانیکی، همان فولاد مورد عملیاتی مثل آنیل کردن یا نرماله کردن قرار می‌گرفت و دوباره این خواص بررسی می‌شد. نقص احتمالی موجود در این روش تغییر در ساختار، عدد اندازه دانه و شکل و میزان ناخالصی پس از انجام عملیات حرارتی مورد نظر است که ممکن است در دقت نتایج موثر باشد. در این پژوهش خواص مقاومت به ضربه یک فولاد API GRB با درجات گوناگون باندی شدن فرییتی - پرلیتی ساختار پس از نورد گرم بدون آن که عملیات حرارتی روی نمونه‌ها جهت کاهش پدیده باندینگ صورت پذیرد، مورد بررسی قرار گرفته است.

روش پژوهش

در این پژوهش ابتدا داده‌های تولیدی 30 نمونه از فولاد API GRB استخراج شد. از بین آن‌ها 10 نمونه با ترکیب شیمیایی یکسان، 0/007P، 0/003S، 25N(ppm) و 0/12C، 0/21Si، 0/905Mn، انتخاب گردید. نمونه‌ها به وسیله متالوگرافی نوری مورد بررسی ساختاری قرار گرفتند. برای این منظور، نمونه‌ها از روش معمول برای ورق‌های فولادی گرم نوردیده آماده‌سازی و به وسیله محلول نایتال 2٪ اچ شده و تصاویر آن‌ها به وسیله میکروسکپ نوری در بزرگنمایی‌های 100 و 500 برابر تهیه شد. جهت بررسی تاثیر صرفاً باندینگ و حذف اثر سایر متغیرهای متالورژیکی، نمونه‌هایی با اندازه دانه و میزان ناخالصی یکسان انتخاب شد. باندینگ موجود در فولاد API GRB از نوع فرییتی - پرلیتی می‌باشد، از این رو، بر اساس استاندارد ASTM-E1268، شاخص ناهمسانگردی در ریزساختار نمونه‌ها بر اساس فرمول زیر

تعیین شاخص ناهمسانگردی و آزمایش ضربه در جدول 1 آورده شده است.

با توجه به استاندارد باندینگ حالت بهینه زمانی است که عدد شاخص ناهمسانگردی 1 باشد، یعنی نسبت میانگین پرلیت‌های قطع شده به وسیله خطوط آزمایش در دو جهت عمود و موازی با یکدیگر برابر باشد و با افزایش این عدد به بالاتر از 1، بدین صورت که میانگین پرلیت‌های قطع شده در جهت عمود بیش‌تر از جهت موازی باشد، ساختار باندی‌تر می‌گردد. در این جدول مشاهده می‌شود تمامی مقادیر اندازه‌گیری شده شدت باندینگ بزرگ‌تر از 1 هستند که نشان می‌دهد کلیه نمونه‌ها باندی شده اند، ولی بر اساس این جدول، می‌توان دو سری نمونه با شاخص ناهمسانگردی بالا شامل آزمونه‌های 1A, 2A, 1B, 2B و با شاخص ناهمسانگردی پایین شامل آزمونه‌های 3A, 4A, 3B, 4B را از هم تفکیک کرد. تصاویر متالوگرافی سه بعدی نمونه‌های 1 و 3 به عنوان دو نمونه با شاخص ناهمسانگردی پایین و بالا به ترتیب در شکل 3a و 3b نشان داده شده است. همان گونه که دیده می‌شود پدیده باندینگ بیش‌تر در سطح مقطع‌های موازی با جهت نورد قابل تشخیص است.

ارتباط انرژی ضربه و شاخص ناهمسانگردی برای 8 آزمونه مورد بررسی در جهت‌های A و B در شکل 4 نشان داده است. بر اساس این شکل با افزایش شاخص ناهمسانگردی انرژی ضربه برای نمونه‌های سری A کاهش یافته است. در حالی که برای نمونه‌های سری B این رفتار برعکس است و با افزوده شدن شاخص ناهمسانگردی انرژی ضربه افزایش می‌یابد. این کاهش یا افزایش انرژی ضربه با افزایش درجه باندینگ را می‌توان به جهت رشد ترک در نمونه ضربه نسبت به لایه‌های باندی نسبت داد.

