بررسی تجربی ساختار لوله‌های فولادی گرید B تولید شده به روش جوشکاری مقاومت الکتریکی (ERW)

محمود مندنی زاده[۱]، علی حیدری مقدم[۲و*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ساخت و تولید، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.
[۲]استادیار، عضو هیات علمی گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

دریافت: زمستان ۹۵ پذیرش: بهار ۹۶

چکیده

این مقاله با هدف توسعه، ارزیابی و بهبود کیفیت جوش لوله‌های فولادی گرید B به روش جوشکاری مقاومت الکتریکی فرکانس بالا انجام گردید. در تکنیک‌های ساخت لوله، عملیات حرارتی باعث بهبود ساختار منطقه جوش می‌گردد. با در نظر گرفتن پارامترهای ثابت (عرض ورق، دمای ثابت دستگاه آنیل، ولتاژ و آمپر دستگاه جوش) و پارامترهای متغیر (تغییرات سرعت خط تولید، خاموش بودن دستگاه آنیل)، از خط تولید یک نمونه بدون انجام عملیات حرارتی نرمالیزه و مابقی نمونه‌ها در سرعت‌های مختلف به همراه نرمالیزاسیون جهت انجام آزمایشات تهیه شد. آماده‌سازی نمونه‌ها مطابق با استاندارد انجام گردید. بررسی ساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نمونه‌ی بدون نرمالیزه، ساختار مارتنزیت نداشته و ساختار فریت سوزنی شکل یا فریت ویدمن‌اشتاین است. همچنین نمونه‌ی بدون نرمالیزه دارای منطقه متأثر از حرارت با ساختار بسیار ریز می‌باشد. در برخی از نمونه‌ها، منطقه متأثر از مکانیکی حرارتی نیز مشاهده شد. بهبود ساختار در نمونه لوله‌ای که با سرعت ۱۲ متر بر دقیقه تولید شده‌است مشاهده گردید.

* **عهده‌دار مکاتبات:** alheidarym@yahoo.com

واژه‌های کلیدی: جوشکاری مقاومت الکتریکی فرکانس بالا، عملیات حرارتی پس از جوشکاری، متالوگرافی، ریز ساختار.

۱- مقدمه

جوشکاری تماسی فرکانس بالا یک نوع جوشکاری مقاومت الکتریکی(ERW) برای تولید لوله می‌باشد که در سال ۱۹۶۰ معرفی شد. در این فرآیند اتصال بصورت جامد، شامل فورج و حرارت دهی همزمان است. در مرحله اول از تولید، ورق به صورت کویل (صفحه‌ای به شکل استوانه) شکل گرفته، لبه‌ها به هم متصل شده، سپس با هم در یک قالب Vee شکل به صورت گرد در می‌آید[۱،۲]. دو لبه مجاور ورق فولادی از طریق نورد گرم در حین عبور خود از بین سیم پیچ القایی گرم و لبه‌های ورق به وسیله غلتک‌های جوش به یکدیگر فشرده شده و به هم جوش داده می‌شوند(شکل۱)[۳]. این فرآیند با توجه به مزایای بیش از حد و جذاب آن مانند راندمان بالا، عدم نیاز به مواد مصرفی، منطقه جوش باریک‌تر و ارزان‌تر بودن این روش نسبت به دیگر روش‌های جوشکاری برای تولید لوله مورد توجه تولیدکنندگان لوله قرار دارد[۲]. اختلال در ساختار فولاد، پس از عمل اتصال لبه‌ها، به سرعت توسط یک یا چند عملیات حرارتی القایی با هدف بازسازی خواص تخریب شده توسط عملیات جوشکاری انجام می‌شود[۴]. هدف از نرمالیزاسیون، جایگزینی ساختار درشت در ارتباط با عملیات جوشکاری با دانه آستنیت کوچکتر و فاز فریتی خوب، همگن کردن کربن در محل اتصال جوش و تولید ریز ساختار نهایی برای جوش بهینه معین شده است[۵].

