



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

مکان‌های مرجح جوانه زنی حفرات در فولاد میکروآلیاژی S355N

هادی ابراهیم پور^۱، علیرضا ابراهیمی^۲، آرزو ابیضی^۳
دانشگاه صنعتی سهند تبریز

چکیده

تشکیل حفره در حین تغییر شکل پلاستیک فلزات از مواردی بسیار رایج است که موجب شکست قطعات می‌شود. مطالعات محققان بر روی مکان‌های رایج جوانه‌زنی حفرات، آخال‌هایی همچون سولفید منگنز (MnS) و نیتريد تیتانیم (TiN) را مکان مرجح جوانه زنی حفرات معرفی نموده است. لیکن ویژگی فولادهای امروزی نظیر فولاد میکروآلیاژی S355N محتوای بسیار کم آخال و ناخالصی‌ها می‌باشد. وقوع پدیده نواری شدن ریزساختار (بندینگ) در فولادهای میکروآلیاژی رایج است که با تشکیل لایه‌های متناوب و منظم فریت و پرلیت در امتداد نورد شکل گرفته و تأثیر زیادی بر روی جوانه‌زنی حفرات دارد.

در این تحقیق مکان‌های مرجح جوانه‌زنی حفرات در نمونه‌های کشش با ضخامت‌های مختلف از جنس فولاد میکروآلیاژی S355N با کاربردی فراوان در پلسازی، بررسی شد. از نتایج این تحقیق اثر بسیار زیاد بندینگ بر روی مکان‌های مرجح جوانه‌زنی حفرات می‌باشد که تقریباً ۹۵٪ حفرات در فصل مشترک لایه‌های فریت-پرلیت شکل می‌گیرند.

کلمات کلیدی: جوانه‌زنی حفرات، فولاد میکروآلیاژی، بندینگ.

¹ hadi_ebr_s@yahoo.com

² Ebrahimi@sut.ac.ir

³ a_abyazi@sut.ac.ir

مقدمه

جوانه‌زنی حفرات ریز در فولادها به عنوان اولین مرحله آغاز شکست از اهمیت بالایی برخوردار است که در ادامه با رشد این حفرات شکست نهایی رخ می‌دهد. اخیراً تحقیقات زیادی بر روی تأثیر ریزساختار بر روی جوانه زنی و رشد حفرات در فولادهای ساختمانی صورت گرفته و در اکثر آنها به نقش مرزخانه‌ها، رسوبات و ذرات فاز دوم تأکید شده است. مطالعات قبلی بر روی شکست نرم فولادها، تمایل به تأکید روی نقش آخال‌های سولفید منگنز و سولفید تیتانیم (TiN, MnS) بود [۱]. تصاویر سطح مقطع نمونه‌های شکست حاکی از جوانه زنی حفرات در فصل مشترک فولاد با این سولفیدها در کرنش‌های بسیار پایین و جدایش فصل مشترک آنها می‌باشد [۲ و ۳]. یکی از ویژگی‌های فولادهای میکروآلیاژی و نورد شده محتوای کم آخال و ناخالصی‌ها و همچنین وجود پدیده‌ی نواری شدن ریزساختار (بندینگ) می‌باشد که منجر به ایجاد لایه‌های متناوب فریت-پرلیت در راستای جهت نورد می‌شود. این ساختار شباهت بسیار زیادی به ساختار کامپوزیت‌ها داشته و می‌توان آن را همانند یک کامپوزیت حاوی رشته‌های پرلیتی در یک زمینه‌ی فریتی در نظر گرفت [۴-۶].