شماتیک مسیر رشد ترک در آزمونه‌های ضربه A و B ساختار باندی با شاخص ناهمسانگردی بالا در شکل 5 نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود، در نمونه‌های A ترک در امتداد مسیر قرارگیری لایه‌ها روی یکدیگر حرکت می‌کند؛ در حالی که در نمونه‌های B حرکت ترک عمود بر لایه‌ها بوده و در مسیر خود با لایه‌های گوناگون مواجه می‌شود.

تعیین گردید. نسبت موجود در فرمول زیر عبارت است از نسبت تعداد پرلیت‌های قطع شده خطوط عمودی به خطوط افقی هر شکل و AI شاخص ناهمسانگردی می‌باشد.

$$AI = \frac{N_{L\perp}}{N_{L\parallel}} \quad (1) \text{ فرمول}$$

جهت انجام آزمایش ضربه (بر اساس استاندارد ASTM-E23)، از هر ورق سه نمونه در جهت عمود بر نورد و سه نمونه در جهت موازی با نورد بر اساس شکل 1 آماده شد (در حالت A خود آزمونه در جهت عمود بر نورد و شیار آن در جهت موازی نورد است و ضربه آونگ در جهت موازی نورد به آن وارد می‌شود و در حالت B خود آزمونه در جهت موازی با نورد و شیار آن در جهت عمود بر نورد است و ضربه آونگ در جهت عمود بر نورد به آن وارد می‌شود).

پس از رساندن دمای آزمونه‌ها به 20- و صفر درجه سانتی‌گراد، آزمایش به وسیله دستگاه ضربه شاریبی انجام گرفت و میزان انرژی جذب شده از هر آزمونه بر حسب واحد ژول مشخص گردید و در نهایت، میانگین سه نتیجه برای هر دما به عنوان نتیجه نهایی گزارش شد. سطح شکست آزمونه‌های ضربه به وسیله نیکل و به صورت الکترولس پوشش داده شد تا برای بررسی مسیر شکست آماده گردد. این کار از آسیب سطح شکست مورد بررسی در هنگام آماده سازی جلوگیری می‌کند. سپس پشت شیار آزمونه‌های شکسته شده بوسیله میکروسکپ SEM مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

برای تعیین شاخص ناهمسانگردی از هر نمونه 10 عکس متالوگرافی نوری تهیه و 8 خط در طول و 8 خط در عرض هر عکس کشیده شد (این خطوط، خطوط آزمایش نامیده می‌شوند). سپس نسبت تعداد پرلیت‌های قطع شده خطوط عمودی $N_{L\perp}$ به خطوط افقی $N_{L\parallel}$ هر شکل با توجه به جزئیات ارائه شده در استاندارد محاسبه گردید. بر اساس فرمول 1 میانگین این نتایج نیز بدست آورده شد و به عنوان شاخص ناهمسانگردی هر نمونه گزارش گردید. در شکل 1 نمونه‌ای از این عکس‌ها آورده شده است. نتایج دسته‌بندی نمونه‌ها پس از متالوگرافی،

یا کامپوزیتی با ذرات تقویت کننده پیوسته تشبیه نمود. شکست در راستای عمود بر رشته‌ها یا ذرات جهت یافته به مراتب دشوارتر از جهت موازی با آن‌هاست. روهانگی و همکارانش [15] رفتار شکست کامپوزیت $Ti-Al_3Ti$ را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که چقرمگی شکست به وسیله تقسیم ترک در لایه‌ها افزایش یافته است. لایه‌های باندی شده می‌توانند نقش تقسیم کننده ترک را ایفا کرده و انرژی لازم برای شکست در اثر ضربه را افزایش دهند.

