



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 اثر سیلیسیم بر ریزساختار و خواص کششی فولادهای دوفازی

اشکان نوری^۱، شهرام خیراندیش^۲، حسن ثقفیان^۳

۱ و ۲ - دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

در این پژوهش به بررسی نقش سیلیسیم و متغیرهای عملیات حرارتی به ویژه دمای آنیل میان بحرانی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولادهای دوفازی و نیز تعیین مقدار بهینه آن در فولاد دوفازی پرداخته شده است. به همین منظور پنج نوع فولاد با سیلیسیم متغیر (۲/۲۶-۰/۳۴ درصد وزنی) پس از ایجاد ساختار دوفازی در پنج دمای (۸۱۰ - ۷۴۰ °C) مورد بررسی‌های ریزساختاری و مکانیکی قرار گرفتند. کسر حجمی فاز مارتنزیت با افزایش مقدار سیلیسیم کاهش و با افزایش دمای آنیل بین بحرانی افزایش یافت. نتایج آزمایش کشش نشان داد که افزایش سیلیسیم در یک دمای آنیل ثابت موجب کاهش استحکام می‌شود.

کلمات کلیدی: فولاد دوفازی، سیلیسیم، ریزساختار، خواص کششی.

¹ - ashkan_nouri@iust.ac.ir

² - kheirandish@iust.ac.ir

³ - saghafian@iust.ac.ir

مقدمه

با آغاز بحران انرژی در دهه ۱۹۷۰، دسته جدیدی از فولادها تحت عنوان فولادهای دوفازی مطرح گشته و گسترش یافتند. کلمه دوفازی به حضور دو فاز فریت و مارتنزیت اشاره می‌کند، اگرچه فازهایی نظیر پرلیت، بینیت و آستنیت باقی مانده نیز ممکن است در این فولادها موجود باشد [۱]. در واقع فولادهای دوفازی متشکل از ریزساختاری مشتمل بر حضور ذرات سخت مارتنزیت در زمینه نرم فریت می‌باشند. مصرف اصلی این فولادها در صنایع اتومبیل می‌باشد که علاوه بر بدنه در بسیاری از اجزای دیگر نظیر رینگ چرخ و سپر نیز به کار می‌روند که علاوه بر کاهش وزن موجب افزایش قابل ملاحظه ای در عمر قطعات نیز می‌شوند [۲]. از عمومی‌ترین مشخصه های فولادهای دوفازی می‌توان به استحکام تسلیم پایین، استحکام کششی بالا، نرخ کارسختی بالا در مراحل اولیه تغییر شکل پلاستیک، تسلیم پیوسته، انعطاف پذیری و شکل پذیری خوب اشاره کرد [۳-۷]. بسته به ترکیب شیمیایی، این فولادها عمدتاً بوسیله گرمایش و نگهداری در محدوده دمای میان بحرانی در ناحیه دوفازی $\alpha+\gamma$ و سپس سرمایش سریع از این دما تولید می‌شوند [۸].

بدون شک یکی از فاکتورهای موثر بر خواص فولادها و از جمله فولادهای دوفازی ترکیب شیمیایی فولاد می‌باشد. سیلیسیم از مهم ترین عناصر آلیاژی می‌باشد که در فولادهای دوفازی به کار می‌رود. این عنصر دارای تاثیرات قابل توجه بر روی مشخصه های ریزساختاری مانند کسر حجمی و مورفولوژی فاز مارتنزیت، تشکیل فریت جدید و ... می‌باشد. در مورد میزان افزودن سیلیسیم به فولادهای دوفازی بر خلاف کربن و منگنز اتفاق نظری در تحقیقات دیده نمی‌شود، تا آنجا که برخی معتقدند فولادهای دوفازی از عملیات حرارتی فولادهای C-Mn و برخی نیز معتقدند این فولادها از عملیات حرارتی فولادهای C-Mn-Si تولید می‌شوند و یعنی سیلیسیم را جز عناصر پایه ای فولادهای دوفازی بر می‌شمارند. در این پژوهش با هدف مشخص کردن مقدار بهینه سیلیسیم در فولادهای دوفازی، به بررسی تاثیر این عنصر بر ریزساختار و خواص کششی فولادهای دوفازی حاوی سیلیسیم متغیر پرداخته شده است.