مواد و روش‌ها

در این مقاله از ورق‌های نورد گرم شده فولاد میکروآلیاژی S355N که کاربرد فراوانی در پل‌سازی دارد استفاده شد. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول (۱) آورده شده است. ابتدا تعداد ۴ نمونه متالوگرافی از قسمتهای مختلف ورقهای با ضخامت‌های ۲۵ و ۳۰ و ۴۰ و ۵۰ میلیمتر تهیه با کاتر برش یافته و برای مشاهده ریزساختار آماده شدند. به این صورت که سطح نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌های از شماره ۱۰۰ تا ۲۵۰۰ با دقت صاف شده و با پودر آلومینای ۱ میکرومتر و نم‌پولیش گردیده و در نهایت با استفاده از محلول نیتال ۲٪ حکاکی و توسط میکروسکوپ نوری از بزرگنمایی ۵۰X تا ۱۰۰X بررسی شدند. در مرحله‌ی بعد متوسط فاصله‌ی بین لایه‌ها، ضخامت لایه‌های پرلیتی و درصد پرلیت موجود در ریزساختار و در جهت طولی ورق‌ها و با استفاده از نرم‌افزار کلمکس^۱ محاسبه شد. طرز آماده سازی نمونه‌های جهت کشش جهت ضخامت در مقالات قبلی شرح داده شده است [۷]. پس از انجام آزمایش کشش هر کدام از نمونه‌های کشیده شده در راستای موازی با جهت کشش مقطع زده شدند و سپس عملیات متالوگرافی بر روی نمونه‌ها صورت گرفته و تصاویری از حفرات تشکیل شده از هر کدام از نمونه‌ها بطور جداگانه تهیه شد.

¹ Image Analyzer Clemex

نتایج

در شکل ۱ تصویری از ریزساختار ورق در سه جهت طولی-عرضی و ضخامت قبل از انجام آزمون کشش دیده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود ورق در جهت طولی و عرضی حاوی لایه‌های متناوب فریت-پرلیت می‌باشد بطوری که در فواصل بسیار منظمی از هم قرار گرفته‌اند. مشخصه‌های ریزساختاری نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف و در جهت طولی در جدول ۲ آورده شده است که حاکی از افزایش فاصله‌ی بین لایه‌های فریت-پرلیت با افزایش ضخامت می‌باشد. در شکل ۲ تصاویری از جوانه‌زنی حفرات در نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف در نقاط مختلف نمونه‌های کشش دیده می‌شود. مشاهده می‌شود جوانه زنی حفرات از فصل مشترک فریت و پرلیت رخ داده است. نیز دیده می‌شود لایه‌ها در اثر نیروی کشش دچار پراکندگی شده و نظم اولیه‌ی خود را (شکل ۱) از دست داده‌اند. در شکل ۳ پیوستگی لایه‌های پرلیتی در نمونه‌ها با ضخامت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌متر با هم مقایسه شده است. در ضخامت‌های کم پیوستگی بین لایه‌ها ناچیز بوده و در ضخامت‌های بالا پیوستگی لایه‌های پرلیتی افزایش می‌یابد. این نواحی ناپیوسته در ورق‌های نورد شده نازک محل مناسبی برای جوانه زنی حفرات می‌باشند که در شکل ب-۳ مکان‌های مستعد جوانه‌زنی حفرات نمونه با ضخامت ۲۵ میلی‌متر نشان داده شده است. لازم به ذکر است که اینگونه حفرات که از داخل لایه پرلیتی شکل گرفته‌اند، از ۴ ضخامت بررسی شده، فقط در نمونه با ضخامت ۲۵ میلی‌متر مشاهده گردید. در شکل ۴ تصویری از جوانه‌زنی یک حفره درست در بین دو لایه پرلیتی در نمونه با ضخامت ۲۵ میلی‌متر دیده می‌شود. نکته‌ی قابل توجه در این تصویر فاصله‌ی بسیار کم لایه‌های پرلیتی در محل جوانه‌زنی حفره (B) می‌باشد. اینگونه حفرات در ورق‌ها با ضخامت‌های ۳۰، ۴۰ و ۵۰ مشاهده نشد. در شکل ۵ دیده می‌شود که با رشد این حفرات، لایه‌های پرلیتی محو می‌شوند که به نظر می‌رسد به دلیل انعطاف پذیری کم پرلیت باشد. شکل ۶ اندازه حفرات را در نمونه‌های دارای ضخامت‌های مختلف و در نواحی گلوبی نشان می‌دهد. دیده می‌شود که با افزایش ضخامت نمونه‌ها اندازه‌ی حفرات تشکیل شده نیز افزایش می‌یابد.