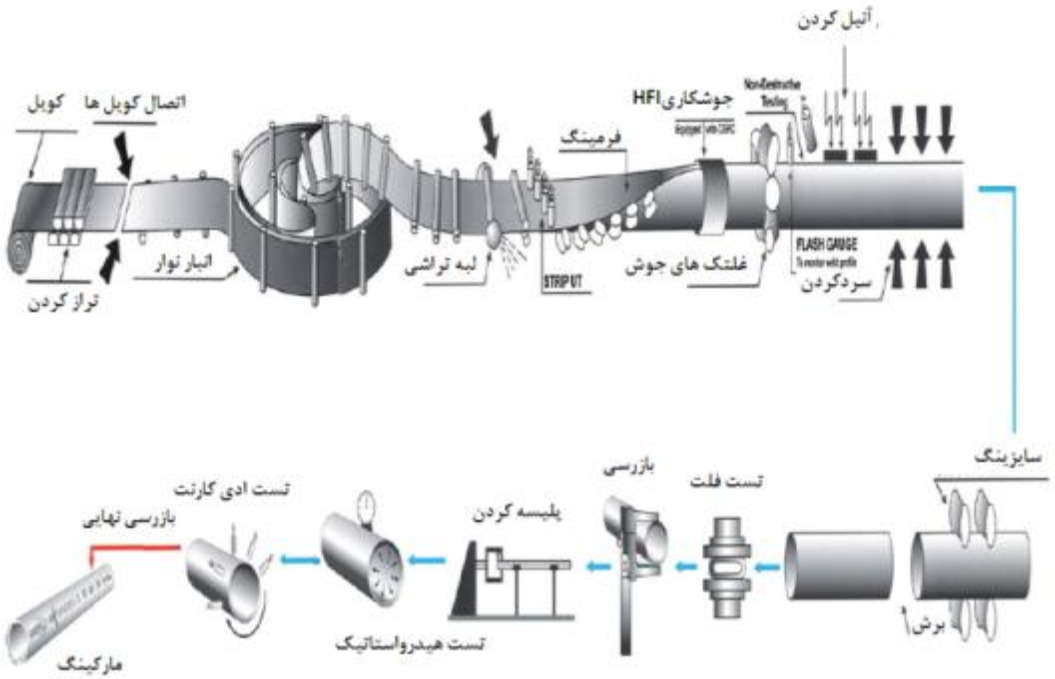
بنابراین پارامترهای عملیات حرارتی، اثر قابل توجهی بر ساختار متالوگرافی و خواص مکانیکی می‌گذارد. با انتخاب دقیق پارامترهای عملیات حرارتی و دستیابی به یک میدان دمایی مناسب، به کیفیت جوش و مصرف بهینه انرژی کمک می‌کند[۶].

پی. یان و همکارانش[۱] در مورد فولاد گرید X65 به این نتیجه رسیدند که پس از جوشکاری، تفاوت قابل توجهی در ساختار میکروسکوپی در مناطق مختلف جوش مشاهده گردید.

در منطقه متأثر از مکانیکی حرارتی (TMAZ)، دانه‌های فریت در امتداد جهت جریان فلز می‌باشد و مقدار قابل توجهی از M / A(مخلوطی از مارتنزیت و آستنیت) بر روی آهنگی از جریان فلز مشاهده شد. در قسمتی از منطقه متاثر از حرارت (HAZ) نزدیک به TMAZ، دانه‌بندی‌ها به طور کلی هم محور و مخلوطی از فریت با مقدار کمی از سمنتیت است. از سوی دیگر، ساختار منطقه‌ی HAZ مجاور به خط اتصال شامل فریت بینیت با برخی از ترکیبات M / A است. رسوبات درشت دانه پس از PWHT از بین رفته‌اند و تعداد رسوب کوچک (۲۰ نانومتر به ۳۰ نانومتر در قطر) به طور قابل توجهی در مقایسه منطقه جوش داده شده افزایش یافته است[۱].

پی. سی. چانگ و همکارانش [۷] چگالی نابجایی در فولاد گرید X65

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.3.1]



شکل۱: تصویر شماتیک از فرآیند تولید لوله‌های فولادی ERW [۳].

به طور قابل توجهی پس از فرآیند نرمالیزاسیون کاهش یافته است. علاوه بر این، مارتنزیت نوع لایه‌ای در فولاد به دانه فریت با مقدار کمی X65 پس از نرمالیزاسیون ۱/۳برابر بیشتر شده است که علت آن را می‌توان چگالی نابجایی بالاتر و تغییر شکل ساختار که به افزایش بازیابی و رشد دانه می‌پردازد بیان کرد[۷]. ام کل و همکارش[۸]در مرکز جوش، در نمونه بدون نرمالیزه طیف کربن زدایی به وضوح دیده شد. بنابراین ۵ نمونه با قطر ۶ میلی‌متر و به طول ۳۰ میلی‌متر انتخاب شد. در شرایط آزمایشگاهی ۵ نمونه با سرعت‌های متفاوتی که در جدول ۱ آمده است در کوره شبیه‌سازی شده عملیات حرارتی شدند. محدوده کربن‌زدایی در ساختار نمونه‌ها کاملا حذف شده است. تحقیقات میکروسکوپ نوری نیز نشان داد که نمونه ۴ و ۵ دارای دانه‌های ظریف و نمونه ۲ و۳ دارای دانه‌های درشت هستند. تغییر شکل در مناطق شکننده در سطوح شکست نمونه‌های ۴ و ۵ نسبت به نمونه‌های ۱تا ۳ قابل تشخیص است[۸].