روش تحقیق

پنج فولاد Fe-C-Mn-Si با مقادیر متغیر سیلیسیم (۲/۲۶-۰/۳۴ درصد وزنی) به صورت شمش های ریختگی ۳ و با ابعاد ۴۰-۴۰-۲۵۰ mm از طریق ذوب و ریخته گری تولید شدند. شمش های فوق سپس در دمای 1150°C و در ۵ مرحله تا ضخامت ۳ نورد گرم شده و تا دمای اتاق در هوا سرد شدند. فولادها سپس تا ضخامت ۲ نورد سرد شدند. ترکیب شیمیایی فولادهای تولید شده در جدول ۱ ارایه شده است.

تسمه های آماده شده برای آماده سازی نمونه های کشش مورد استفاده قرار گرفتند. برای ایجاد ساختار دوفازی فریتی-مارتنزیتی نمونه ها ابتدا در ۹۰۰ درجه سانتیگراد و سپس در ۶ دمای ۷۴۰، ۷۵۵، ۷۷۰، ۷۸۰، ۷۹۰ و ۸۱۰ °C آنیل بین بحرانی شده و در آب سرد کوئنچ شدند. تست آنالیز حرارتی برای تعیین دماهای بحرانی فولادها در محیط خنثای آرگون صورت گرفت.

جهت انجام مطالعات ریزساختاری، نمونه ها توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شدند. برای تعیین کسر حجمی فازها از روش شمارش نقطه استفاده شد. در این تکنیک از رابطه زیر برای تعیین کسر فازی مورد نظر استفاده شد.

$$\bar{P}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{P_t} \quad (1)$$

که در آن \bar{P}_p کسر حجمی فاز مورد نظر، n تعداد اندازه گیری، P_t تعداد کل نقاط و P_i تعداد نقاط برخورد با فاز مورد نظر می باشد.

برای انجام آزمایشات کشش نمونه ها ابتدا تحت استاندارد ASTM-E8 با طول سنجه ۵۰mm و عرض و ضخامت ۱۲ و ۲ mm ساخته شدند و در دمای اتاق تحت کشش قرار گرفتند. سرعت کشش نمونه ها ۲mm/min انتخاب شد.

نتایج و بحث

تغییر در میزان سیلیسیم و دمای آنیل بین بحرانی از عواملی هستند که بر ریزساختار فولادهای دوفازی موثر بوده و بر کسر حجمی فازهای تشکیل شده فریت و مارتنزیت موثر هستند. در این پژوهش نیز این دو فاکتور در محدوده‌ای وسیع تغییر داده شدند و تاثیرشان بر ریزساختار به وسیله میکروسکوپ نوری و الکترونی مطالعه شد. شکل ۱ ریزساختار نوری نمونه ها با درصدهای مختلف سیلیسیم را در ۸۱۰°C نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش مقدار سیلیسیم عمده ترین تغییر صورت گرفته در ریزساختار کاهش در کسر حجمی مارتنزیت ایجاد شده می باشد و این کاهش به ویژه در نمونه های D و E شدیدتر است. ریزساختار فولادهای دوفازی تابعیت زیادی از ترکیب شیمیایی، ساختار اولیه قبل از آنیل بین بحرانی، دمای آنیل و نرخ سرمایش دارد. بنابراین تغییر مقدار سیلیسیم به عنوان یک عنصر فریت زای قوی تاثیر قابل توجهی بر میزان آستنیت تشکیل شده در حین گرمایش در منطقه دوفازی $\alpha+\gamma$ و متعاقب آن بر کسر حجمی مارتنزیت تشکیل شده پس از کوئنچ از ناحیه فوق تا دمای اتاق دارد. شکل ۲ تاثیر مقدار سیلیسیم و دمای آنیل بین بحرانی بر کسر حجمی مارتنزیت را نشان می دهد.

