



گروه ملی صنعتی فولاد ایران



انجمن آهن و فولاد ایران



دانشگاه شهید چمران اهواز

سمپوزیوم فولاد ۸۷

۱۳ و ۱۴ اسفند ماه ۸۷

اهواز - دانشگاه شهید چمران

بررسی نواری شدن (بندینگ) ورقهای نورد داغ شده فولاد میکروآلیاژی S355N

علیرضا ابراهیمی، هادی ابراهیم پور^۱، آرزو ابیضی^۲
دانشگاه صنعتی سهند

چکیده

یکی از عمده ترین فرایندهای تولید فولادهای میکروآلیاژی، مرحله نورد داغ می باشد که این مرحله وقوع پدیده نواری شدن ریزساختار (بندینگ) را تشدید می نماید. نواری شدن با تشکیل لایه های متناوب و منظم فریت و پرلیت در امتداد نورد فولادهای میکروآلیاژی اتفاق می افتد که S355N از جمله این فولادها بوده و کاربرد فراوانی در پلسازی دارد.

در این تحقیق با اتخاذ رویه ای متالورژیکی و مبتنی بر تهیه تصاویر میکروسکوپی از نواحی مختلف ورق نورد شده با ضخامتهای مختلف، فاصله متوسط بین لایه ها اندازه گیری شده و مشخص گردید با افزایش ضخامت ورق فاصله بین لایه ها افزایش می یابد. ضمن اینکه این فاصله ها در ورق های دارای ضخامت یکسان، ثابت می باشد. میزان اختلاف این فواصل و جزئیات بیشتر در متن مقاله شرح داده شده است.

کلمات کلیدی: فولاد میکروآلیاژ S355N، نورد داغ، بندینگ، کرنش موضعی.

¹ hadi_ebr_s@yahoo.com

² a_abyazi@sut.ac.ir

مقدمه

فولادهای میکروآلیاژی گروه مهمی از فولادها و تقریباً ۱۲٪ از کل تولید فولاد جهان را شامل می‌شوند. پیشرفت این فولادها نقش مهمی در توسعه صنایع کلیدی استخراج نفت و گاز، پل سازی و صنایع حمل و نقل داشته است. این فولادها بطریق نورد گرم تولید می‌شوند [۱]. طبیعت دندریتی فرایند انجماد در فولادها منجر به جدایش ناخالصی‌ها و عناصر آلیاژی می‌شود. یکی از پیامدهای این جدایش‌ها تشکیل ساختارهای نواری شده در فولادها می‌باشد. معمول‌ترین نوع ریزساختارهای نواری شده در فولادها، ریزساختار حاوی باندهای فریت-پرلیت (نواری شده) است که بطور گسترده‌ای در فولادهای ساده کربنی و همچنین فولادهای کم آلیاژی که با سرعت کمی خنک شده‌اند مشاهده می‌شود [۷-۲]. انجماد دندریتی منجر به افزایش غلظت عناصر آلیاژی در مناطق بین دندریتی و کاهش آن در هسته‌ی دندریت‌ها می‌شود که این اختلاف غلظتی جدایش دندریتی نامیده می‌شود [۸و۲]. آقای استید^۱ اولین کسی بود که اثر این جدایش‌ها را بر روی پدیده‌ی نواری شدن بررسی نمود. وی اظهار داشت که باندهای فریتی همان باندهای غنی از فسفر بوده و دلیل اصلی نواری شدن جدایش فسفر می‌باشد. اما پس از آن محققان دیگری با مشاهده پدیده نواری شدن در فولادهای حاوی فسفر بسیار کم این مطلب را رد نمودند [۹-۱۰]. به نظر می‌رسد کربن به علت دارا بودن ضریب نفوذ بالا و پخش همگن حین خنک شدن نمی‌تواند موجب نواری شدن باشد. عناصر آلیاژی به ویژه Mn, Ni, P, Cr, Si، به دلیل ضریب نفوذ پایین خود، جدایش ایجاد نموده و منجر به تغییر دمای A_3 می‌شوند. در این میان عناصری مثل Mn و Ni منجر به کاهش دمای A_3 (پایدار کننده‌ی آستنیت) و عناصری مثل P و Cr و Si منجر به افزایش دمای A_3 (پایدار کننده‌ی فریت) می‌شوند. از بین این عناصر، منگنز بیشترین اثر را بر روی نواری شدن دارد. حین خنک شدن، فریت پرویونکتوئید ابتدا در مناطق حاوی منگنز پایین جوانه می‌زند که کربن و منگنز به داخل آستنیت نفوذ نموده و در نهایت پرلیت در مناطق حاوی منگنز بالا شکل می‌گیرد [۱۱].