در شکل 7 اختلاف انرژی ضربه در دو جهت عمود و موازی نورد برای همه نمونه‌ها نشان داده شده است. با دقت در این نمودار و نیز نمودار شکل 3 می‌توان دید با افزوده شدن شاخص ناهمسانگردی، اختلاف بین انرژی ضربه در دو جهت عمود و موازی با جهت نورد افزایش یافته و در دمای دمای $20^\circ C$ - از حدود 9 به 41 kJ/m^2 می‌رسد. لذا جهت نمونه‌گیری در نمونه‌های باندی تأثیری چشمگیرتر در نتایج آزمایش ضربه نشان می‌دهد. چرا که در نمونه‌های غیر باندی یا با شاخص ناهمسانگردی پایین‌تر به لحاظ همگن‌تر بودن ساختار، خواص مکانیکی نیز در جهات گوناگون اختلاف کمتری داشته و به حالت همگن نزدیک‌ترند. در پژوهشی که در مورد نوعی کامپوزیت آلومینیومی که از الیاف SiC به دو صورت جهت یافته و راندم در زمینه آلومینیومی استفاده شده است که در نمونه با جهت‌گیری راندم الیاف تفاوتی در رشد ترک خستگی در دو جهت عمود و موازی مشاهده نمی‌شود در حالی که در نمونه با الیاف جهت یافته این تفاوت به شکل بارزی نمایان است [16]

تکرار آزمایش‌های ضربه در دمای صفر درجه نیز رفتاری کاملاً مشابه با دمای $20^\circ C$ - نشان داد. هرچند میزان اختلاف انرژی ضربه در نمونه‌های باندی نسبت به دمای $20^\circ C$ - اندکی کاهش یافته است، بدین صورت که در نمونه‌های غیر باندی اختلاف بین انرژی ضربه جذب شده در دو جهت همان 9 ژول است در حالی که در نمونه‌های باندی این اختلاف از 41 ژول به 30 ژول کاهش یافته است. این نشان می‌دهد که باندینگ در دماهای پایین‌تر تأثیر بیشتری بر خواص ضربه از خود نشان می‌دهد. در بررسی دیگری نیز مشخص شد که باندینگ در دماهای پایین‌تر اثر بیشتری از خود نشان

لذا، هرچه میزان باندینگ شدیدتر شود، برای نمونه‌های A مضرتر و برای نمونه‌های B مفیدتر خواهد بود. چراکه تعداد بیش‌تر لایه‌ها در مسیر رشد ترک انرژی بیش‌تری را جذب می‌کند. بر اساس جدول 1 و شکل 4 نمونه‌های 1B و 2B که شاخص ناهمسانگردی بالایی را دارا هستند، انرژی بیش‌تری را پیش از شکست جذب می‌کنند این در حالی است که نمونه‌های 3B و 4B که شاخص ناهمسانگردی پایین‌تری را دارا هستند، انرژی کمتری جذب می‌کنند تا شکست در آن‌ها رخ دهد، یعنی اگر ضربه آونگ در جهت عمود بر نورد به آزمونه‌ها وارد شود، باندینگ می‌تواند در خواص ضربه‌ای مفید باشد زیرا ترک می‌تواند به وسیله مرز دانه‌ها، خطوط سیلان، ناخالصی‌ها و باندینگ از مسیر اصلی خود انحراف یابد. در شکل 3 دیده می‌شود که در نمونه با شاخص ناهمسانگردی بالاتر فاصله بین باندهای فریت و پرلیت کم‌تر از نمونه‌های با شاخص ناهمسانگردی پایین‌تر است. در نتیجه ترک در مسیر خود به تعداد بیش‌تری از فازها برخورد کرده و لذا، بیش‌تر مجبور به تغییر مسیر می‌شود. پیوستگی فازها نیز در نمونه‌های باندی نسبت به نمونه‌های غیرباندی عامل مهم‌تری در این موضوع است زیرا هنگامی که فازها پیوسته باشند، ترک ناگزیر است در مسیر خودش با تعداد فازهای بیش‌تری مواجه شود. در حالی که در نمونه‌های غیرباندی به علت ناپیوستگی فازها، ترک ممکن است در یک فاز مسیر طولانی‌تری را طی کند تا به فاز دیگر برخورد کند. این مطلب در شکل 6 که تصویر SEM مقطع عمود بر سطح شکست را در نمونه 2 نشان می‌دهد، بهتر دیده می‌شود. همان گونه که از این شکل پیداست، مسیر ترک در حین عبور از ساختار باندی فریتی پرلیتی به صورت دندانه دندانه گردیده است. مسیر ترک در این شکل در راستای عمود بر صفحه بوده است. لذا، در حین عبور، هم‌زمان با دو ساختار فریت و پرلیت درگیر بوده و تغییر مسیرهای پی در پی باعث ایجاد چنین شکلی شده است. همین امر را می‌توان به عنوان دلیلی بر افزایش انرژی ضربه جذب شده در نمونه‌های باندی شبیه B دانست.