جدول۱: سرعت لوله‌های انتخاب شده برای عملیات حرارتی[۸].

کل زمان عملیات حرارتی(min)	سرعت(m/min)	نمونه‌ها
۱۲۵/۰	۰/۲۶	(نمونه استاندارد) ۱
۱۲۰/۴	۰/۲۷	۲
۱۱۶/۱	۰/۲۸	۳
۱۳۵/۴	۰/۲۴	۴
۱۳۰/۰	۰/۲۵	۵

۲- نرمالیزاسیون

برای جوشکاری مقاومت الکتریکی از عملیات حرارتی نرماله استفاده می‌شود. در این نوع عملیات حرارتی میکروساختار همانند آنیل کردن شامل پرلیت، مخلوطی از پرلیت و فریت و یا مخلوطی از پرلیت و سمنتیت (بستگی به ترکیب شیمیایی فولاد) است. حرارت دادن فولاد در درجه حرارت کمی بالاتر از خط A_{C3} (حدود۵۰درجه سانتی‌گراد بالاتر)، نگه‌داشتن در آن دما تا زمانی که ساختار آن به آستنیت تبدیل شود و سپس سرد کردن در خارج از کوره یعنی در هوای تقریباً ساکن تا به درجه حرارت معمولی برسد. نرمالیزه کردن به منظور تعدیل ناهمواری‌ها و تنش‌های داخلی به کار می‌رود. پس از نرمالیزه کردن، ساختار دانه‌ای ریز و یکنواخت با خواص معین خوبی پدید می‌آید[۱۰-۹].

۳- مواد و روش تحقیق

ورق تهیه شده از جنس API 5L GR.B برای تولید لوله‌ای با ضخامت ۴٫۴۰ میلی‌متر، طول ۱۲ متر و قطر ۱۶۸٫۳ میلی‌متر (۶ اینچ) مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی ورق اولیه در جدول۲ ارایه شده است. ابتدا یک نمونه هنگامی که کوره خاموش می‌باشد و هیچ‌گونه نرمالیزاسیون روی لوله انجام نشده است تهیه گردید و سپس ۶ نمونه مطابق با سرعت‌های خط تولید ارائه شده در جدول۳ ساخته شد. از یک کوره القایی با محدوده حرارت‌دهی ۹۰۰-۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و متمرکز بر روی ناحیه جوش جهت انجام عملیات حرارتی لوله‌ها استفاده گردید. نمونه‌هایی از ناحیه جوش داده شده در لوله‌ها، جهت انجام آزمون متالوگرافی و SEM مطابق شکل ۲ تهیه شد.

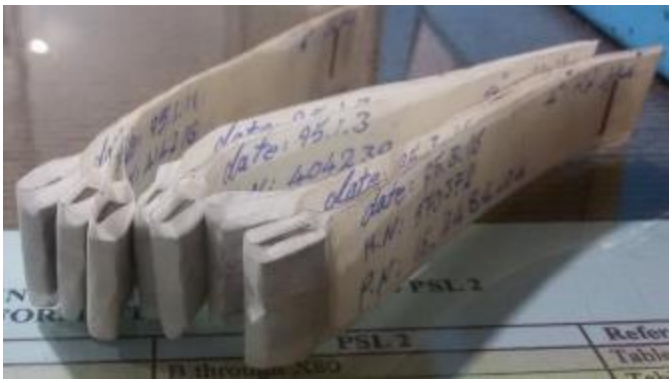
[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.3.1]

جدول ۲: ترکیب شیمیایی فلز پایه

٪C	٪Mn	٪Si	٪P	٪S	٪Al	٪V	٪Nb	٪Ti	٪Cr	٪Mo	٪Ni
۰٫۱۲۱	۰٫۷۹۷	۰٫۱۵۵	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۶	۰٫۰۳۲	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۲۶

جدول ۳: شماره گذاری نمونه‌ها بر اساس سرعت خط تولید

سرعت خط تولید (متر بر دقیقه)	شماره نمونه
نمونه نرمالیزه نشده	۱
۱۱	۲
۱۲	۳
۱۳	۴
۱۳.۷	۵
۱۴.۵	۶
۱۶	۷