بحث

حضور فصل مشترک‌ها، ناخالصی‌ها و هر گونه ناهمگنی در ریزساختار فولاد اثر قابل توجهی بر روی مکان‌های مرجح جوانه‌زنی حفرات می‌گذارد. تحقیقات انجام گرفته روی مکان‌های مرجح جوانه‌زنی حفرات در فولادهای ساده کربنی نشان می‌دهد که امکان جوانه‌زنی حفرات در فصل مشترک فریت-پرلیت ۱۰ برابر بیشتر از سایر مکان‌های مرجح جوانه‌زنی می‌باشد. فاصله‌ی بین لایه‌ها در فولادهای ساده کربنی بیش از دو برابر فاصله‌ی بین لایه‌های فریت-پرلیت در فولادهای میکروآلیاژی است. پس

می‌توان گفت که سهم فصل مشترک‌های فریت-پرلیت در فولادهای میکروآلیاژی بیشتر از فولادهای ساده کربنی نیز خواهد بود که بدین ترتیب جوانه زنی حفرات در این فولادها از فصل مشترک لایه‌ها خواهد بود [۹]. دیگر پارامتر تأثیرگذار بر روی مکان‌های جوانه‌زنی حفرات، شدت نواری شدن بوده و فولادهای میکروآلیاژی در مقایسه با فولادهای ساده کربنی به شدت نواری می‌شوند [۷]. به این ترتیب فولادهای میکروآلیاژی شامل لایه‌های فریت-پرلیت زیادتری می‌باشند که در فواصل بسیار کمی (حداکثر ۳۰ میکرون) از هم قرار گرفته و شامل فصل مشترک‌های زیادی می‌باشند.

نتایج تحقیقات آقای توکاجی^۱، مرزدانه‌ها را به عنوان مکان مرجح جوانه‌زنی و رشد حفرات فولادهای ساده کربنی نشان می‌دهد [۱۰]. توکاجی به این نتیجه رسید که هر چه اندازه‌ی دانه ریزتر شود، تمایل به جوانه‌زنی حفرات در داخل دانه افزایش می‌یابد و با افزایش اندازه دانه، حفرات در مرزدانه تشکیل می‌شوند. اندازه دانه‌ی فولادی که وی بر روی آن آزمایش انجام داد در فریت ریزدانه ۲۴ میکرون و در فریت درشت دانه ۸۴ میکرون بود. در این تحقیق اندازه‌ی دانه کمتر از ۱۲ میکرون بود و بنا بر گزارش توکاجی بایستی انتظار داشت که جوانه‌زنی حفرات در داخل دانه باشد، برخلاف آنچه مشاهده شد. بطوری که بیشتر حفرات در فصل مشترک لایه‌های فریت-پرلیت تشکیل شدند [۱۱]. همچنین آقای ژانگ^۲ در آزمایش خود بر روی فولاد حاوی ۰/۱٪ کربن مشاهده کرد که مرزدانه‌ها مکان مرجح جوانه‌زنی حفرات می‌باشند [۱۲]. جمع بندی کلی به این صورت که مطالعات این محققان روی فولادهای ساده کربنی بدون بندینگ بوده و در فولادهای میکروآلیاژی دارای بندینگ مکان مرجح جوانه زنی حفره فصل مشترک لایه‌های فریت و پرلیت می‌باشد.