در این تحقیق ضمن تهیه تصاویر ریزساختاری و اندازه‌گیری فواصل بین باندهای فریت-پرلیت ثابت می‌شود که رابطه‌ی مستقیمی بین سرعت سرد شدن و فاصله‌ی بین باندهای فریت-پرلیت در فولاد میکروآلیاژی S355N وجود دارد. از دیگر نتایج این تحقیق اندازه‌گیری مقادیر متوسط فاصله‌ی بین باندهای فریت-پرلیت برای نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف است که ثابت می‌شود پراکندگی فاصله بین باندهای فریت-پرلیت در نقاط مختلف نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف بسیار ناچیز بوده و لذا می‌توان مقادیر متوسط آنها را بدست آورد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق ورق‌های نوردگرم شده‌ی فولاد میکروآلیاژی S355N مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۱ نشان داده شده است. نمونه‌ها جهت بررسی ریزساختاری از

^۱ Stead

ورق‌ها با ضخامت‌های ۲۵، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر (در هر سه بعد) تهیه شده و سپس عملیات متالوگرافی بر روی آنها انجام گردید. جهت سنباده‌زنی از سنباده‌های ۸۰ تا ۲۵۰۰ استفاده شد و در مرحله‌ی بعد نمونه‌ها با استفاده از پودر Al_2O_3 با اندازه دانه‌ی ۰/۳ میکرون و ۰/۰۵ میکرون پولیش شدند. پس از انجام عملیات متالوگرافی از هر کدام از سطوح نمونه‌ها (طولی-عرضی و ضخامت) و بصورت کاملاً تصادفی بطور جداگانه تصاویری از میکروساختار در بزرگنمایی‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ توسط میکروسکوپ نوری MPG3 تهیه شد. در مرحله بعد متوسط فاصله‌ی بین باندهای فریتی-پرلیتی و ضخامت باندهای پرلیتی و همچنین درصد پرلیت موجود در ریزساختار با استفاده از نرم‌افزار کلمکس^۱ محاسبه شد.

نتایج

در شکل ۱ تصاویری از ریزساختار ورق‌ها با ضخامت‌های مختلف در جهات طولی-عرضی و ضخامت دیده می‌شود. نواری شدن در جهات طولی و عرضی در تمامی نمونه‌ها کاملاً مشهود است. منحنی تغییرات فاصله بین باندهای فریت-پرلیت جهت طولی نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است. محور افقی نشان‌دهنده نقاط تصادفی از نمونه‌ها و محور عمودی فاصله بین باندهای فریت-پرلیت را نشان می‌دهد. داده‌های این نمودار از طریق تهیه تصاویر میکروسکوپی در نقاط تصادفی نمونه‌ها بدست آمده است. مشاهده می‌شود پراکندگی فاصله بین باندها در نمونه‌های با ضخامت‌های مختلف بسیار کم بوده و باندها در فواصل بسیار منظمی از همدیگر قرار گرفته‌اند که با توجه به وجود این فواصل منظم می‌توان میانگینی برای آنها محاسبه نمود. همانطوریکه در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ضخامت باندهای پرلیتی وابستگی زیادی به ضخامت نمونه‌ها دارد. تغییرات ضخامت باندهای پرلیتی و درصد پرلیت موجود در ریزساختار در نقاط تصادفی از نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف نیز بسیار کم بوده و لذا متوسط آنها نیز بدست آمد. در جدول ۲ متوسط فاصله بین باندها، ضخامت باندهای پرلیتی و درصد پرلیت موجود در ریزساختار در دو جهت طولی و عرضی برای نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف با هم مقایسه شده است. مشاهده می‌شود در نمونه‌های با ضخامت‌های مختلف، با افزایش ضخامت متوسط فاصله بین باندها و همچنین ضخامت باندهای پرلیتی افزایش می‌یابد. درصد پرلیت موجود در ریزساختار نیز رفتار مشابهی داشته و با افزایش ضخامت نمونه‌ها، درصد پرلیت نیز افزایش می‌یابد. نیز دیده می‌شود که فاصله بین باندها، ضخامت باندهای پرلیتی و درصد پرلیت موجود در ریزساختار جهات طولی و عرضی تفاوت چندانی با هم ندارند.