شکل۲: نمونه‌های متالوگرافی آماده شده از واحد تراشکاری جهت انجام متالوگرافی

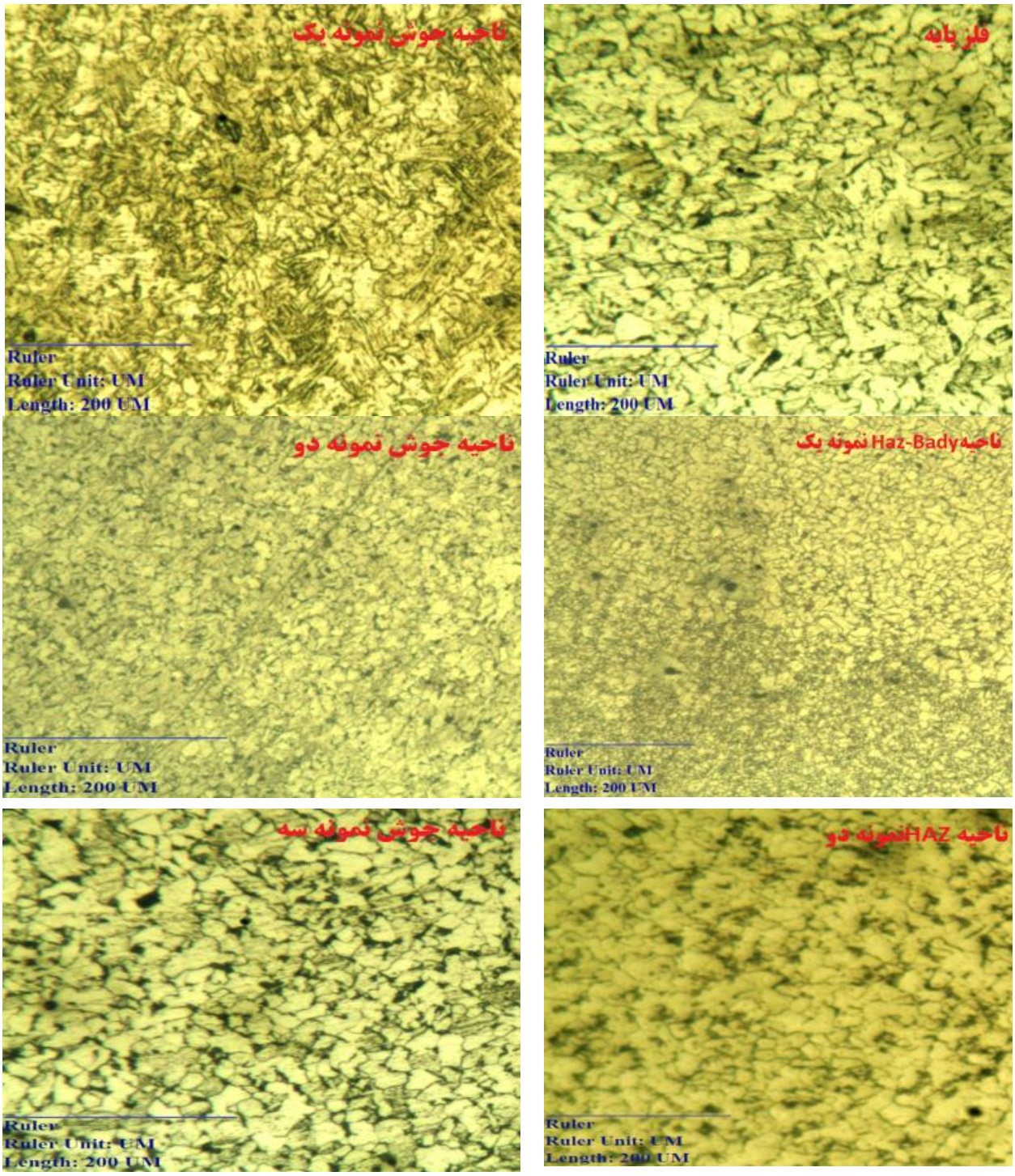
پس از عملیات سنباده زنی، نمونه‌ها در محلول نایتال ۵ درصد اچ شده و با مشاهده زیر میکروسکوپ نوری و الکترونی، تحت آزمون و بررسی قرار گرفت.