بررسی فرآیند جوانه‌زنی حفرات در فصل مشترک لایه‌های فریت-پرلیت

با توجه به اینکه لایه‌های فریت-پرلیت در این فولاد در فواصل منظمی از هم قرار گرفته‌اند، می‌توان آنها را بصورت یک کامپوزیت حاوی رشته‌هایی از پرلیت که در یک زمینه‌ی فریتی بصورت کاملاً منظم توزیع شده‌اند در نظر گرفت. تحلیل‌های بسیار دقیق نشان می‌دهد که در مرز زمینه با رشته که در اینجا همان مرز لایه‌ها می‌باشد، تنش‌های برشی بوجود می‌آید [۱۳ و ۱۴]. توزیع این تنش برشی و تنش کششی محوری در لایه‌های پرلیتی در امتداد طول رشته، در شکل ۷ نشان داده شده است. خطوط ممتد تنش‌های کششی محوری وارده بر فصل مشترک لایه پرلیتی - لایه فریتی و خطوط منفصل تنش‌های برشی بوجود آمده در فصل مشترک لایه پرلیتی - لایه فریتی را نشان می‌دهند. این تنش‌های برشی در نهایت منجر به جوانه‌زنی حفرات در فصل مشترک رشته با زمینه می‌شوند.

¹ Tokaji

² Zhang

از آنجاییکه استحکام فاز فریت خیلی کمتر از پرلیت است (280MPa در مقابل 830MPa)، فریت سریعتر شروع به تغییر طول می‌نماید و در این زمان پرلیت استحکام کافی برای مقاومت در برابر تغییر طول را داراست. ازدیاد طول نسبی فریت ۲ برابر پرلیت است [۱۵]. نیروهای کششی که رفته رفته بیشتر می‌شوند، فریت به اندازه کافی ازدیاد طول یافته و کارسخت می‌گردد. با افزایش بیشتر تنش‌ها که لازم می‌شود پرلیت نیز تغییر طول دهد، چون پرلیت نمی‌تواند ازدیاد طول نسبی زیادی را تحمل نماید، تحت تنش‌های برشی وارده، جوانه زنی حفرات در فصل مشترک لایه‌های فریت-پرلیت شروع می‌شود. بیش از ۹۵٪ حفرات مشاهده شده در فصل مشترک تشکیل شده بودند و تنها درصد بسیار کمی از حفرات در داخل لایه‌های پرلیتی (در نمونه با ضخامت ۲۵ میلی‌متر) تشکیل شده بودند.

در شکل ۵ دیده می‌شود که حفرات درست از داخل فاز پرلیت جوانه زده اند و منجر به ازبین رفتن لایه پرلیتی شده‌اند. این نوع جوانه‌زنی حفرات فقط در نمونه با ضخامت ۲۵ میلی‌متر مشاهده شد. همچنین با توجه به فاصله‌ی کم لایه‌های فریت-پرلیت از همدیگر در نمونه با ضخامت ۲۵ میلی‌متر، در بعضی نقاط نیز که لایه‌های پرلیتی بسیار به همدیگر نزدیک شده‌اند، شاهد جوانه‌زنی حفرات بودیم (شکل ۴). در کل جوانه‌زنی حفرات در این مکانها ناشی از سرعت بالای سرد شدن ورق‌ها می‌باشد که منجر به تشکیل پرلیت ریزتر خواهد بود. در ورق ضخیم سرعت سرد شدن کمتر بوده و منجر به تشکیل پرلیت‌های درشت‌تر و چسبیده‌تر می‌شوند.

مطالعاتی که قبلاً بر روی اندازه‌ی حفرات در فولادهای کم کربن صورت گرفته است نشان می‌دهد که اندازه‌ی آنها کاملاً تصادفی است که یافته‌های این تحقیق نیز در مناطق دورتر از گلویی در توافق با آن است [۸]. لیکن در نقاط آغاز گلویی به بعد، با افزایش ضخامت اندازه‌ی حفرات افزایش می‌یابد که در شکل ۷ نشان داده شده است.