ساختار باندی شده به این شکل را در یک مشابه سازی نه چندان دور از ذهن می‌توان به یک کامپوزیت رشته‌ای

نشان‌دهنده ناهمسانگردی بالا در نمونه‌های باندی می‌باشد.

- نوع، تعداد و جهت فازها و جهت رشد صفحات در خواص ضربه‌ای ساختارهای باندی موثر است.

- در دماهای پایین‌تر باندینگ اثر بیش‌تری را بر خواص ضربه‌ای داراست.

قدردانی و تشکر

این پژوهش در چارچوب قرارداد پروژه پژوهشی با مجتمع فولاد مبارکه انجام شده است. بدین وسیله از همکاری بی‌دریغ کارشناسان و پرسنل محترم واحدهای پژوهش و توسعه و متالورژی و روش‌های تولید، نوردهای گرم و سرد و بویژه آزمایشگاه محصول مجتمع فولاد مبارکه سپاسگزاری می‌شود.

می‌دهند [17]. به نظر می‌رسد با تعیین شاخص ناهمسانگردی برای این دسته از فولادها بتوان تاثیر پارامترهای ریخته‌گری و نورد را بر ایجاد ساختار باندی بررسی کرد [18].

نتیجه گیری

- نمونه‌های ضربه غیرباندی در جهت نورد انرژی شکست بیش‌تری را نسبت به نمونه‌های باندی دارا هستند درحالی‌که در نمونه‌هایی که ضربه در جهت عمود بر نورد بر نمونه وارد می‌شود، انرژی جذب شده در نمونه‌های غیرباندی کم‌تر از باندی است.

- بیشینه و کمینه انرژی ضربه جذب شده مربوط به نمونه‌های باندی می‌باشد.

- اختلاف انرژی ضربه در دو جهت عمود و موازی نورد در نمونه‌های باندی بیش‌تر از نمونه‌های غیر باندی است که

References

- 1- ASTM International, "Metals-Mechanical Testing", Annual Book of ASTM Standards, S. 3, Vol. 03.01, 2009.
- 2- J.D. Verhoeven, "A Review of Microsegregation Induced Banding Phenomena in Steels", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol 9, pp. 286-296, 2000.
- 3- X. P. Liang, "Microstructural evolution of 2519-T87 aluminum alloy obliquely impacted by projectile with velocity of 816 m/s", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol 22, pp. 1270-1279, 2012.
- 4- S. W. Hwang, "Effects of Al addition on high strain rate deformation of fully austenitic high Mn steels", Materials Science and Engineering: A, 528, pp. 7267-7275, 2011.
- 5- L. E. Samuels, "Light microscopy of carbon steels", ASM International, 81-124, 1999.
- 6- Ch. Harry, "Heat Treater's Guide", "Practices and Procedures for Irons and Steels (2nd Edition), ASM international, 1995.
- 7- L. Hellner and T. O. Norrman, Ann, 152, pp. 269-86, 1968.
- 8- W. A. Spitzig, "Effect of sulfide inclusion morphology and pearlite banding on anisotropy of mechanical properties in

normalized C-Mn steels", Metallurgical Transactions A, Vol 14, pp. 271, 1983.

9- A.S. Bor, Iron Steel Inst. Jpn. Int., 31, pp. 1445-46, 1991.

10- E. F. Jateczak. D. J. Girardi and E. S. Rowland, "On banding in steel", Transactions of American Society of Metals, 48, pp. 279-303, 1952.

11- R.A. Grange, "Effect of Microstructural Banding in Steel", Metall Transactions, 2, pp. 417-426, 1971.

12- L.Tau, et al, "Effect of anisotropy on the hydrogen induced fatigue crack propagation of a banded ferrite pearlite steel", Journal of marine science and technology, 1, pp. 19-22, 1993.

13- M. Z. Shah Khan, "Variable-amplitude fatigue testing of a high hardness armour steel", Int. J. Fatigue, 20, pp. 233-239, 1998.