بحث

بررسی نتایج بدست آمده از نمونه‌های دارای ضخامت‌های مختلف موید این مطلب است که ضخامت ورق‌ها تاثیر فراوانی بر روی فاصله بین باندهای فریتی-پرلیتی و ضخامت باندهای پرلیتی و همچنین درصد

^۱ Image Analyzer Clemex

پرلیت در ریزساختار نهایی دارد. با افزایش ضخامت، فاصله بین باندها و همچنین ضخامت باندهای پرلیتی و درصد پرلیت در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. کمترین فاصله‌ی بین لایه‌ای در نمونه با ضخامت ۲۵ میلی‌متر مشاهده شد. دلیل این اختلافات را می‌توان افزایش سرعت خنک شدن با کاهش ضخامت توجیه نمود. در مطالعات قبلی اثبات شده است که پدیده بندینگ تنها در سرعت‌های سرد کردن پایین شکل می‌گیرد که محدوده‌ی سرعت سرد کردن برای ایجاد ریزساختارهای نواری شده تابع نوع فولاد و همچنین فرایندهای انجام شده بر روی آن است [۱۲ و ۱۳]. بنا به تحقیقات ساموئلز^۱ حذف بندینگ در سرعت‌های بالای سرد شدن بالا ممکن است ناشی از تغییر مورفولوژی رسوب فریت از آستنیت باشد [۱۴]. سرعت خنک شدن تاثیر فراوانی روی فرایندهای نفوذی دارد بطوری‌که با افزایش سرعت سرد شدن، تحت تاثیر سرعت انجماد بعنوان یک فرایند نفوذی، دانه‌های ریزتری تشکیل خواهند شد که در واقع موجب افزایش مساحت مرز دانه می‌گردد. به این صورت با توجه به این که مرز دانه‌های آستنیت مکان‌های مرجح جوانه‌زنی فریت پرئوتکتوئید می‌باشند، مکان‌های مرجح جوانه‌زنی فریت پرئوتکتوئید نیز افزایش یافته و فریت پرئوتکتوئید با سرعت بیشتری شروع به جوانه زنی می‌نماید [۱۶-۱۴]. آقای گرنج^۲ ثابت کرد که فاصله بین باندهای فریتی-پرلیتی به فاصله‌ی بازوهای دندریتی اولیه بستگی داشته و مستقل از فاصله بازوهای دندریتی ثانویه است [۱۶]. همچنین گراسترلیندن^۳ در تحقیقات خود به این نتیجه رسید که با افزایش سرعت سرد شدن فاصله باندهای فریت-پرلیت کاهش می‌یابد [۱۷].