نتیجه گیری

- ۱- فصل مشترک لایه‌های فریت-پرلیت در فولادهای میکروآلیاژی مرجح‌ترین مکان جهت جوانه‌زنی حفرات می‌باشد بطوری که بیش از ۹۵٪ حفرات در این مکان‌ها تشکیل شده‌اند.
- ۲- پیوستگی لایه‌های پرلیتی عاملی تأثیرگذار بر روی محل‌های جوانه‌زنی حفرات می‌باشد که با افزایش ضخامت ورق پیوستگی لایه‌های پرلیتی نیز افزایش می‌یابد.
- ۳- حد فاصل بین تجمع پرلیتی و همچنین حد فاصل بین دو لایه پرلیتی با فاصله‌ی بسیار کم از هم، مرجح‌ترین مکان جوانه‌زنی حفرات در ورق یا ضخامت کم است.

- ۴- ضخامت نمونه‌ها هیچ تأثیری بر روی اندازه‌ی حفرات در نقاط دور از گلوئی نمونه‌ها نداشته و اندازه‌ی حفرات تشکیل شده کاملاً تصادفی است لیکن در نقاط نزدیک به محل شکست، با افزایش ضخامت ورق‌ها اندازه‌ی حفرات تشکیل شده هم افزایش می‌یابد.
- ۵- فولادهای میکروآلیاژی نوردگرم شده رفتار بسیار مشابهی با کامپوزیت‌ها دارند بطوری‌که می‌توان آنها را همانند یک کامپوزیت حاوی باندهای پرلیتی در یک زمینه‌ی فریتی در نظر گرفت.

مراجع

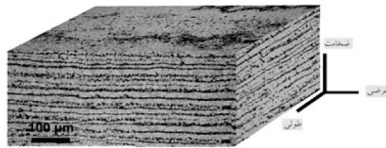
- [1] D. P. Farichild, D. G. Howden, and W. A. T. Clark, "The Mechanism of Brittle Fracture in a Microalloyed Steel: Part I. Inclusion-Induced Cleavage", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2000, Volume 31A, pp. 641-652.
- [2] S. Maropoulos, N. Ridley, "Inclusions and fracture characteristics of HSLA steel forgings development of NbTiB micro-alloyed Hsla steels for high-strength heavy plate", *Materials science and Engineering*, 2004, A 384, pp. 64-69.
- [3] M. N. Shabrov, E. Sylven, S. Kim, D. H. Sherman, L. Chuzhoy, C. L. Briant, and A. Needleman, "Void Nucleation by Inclusion Cracking", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, Volume 35A, pp. 1745-1755.
- [4] Leonard Samuels, "Light Microscopy of Carbon Steel", 1999, ASM international, The Material Information Society, First Edition.
- [5] 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.
- [6] W. F. Smith: "Structure and Properties of Engineering Alloys", McGraw-Hill, New York, NY, 1993, pp. 125-28.
- [7] علیرضا ابراهیمی، آرزو ابیضی و هادی ابراهیم‌پور، "استفاده از پدیده نواری شدن ریزساختار (بندینگ) در بررسی موضعی رفتار کششی فولاد میکروآلیاژی S355N"، دومین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی ایران و جامعه ریخته گران ایران.
- [8] A. Weck a, D. S. Wilkinson, E. Maire, "Observation of void nucleation, growth and coalescence in a model metal matrix composite using X-ray tomography", *Materials science and Engineering*, 2008, A, xxx, xxx-xxx.
- [9] N. Narasaiah, K. K. Ray, "Small crack formation in low carbon steel with banded ferrite-pearlite structure", *Materials science and Engineering, A*, 2005, 392, pp. 269-277.
- [10] K. Tokaji, *Int. J. Fatigue*, 16, 1994, pp. 571-578.
- [11] K. Tokaji, T. Ogawa, Y. Harada, *Fatigue Fract. Eng. Master. Struct.* 9 (1986), pp. 205-217.
- [12] M. Zhang, P. Yang, T. Yuxu, *Int. J. Fatigue* 21(1999), pp. 823-830.
- [13] George E. Dieter, "Mechanical Metallurgy", McGraw-Hill, Third Edition, 2001.
- [14] Hertz berg, Richard w, "Deformation and fracture mechanics of engineering materials", 1937.
- [15] Avner, "Introduction to physical metallurgy", Second Edition, McGraw-Hill, 225-248, 1974.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد میکروآلیاژی S355N.