۴- نتایج و بحث

تصاویر متالوگرافی با بزرگنمایی یکسان(۱۰۰برابر) در اشکال۳ و ۴، شامل فلز پایه و نواحی جوش و منطقه متأثر از حرارت است. شکل ۳ علاوه بر ساختار فلز پایه، تصاویر متالوگرافی نمونه‌ی یک تا سه و مابقی تصاویر متالوگرافی نمونه‌ها در شکل ۴ آمده است. فلز پایه در شکل ۳ دارای ساختاری فریتی و پرلیتی است. ساختار جوش نمونه‌ی شماره ۱ که نرمالیزاسیون پس از اتصال لبه‌ها به هم و ایجاد جوش انجام نگردید گواه بر متفاوت بودن با ساختار فلز پایه می‌باشد این نمونه دارای ساختاری پرلیتی و فریت سوزنی یا ویدمن‌اشتاین است و منطقه متأثر از حرارت در نمونه ۱ با دانه‌بندی بسیار ریز مشاهده گردید. در نمونه‌ی ۴ از نمونه ۵ ریزدانه‌تر است.

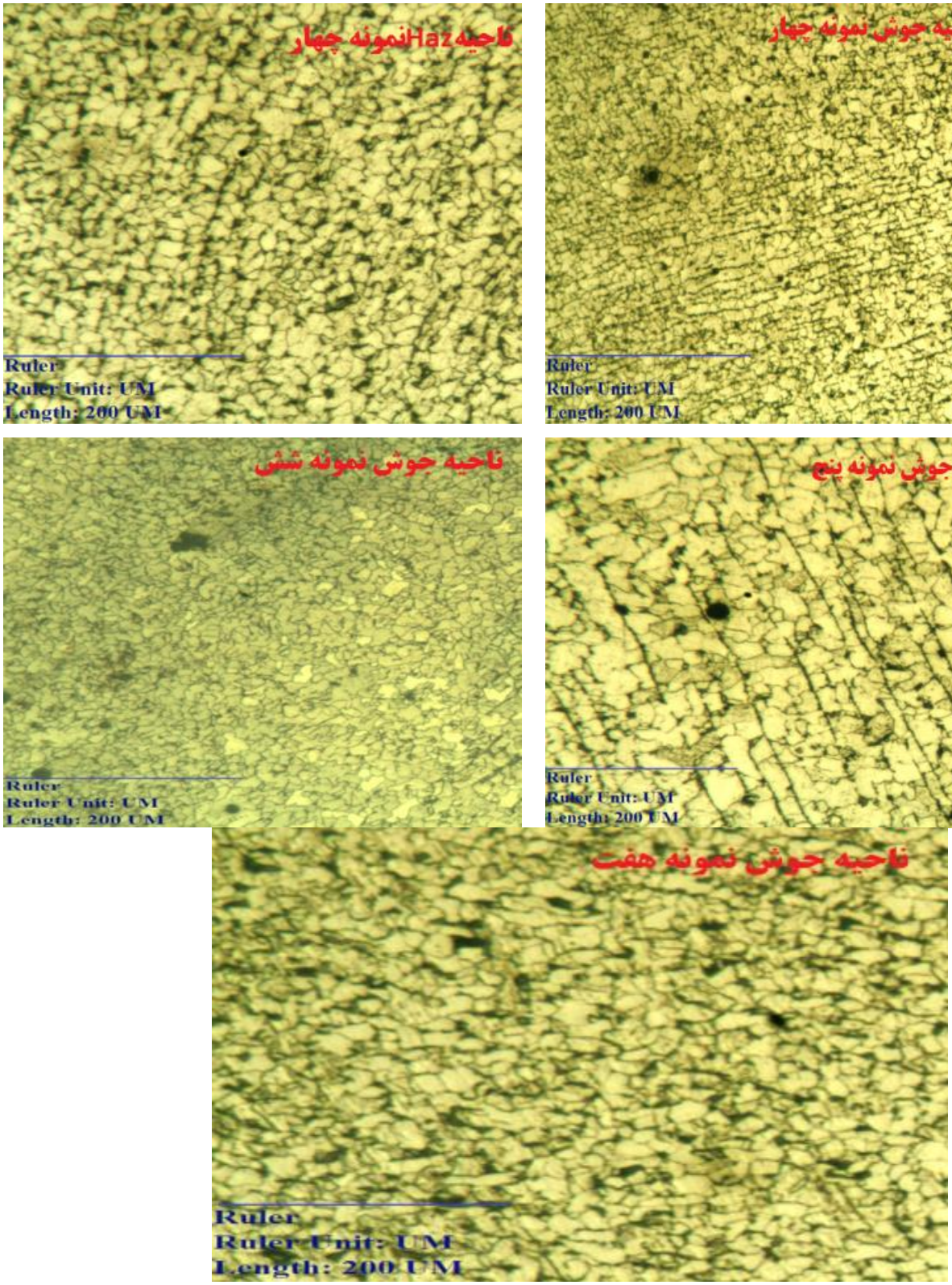
۲، که با سرعت ۱۱ متر بر دقیقه تولید گردید علاوه بر اینکه منطقه‌ی جوش ریز دانه است دارای منطقه متأثر از حرارت نیز می‌باشد. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌کنید در نمونه‌های ۴ و ۵ که با سرعت‌های ۱۳ و ۱۳/۷ متر بر دقیقه تولید گردید نتایج قابل توجهی در بررسی‌های متالوگرافی نمونه‌ها دریافت شد بر خلاف مابقی نمونه‌ها، منطقه متأثر از مکانیکی حرارتی مشاهده گردید. همچنین در نمونه ۴ منطقه متأثر از حرارت نیز مشاهده گردید و ساختار منطقه جوش نمونه تصاویر متالوگرافی نمونه‌های ۳، ۶ و ۷ که در اشکال ۳ و ۴ آمده است پس از نرمالیزاسیون هیچ‌گونه مناطق متأثر از حرارت و متأثر از مکانیکی حرارتی مشاهده نشد. اما به نظر می‌رسد ساختار جوش نمونه‌ی ۳ریزدانه‌تر است. اشکال ۵ و ۶ تصاویر SEM فلز پایه و ناحیه جوش در بزرگنمایی یکسان (۵۰۰۰ برابر) ارائه شده است. نمونه ۱ که نمونه نرمالیزه نشده است ساختار جوش آن پرلیت و فریت سوزنی است. ساختار تمامی نمونه‌های نرمالیزه شده در اشکال ۵ و ۶ مشابه فلز پایه، فریت و پرلیت است.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.3.1]