از طرف دیگر افزایش سرعت سرد شدن تاثیر فراوانی بر روی جدایش عناصر آلیاژی نظیر Mn دارد و با توجه با اینکه عناصر آلیاژی دلیل اصلی نواری شدن فولادها می‌باشند، افزایش سرعت سرد شدن بر روی شدت نواری شدن ریزساختار نیز اثر می‌گذارد. همچنان که گفته شد برای نواری شدن لازم است در ابتدا فریت پرئوتکتوئید در محل‌های خالی از عناصر آلیاژی تشکیل شده و در ادامه با خروج کربن و عناصر آلیاژی در اطراف آن باند پرلیتی تشکیل شود. خروج کربن و عناصر آلیاژی نیز نوعی مکانیزم نفوذی است که با افزایش سرعت سرد شدن، میزان خروج کاهش می‌یابد. به این معنی که فاصله‌ای که کربن و منگنز (البته در اینجا اثر منگنز بدلیل ضریب نفوذ پایین آن بسیار بیشتر است) تحت مکانیزم نفوذ طی می‌کنند، کاهش یافته و منجر به کاهش فاصله باندها می‌شود. به عبارت دیگر با توجه به اینکه عناصر آلیاژی در مناطق بین بازوهای دندریتی تجمع می‌کنند و با افزایش سرعت سرد شدن فاصله‌ی بین بازوهای دندریتی کاهش می‌یابد، فاصله‌ی باندهای فریتی و پرلیتی حاصل نیز کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر مکانیزم تشکیل پرلیت بصورت نفوذی است و هرچه سرعت سرد شدن کمتر باشد، پرلیت بیشتری تشکیل خواهد شد. پرلیتی که در دماهای بالا و سرعت سرد شدن‌های پایین شکل می‌گیرد درشتتر از پرلیتی است که در دماهای پایین و سرعت سرد شدن‌های بالاتر شکل می‌گیرد. پس افزایش درصد پرلیت و همچنین ضخامت باندها با کاهش سرعت سرد شدن قابل توجیه خواهد بود. هرچه ضخامت نمونه‌ها کاهش یابد،

¹ Samuels

² Grange

³ Grossterlinden

اندازه‌ی دانه‌ها ریزتر و کشیدگی آنها در جهت نورد بیشتر خواهد بود. بنابراین مکانهای مرجح جهت جوانه‌زنی باندها در راستای نورد بیشتر شده و منجر به تشدید بندینگ خواهد شد که در نتیجه آن فاصله بین باندها و ضخامت آنها کاهش می‌یابد (شکل ۴).

اینکه فاصله‌ی بین باندها در دو جهت طولی و عرضی در نمونه‌های با ضخامت‌های مختلف تفاوت چندانی با هم ندارد بیانگر این مطلب است که فرایند انتقال حرارت در دو جهت طولی و عرضی یکسان بوده و منجر به ایجاد سرعت‌های سرد شدن یکسان شده است.

نتیجه‌گیری

- ۱- با افزایش ضخامت، سرعت سرد شدن کاهش یافته که به موجب آن فاصله بین بازوهای دندرتی اولیه نیز کاهش یافته و منجر به کاهش فاصله‌ی بین باندهای فریتی-پرلیتی می‌گردد.
- ۲- با افزایش ضخامت و کاهش سرعت سرد شدن، ضخامت باندهای پرلیتی و همچنین درصد پرلیت موجود در میکروساختار نهایی، افزایش می‌یابد و دلیل آن هم تشکیل پرلیت بیشتر و درشت‌تر است.
- ۳- فاصله‌ی باندهای فریتی-پرلیتی در دو جهت طولی و عرضی نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف تفاوت چندانی با همدیگر نداشته و افزایش ضخامت نمونه‌ها هیچ تاثیری بر روی اختلاف فاصله باندهای فریتی-پرلیتی در دو جهت طولی و عرضی ندارد.

مراجع

- [1] C. Miki, K. Homma, T. Tominaga, (2002) "High strength and high performance steels and their use in bridge structures" Journal of Constructional Steel Research, 58, pp. 3-20.
- [2] John D. Verhoeven, "A Review of Microsegregation Induced Banding Phenomena in Steels", Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 9(3) June 2000, pp. 286-296.
- [3] W. F. Smith, "Structure and Properties of Engineering Alloys", McGraw-Hill, New York, NY, 1993, pp. 125-28.
- [4] R. E. Reed-Hill and R. Abbashian: "Physical Metallurgy Principles", PWS-Kent, Boston, MA, 1992, pp. 459-61.
- [5] T. B. Smith, J. S. Thomas, and R. Goodall: J. Iron Steel Inst., 1963, July, pp.602-09.
- [6] J. D. Lavender and F. W. Jones: J. Iron Steel Inst., 1949, vol. 163, pp. 14-17.
- [7] R. G. Ward: J. Iron Steel Inst., 1965, Sept., pp. 930-33.
- [8] G. KRAUSS, "Solidification, Segregation, and Banding in Carbon and Alloy Steels", Metallurgical and Materials Transaction d B.34, Vol34B , 2003, pp. 781-792
- [9] J. E. Stead: J. Soc. Chem. Ind., 1913, vol. 33, pp. 173-84.
- [10] J. E. Stead: J. Iron Steel Inst., 1915, vol. 91, pp. 140-81.
- [11] Ted F. Majka, David K. Matlock, and George Krauss, "Development of Microstructural Banding in Low-Alloy Steel with Simulated Mn Segregation", Metallurgical and Materials Transaction d, Volume 33A, June 2002, pp. 1627-1637
- [12] H. M. Howe: "The Metallography of Steel and Cast Iron", McGraw-Hill, New York, NY, 1916, pp. 556-65.