14- P. Shanmugam, "Some Studies on the Impact Behavior of Banded Microalloyed Steel", Engineering Fracture Mechanics, 53, pp. 991-1005, 1996.

15- A. Rohatgi, "Resistance-curve and fracture behavior of Ti-Al 3 Ti metallic-intermetallic laminate (MIL) composites", Acta Materialia, 51, pp. 2933-2957, 2003.

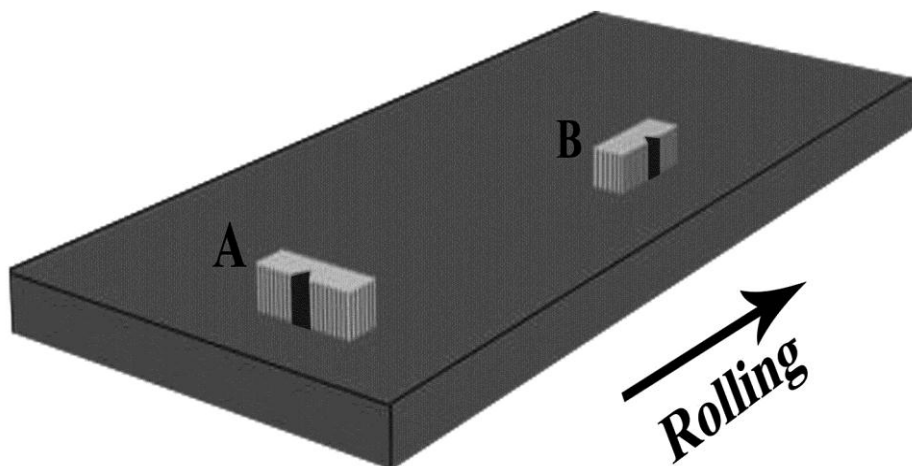
16- J.J. Mason, AND R.O. Ritchie, "Fatigue crack growth resistance in SiC particulate and

whisker reinforced P:M 2124 aluminum matrix composites", Materials Science and Engineering A, pp. 170-182, 1997.

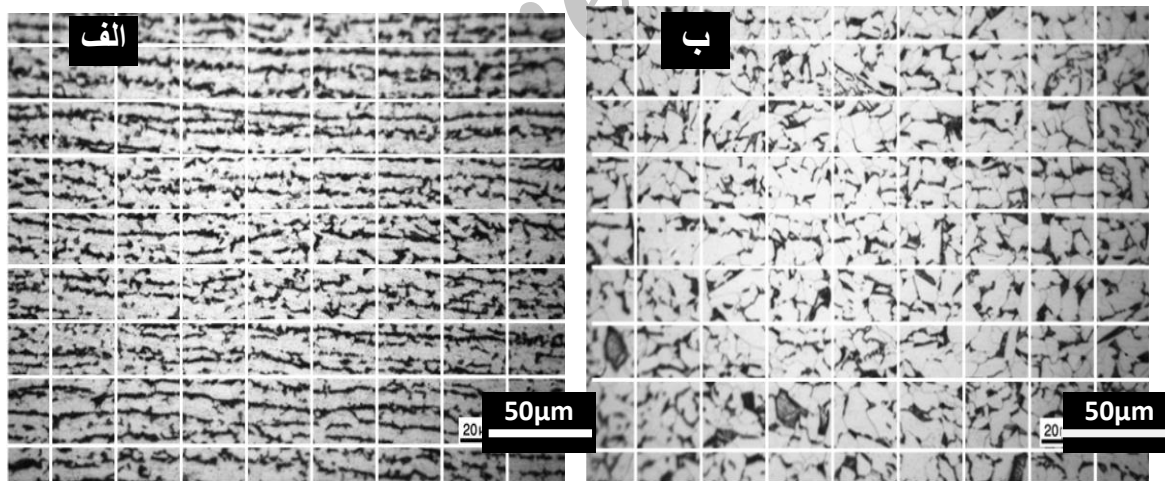
17- M.S. Joo, "Experiments To Separate The Effect Of Texture On Anisotropy Of Pipeline Steel", Materials Science & Engineering A, Vol. 556, pp. 601-606, 2012.