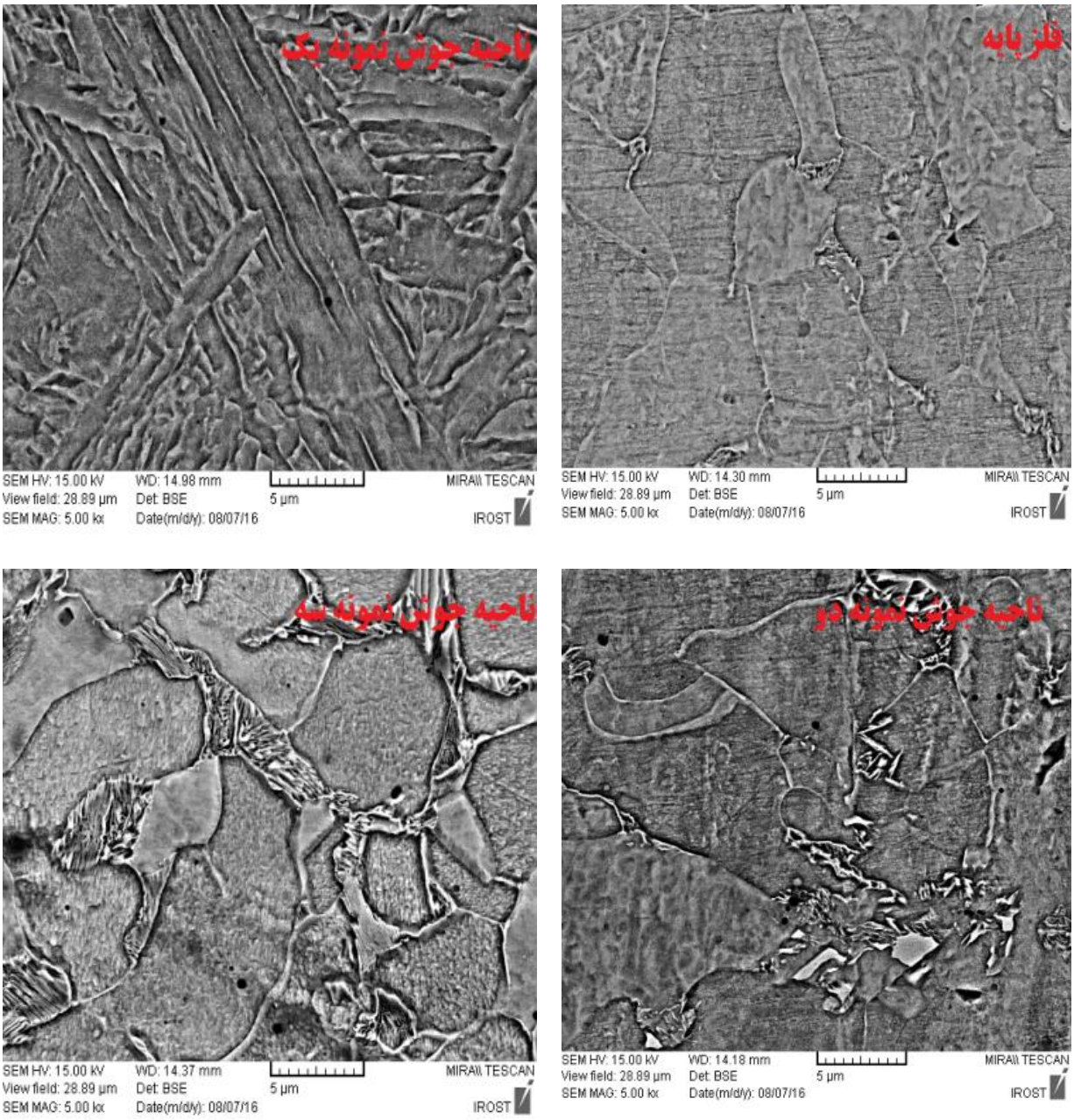
شکل ۳: تصاویر متالوگرافی از فلز پایه و نمونه‌های ۱، ۲ و ۳