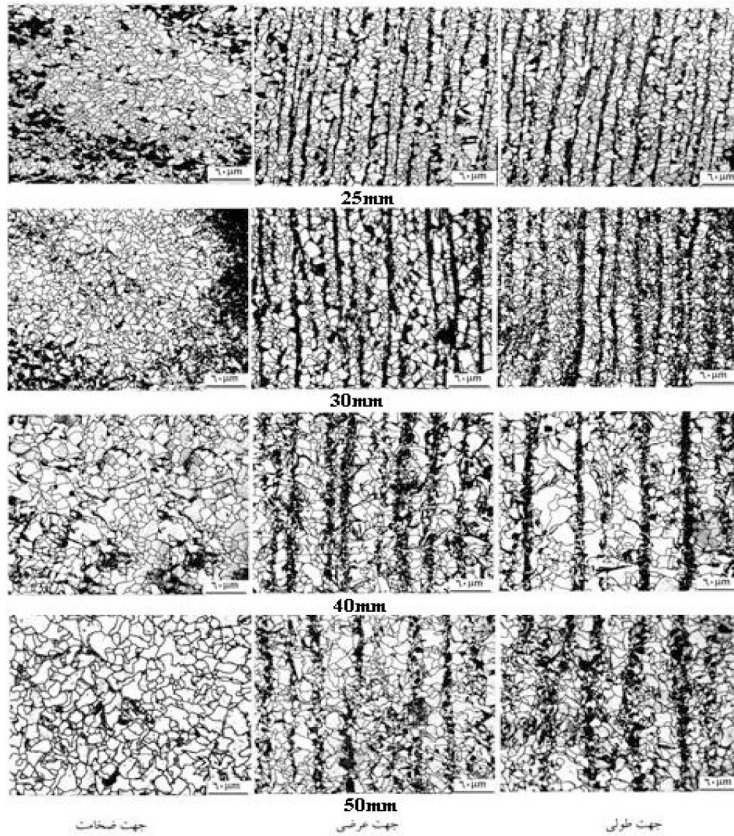
- [13] M. A. Portevin: Rev. Metall., 1913, vol. 10, pp. 689–91.
 [14] L. E. Samuals: “Optical Microscopy of Carbon Steels”, ASM, Metals Park, OH, 1980, pp. 127–35.
 [15] H. C. H. Carpenter and J.M. Robertson: J. Iron Steel Inst, 1931, Vol.118, pp. 345–79.
 [16] R. A. Grange: Metall. Trans., 1971, Vol. 2, pp. 417–26.
 [17] R. Grossterlinden, R. Kawalla, U. Lotter, and H. Pircher: Steel Res., 1992, Vol. 63, pp. 331–36.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد میکروآلیاژی S355N.