18- ح. مناجاتی زاده، "بررسی و تحلیل تاثیر شرایط تولید بر مقاومت به ضربه فولادهای میکرو آلیاژی مورد استفاده در لوله سازی با استفاده از شبکه عصبی"، مجله علمی پژوهشی مواد نوین، جلد 2، شماره 3، صفحات 1-9، بهار 1391.

پیوست‌ها



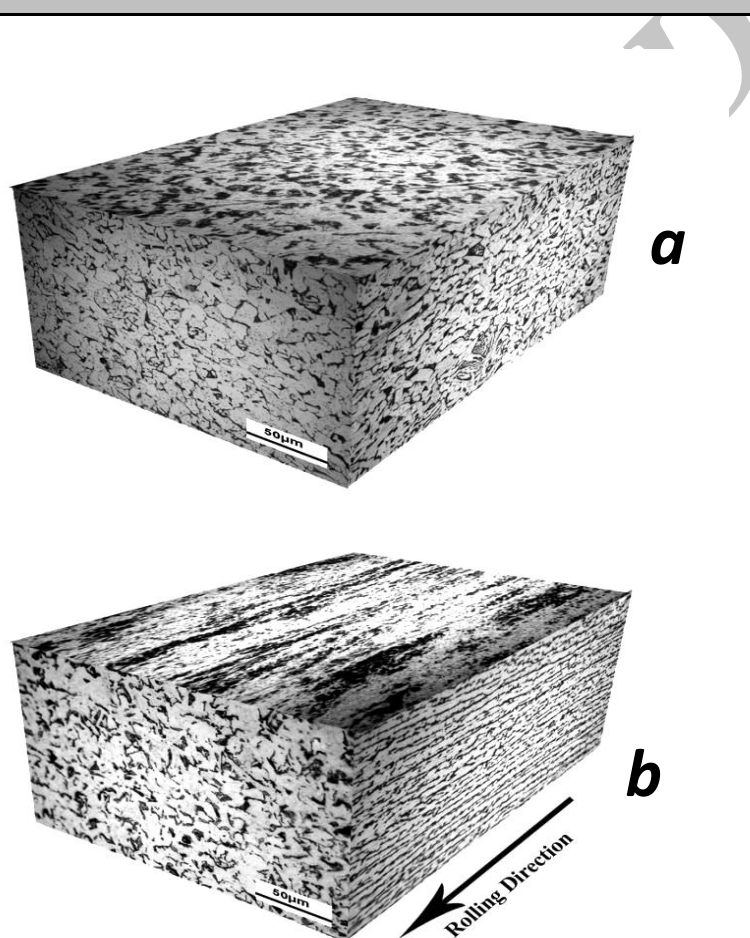
شکل 1- شماتیک نشان دهنده جهت نمونه‌های ضربه نسبت به جهت نورد ورق.



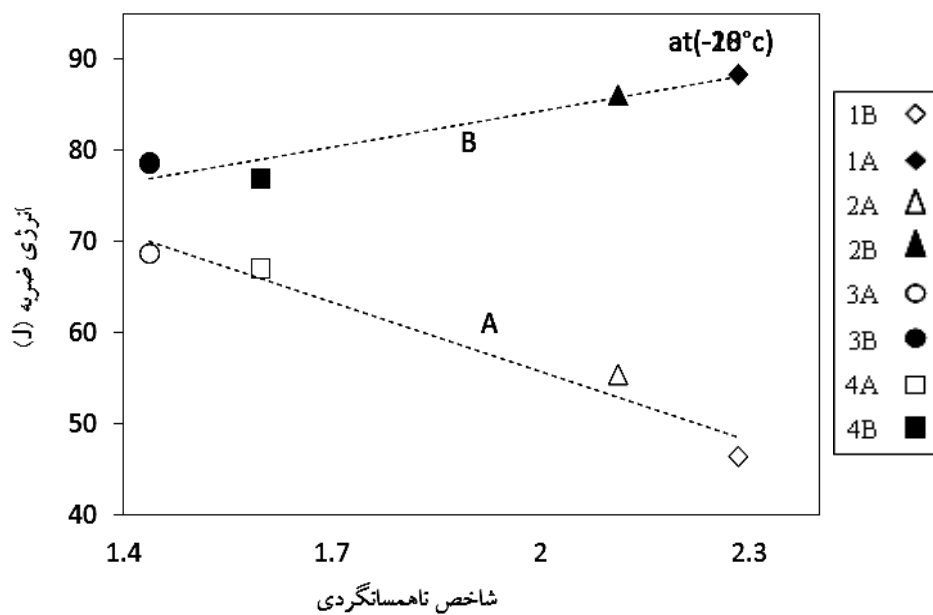
شکل 2- نمونه‌ای از تصاویر برای تعیین شاخص ناهمسانگردی الف) نمونه‌ای با شاخص ناهمسانگردی بالا ب) نمونه‌ای با شاخص ناهمسانگردی پایین.