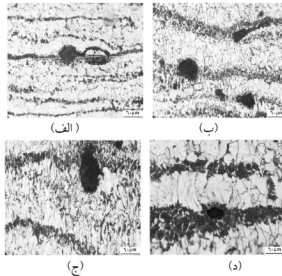
عنصر	C	Si	Mn	P	S	N	Al _{total}	Cu	Ni	V	C _E (I)
درصد وزنی	۰/۲۰	۰/۵۰	۰/۹-۱/۶۵	۰/۰۳۰	۰/۰۲۵	۰/۰۱۵	۰/۰۲	۰/۵۵	۰/۵	۰/۱۲	۰/۴۳

جدول ۲. مشخصه‌های ریزساختاری در جهت طولی.

درصد پرلیت	ضخامت باندها پرلیتی (میکرومتر)	فاصله باندها (میکرون)	ضخامت ورق (میلی متر)
٪۲۰	۶/۵	۲۳	۲۵
٪۲۳	۸	۲۶	۳۰
٪۲۶	۹	۲۹	۴۰
٪۲۹	۱۱	۳۳	۵۰

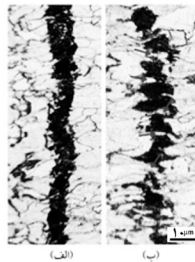


شکل ۱. تصویر شماتیکی از ورق نورد گرم شده.

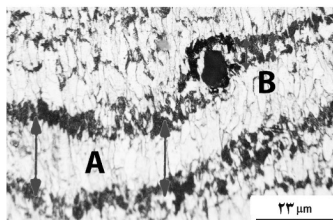


شکل ۲. تصاویری از جوانه‌زنی حفرات در نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف

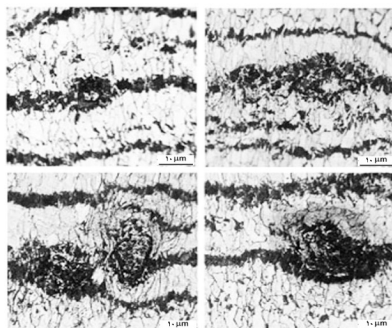
(الف) ۲۵ میلی‌متر (ب) ۳۰ (ج) ۴۰ و (د) ۵۰.



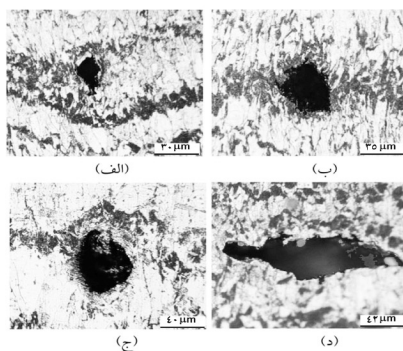
شکل ۳. مقایسه پیوستگی لایه‌های پرلیتی (الف) نمونه با ضخامت ۵۰ میلی‌متر و (ب) ۲۵ میلی‌متر.



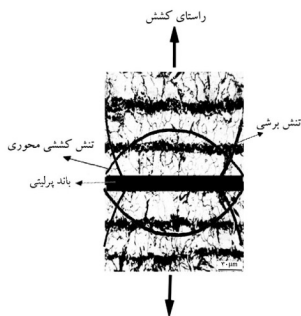
شکل ۴. تصویری از جوانه‌زنی حفره درست در بین دو لایه پرلیتی در نمونه با ضخامت ۲۵ میلی‌متر.



شکل ۵. تصاویری از حفرات تشکیل شده بر روی باندهای پرلیتی که منجر به از بین رفتن آن شده‌اند.



شکل ۶. تصاویری از جوانه‌زنی حفرات در نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف.



شکل ۷. تغییرات تنش‌ها در امتداد لایه پرلیتی.