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.3.1]



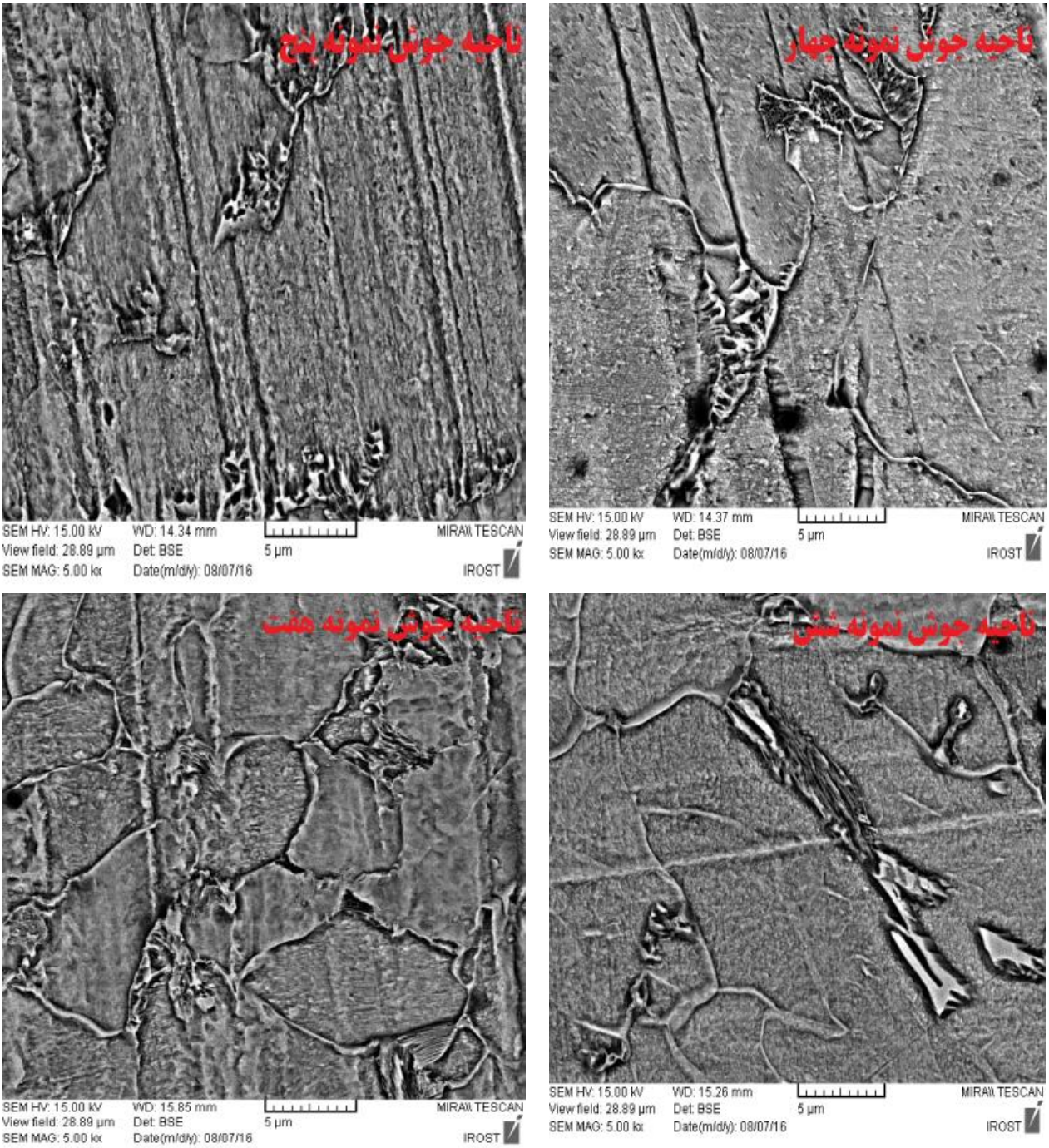
شکل۴: تصاویر متالوگرافی از نمونه‌های ۴، ۵، ۶ و ۷