جدول 1- درجه باندی و انرژی ضربه همه نمونه‌ها در دو جهت A و B در دمای -20°C

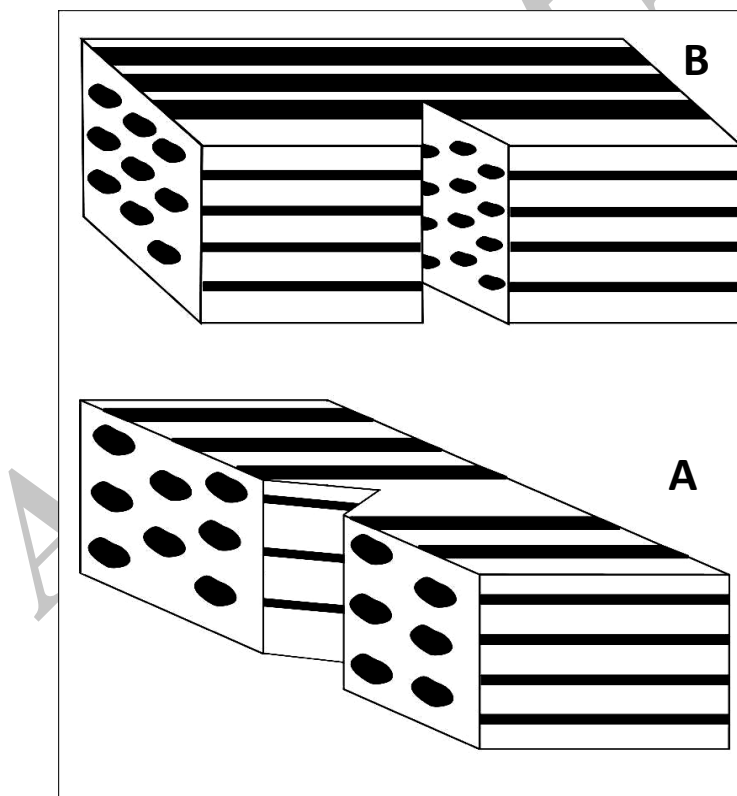
1A	2A	3A	4A	1B	2B	3B	4B	شماره نمونه
2/28	2/11	1/60	1/44	2/28	2/11	1/60	1/44	شاخص ناهمسانگردی
46/39	55/41	67/02	68/69	88/35	86/08	76/88	78/60	انرژی ضربه (J) در -20°C
60/33	64/33	74	75/33	90/66	87/33	83/67	82/66	انرژی ضربه (J) در 0°C