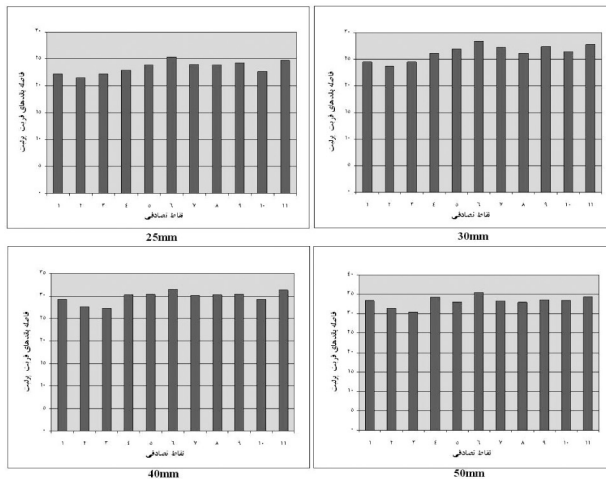
عنصر	C	Si	Mn	P	S	N	Al _{total}	Cu	Ni	V	C _E ⁽¹⁾
درصد وزنی	۰/۲۰	۰/۵۰	۰/۹–۱/۶۵	۰/۰۳۰	۰/۰۲۵	۰/۰۱۵	۰/۰۲	۰/۵۵	۰/۵	۰/۱۲	۰/۴۳

جدول ۲. مقایسه فاصله بین باندها، ضخامت باندهای پرلیتی و درصد پرلیت در دو جهت طولی و عرضی.

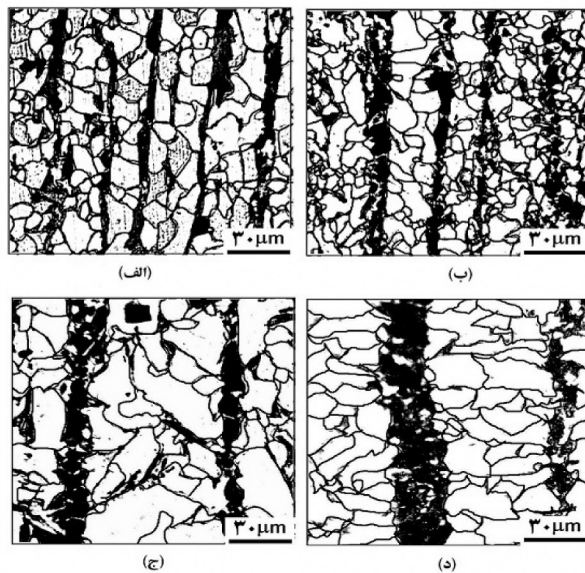
ضخامت ورق (میلی متر)	جهت	فاصله باندها (میکرون)	ضخامت باندها پرلیتی (میکرومتر)	درصد پرلیت
۲۵	طولی	۲۳	۶/۵	٪۲۰
	عرضی	۲۲	۶/۵	٪۱۹
۳۰	طولی	۲۶	۸	٪۲۳
	عرضی	۲۶/۵	۷/۵	٪۲۴
۴۰	طولی	۲۹	۹	٪۲۶
	عرضی	۲۷/۵	۹	٪۲۵,۵
۵۰	طولی	۳۳	۱۱	٪۲۹
	عرضی	۳۳/۵	۱۱/۵	٪۲۹



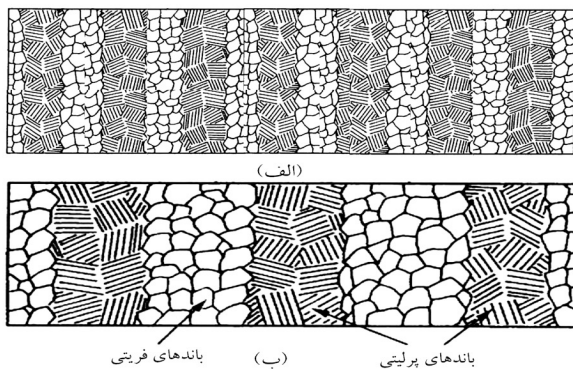
شکل ۱. تصاویری از ریزساختار ورق‌ها با ضخامت‌های مختلف در سه جهت طولی-عرضی و ضخامت.



شکل ۲. نمودار تغییرات در فاصله‌ی بین لایه‌های پیرلیتی در نقاط تصادفی از نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف.



شکل ۳. تصاویری از ضخامت باندهای پرلیتی در نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف.
 (الف) ۲۵ میلی‌متر (ب) ۳۰ میلی‌متر (ج) ۴۰ میلی‌متر و (د) ۵۰ میلی‌متر



شکل ۴. تصویر شماتیکی از اثر اندازه دانه‌ها بر روی شدت نواری شدن و فاصله باندها.