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.3.1]



شکل ۵: تصاویر SEM نمونه‌های ۱، ۲و ۳

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.3.1]



شکل ۶: تصاویر SEM نمونه‌های ۴، ۵، ۶ و ۷

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌کنید در نمونه‌های ۴ و ۵ منطقه متأثر از مکانیکی حرارتی همانند آزمون متالوگرافی قابل مشاهده می‌باشد اما نکته قابل توجه در نمونه ۷ است که در بزرگنمایی ۵۰۰۰ در ناحیه جوش به طور ضعیف مشاهده شد؛ منطقه متأثر از مکانیکی حرارتی است که این امر با نتایج متالوگرافی مربوط به این نمونه متمایز است.

[4] Yan Pei, 2011, High Frequency Induction Welding & Post-Welding Heat Treatment of Steel Pipe, A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy. 179 (2006) 225–230.

[5] E. Treiss. Induction Annealing of welds in the fabrication of high-frequency induction welded steel line pipes. 3R

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.3.1]

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، نرمالیزه کردن لوله‌های فولادی گرید B تولید شده به روش جوشکاری مقاومت الکتریکی فرکانس بالا مورد مطالعه قرار گرفته است.

هفت لوله که یکی از آنها نرمالیزه نشده و مابقی در سرعت‌های مختلف نرمالیزه شده، تولید و از آنها برای آزمون‌های متالوگرافی و SEM نمونه‌برداری گردید. نتایج نشان داد ریزساختار فلز پایه شامل دانه‌های هم محور پرلیت و فریت و ریزساختار ناحیه جوش قبل از نرمالیزاسیون پرلیت و فریت سوزنی می‌باشد. در نمونه‌های ۴ و ۵ منطقه متأثر از مکانیکی حرارتی دیده شد در حالی که در مابقی نمونه‌ها چنین حالتی دیده نشد با مشاهده تصاویر SEM به نکته قابل توجهی رسیدیم که در تصاویر متالوگرافی دیده نشد در نمونه ۷ که با سرعت ۱۶ متر بر دقیقه تولید شد منطقه متأثر از مکانیکی حرارتی دیده شد در حالی که در تصویر متالوگرافی نمونه ۷ چنین چیزی مشاهده نگردید نمونه ۳ که با سرعت ۱۲ متر بر دقیقه تولید شده است شرایط مناسب‌تری دارد زیرا دارای ساختاری مشابه با ساختار فلز پایه (فریت و پرلیت هم محور) بوده است.

۶- مراجع

[1] Ö.E.GÜNgÖr, P.Yan, P. Thibaux, M. Liebeherr, H. k.D.H.Bhadeshia, D. Quidort, Investigations into the microstructure- toughness relation in high frequency induction welded pipes, IPC 2010, 31372.

[2] P. Yan. ¨O. E. G¨ung¨or, P. Thibaux, M. Liebeherr, H. K. D. H. Bhadeshia, Tackling the Toughness of Steel Pipes Produced by High Frequency Induction Welding and Heat–Treatment,Materials Science and Engineering A 528 (2011) 8492– 8499

[3] Khalid Ali Babakri, Improvements in flattening test performance in high frequency induction welded steel pipe mill, Journal of Materials Processing Technology, 210 (2010) 2171–2177.

International, 20(11):627–630, 1981.

[6] Yi Han , Enlin Yu , Hongliang Zhang , Daochen Huang, Numerical analysis on the medium- frequency induction heat treatment of welded pipe, Applied Thermal Engineering, 51 (2013) 212e217.

[7] P.C. Chung, Yoonjin Ham, Sanghoon Kim, Jeongh Lim, Changhee Lee, Effects of post-weld heat treatment cycles on microstructure and mechanical properties of electric resistance welded pipe welds, Materials and Design, 34 (2012) 685–690.

[8] M. C o¨ l, M. Yılmaz, The determination of heat treatment parameters of X52 microalloyed steel after high frequency induction welding, Materials and Design, 27 (2006) 507–512.

[۹] توسیرکانی- حسین-چاپ سوم- تابستان ۱۳۸۲- ویرایش دوم- اصول علم مواد(ساختار، خواص و مهندسی مواد)- مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان.

[۱۰] دکتر گلعداز- محمدعلی- پاییز۱۳۸۸- اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها- دانشگاه صنعتی اصفهان مرکز نشر.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.3.1]