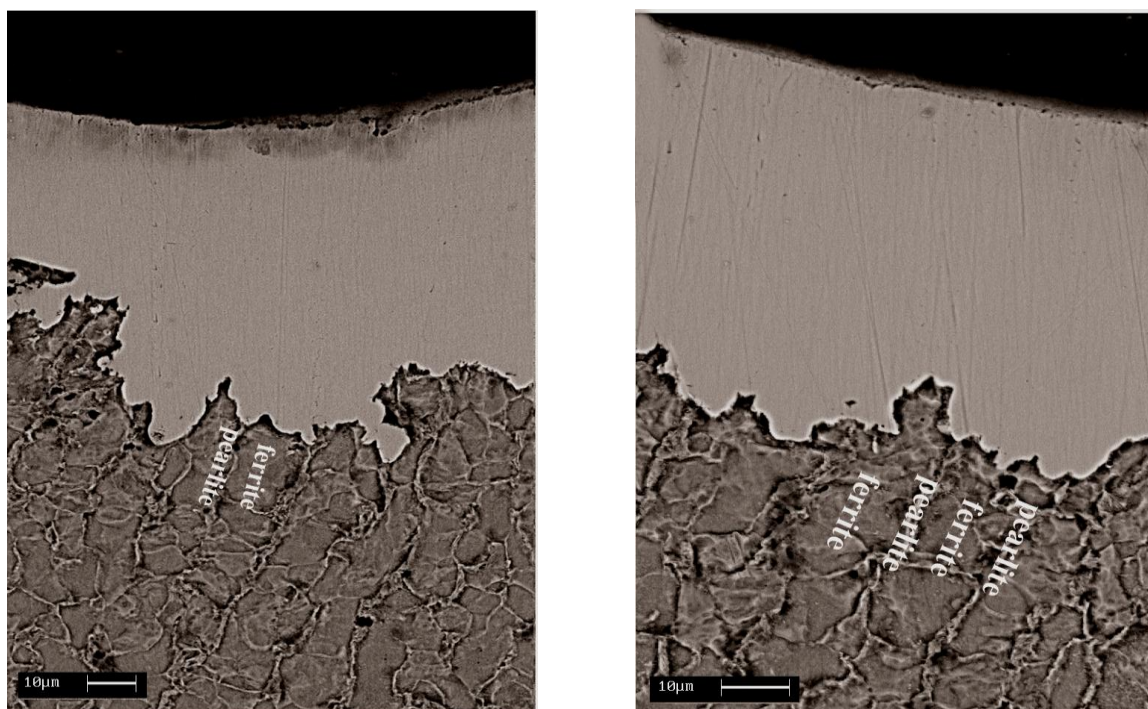
شکل 3- تصویر متالوگرافی نمونه‌های 3 (غیر بانندی) و 1 (بانندی) در سه مقطع طول، عرض و ضخامت ورق.



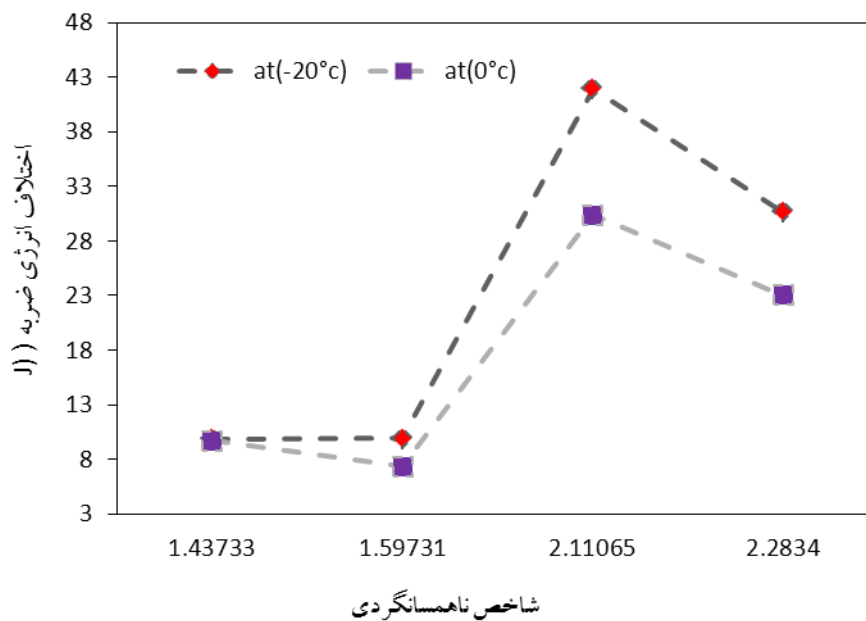
شکل 4- تغییرات انرژی ضربه در دمای -20°C در نمونه‌های باندی بر حسب جهت نمونه سازی A و B.



شکل 5- شماتیک نشان دهنده مسیر رشد ترک در نمونه‌های باندی A و B.



شکل 6- تصویر SEM نمونه 3 از مسیر رشد ترک در سطح مقطع عمود بر شکست.



شکل 7- اختلاف انرژی ضربه در دو جهت A و B در دماهای 20°C و صفر.