اگر آنیل بین بحرانی به حد کافی طولانی باشد این امکان فراهم می‌شود که در دماهای نسبتاً بالا، منگنز تمایل به جدایش در فاز آستنیت پیدا کرده در صورتی که سیلیسیم به فاز فریت مهاجرت خواهد کرد. ایجاد تعادل کامل مستلزم زمان‌های طولانی می‌باشد که در زمان کوتاه ۱۵ دقیقه که برای آنیل نمونه‌ها بکار رفته است محقق نخواهد شد بلکه ممکن است یک شرایط نیمه تعادلی ایجاد شود. لذا جدایش عناصر آلیاژی ممکن است محدود به منطقه آستنیت مجاور به فصل مشترک فریت / آستنیت شود، زیرا انتظار می‌رود که عناصر آلیاژی جانشین در این شرایط دمایی نسبتاً به آهستگی نفوذ کنند. از آنجایی که افزودن سیلیسیم موجب پایدار تر شدن فریت می‌شود لذا سیلیسیم بالا، تشکیل فریت جدید از آستنیت را قوت بخشیده و موجب کاهش تشکیل مارتنزیت می‌شود. گزارش شده است که آلیاژ حاوی سیلیسیم در مقایسه با آلیاژ فاقد سیلیسیم حاوی فریت جدید بیشتر و مارتنزیت کمتری بوده است [۱۲].

جدول ۲ تاثیر مقدار سیلیسیم بر دماهای بحرانی A_{c1} و A_{c3} را در فولادهای مورد بررسی نشان می‌دهد. با ملاحظه دماهای بحرانی فوق و اینکه مقدار آستنیت تشکیل شده در اثر گرمایش در ناحیه بین بحرانی به دما وابسته است کسر حجمی کمتر مارتنزیت در فولادهای حاوی سیلیسیم بالاتر توجیه می‌شود.

کلیه فولادها در آزمایش کشش استحکام کششی بالا و استحکام تسلیم پایینی را نشان دادند که این کارسختی بالای فولادهای دوفازی را تایید می‌کند. همچنین نسبت تسلیم (استحکام تسلیم به استحکام کششی) در تمام نمونه‌ها پایین و بین ۰/۵ تا ۰/۶ بدست آمد. در هیچ یک از نمونه‌ها تسلیم دندانه دار مشاهده نشد که این به سبب چگالی زیاد نابعایی‌های متحرک در فاز فریت به سبب استحاله مارتنزیت از آستنیت می‌باشد. اشکال ۳ و ۴ تاثیر سیلیسیم و دمای آنیل بر خواص کششی فولادها را نشان می‌دهند. به طور کلی دیده می‌شود که با افزایش مقدار سیلیسیم استحکام کششی و تسلیم به تدریج کاهش یافته در حالی که انعطاف پذیری افزایش یافته است. دلیل اصلی این امر کاهش در کسر حجمی مارتنزیت با افزایش مقدار سیلیسیم فولاد می‌باشد. البته شاید نتوان تنها فاکتور موثر در اینجا را کسر حجمی مارتنزیت عنوان کرد. سیلیسیم باعث استحکام زایی فاز فریت از طریق مکانیزم محلول جامد می‌شود به طوری که گفته می‌شود از این حیث بعد از فسفر موثرترین عنصر می‌باشد ولی از آنجایی که مهم‌ترین عامل بر استحکام فولادهای دوفازی میزان فاز مارتنزیت تشکیل شده می‌باشد بنابراین مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار مارتنزیت استحکام افزایش می‌یابد. شکل‌های ۵ و ۶ تغییر خواص کششی فولاد با مقدار مارتنزیت را نشان می‌دهند. دیده می‌شود که با افزایش مقدار فاز مستحکم مارتنزیت، استحکام زیاد و انعطاف پذیری کاهش می‌یابد.

نتیجه گیری

- ۱- افزایش سیلیسیم در فولادهای دو فازی موجب کاهش کسر حجمی مارتنزیت و افزایش دمای آئیل بین بحرانی موجب افزایش آن گردید.
- ۲- افزایش سیلیسیم به طور کلی موجب کاهش در استحکام تسلیم و کششی فولادها و افزایش دمای آئیل باعث افزایش این دو خاصیت گردید.
- ۳- افزایش سیلیسیم و کاهش دمای آئیل انعطاف پذیری فولادها را افزایش دادند.

مراجع

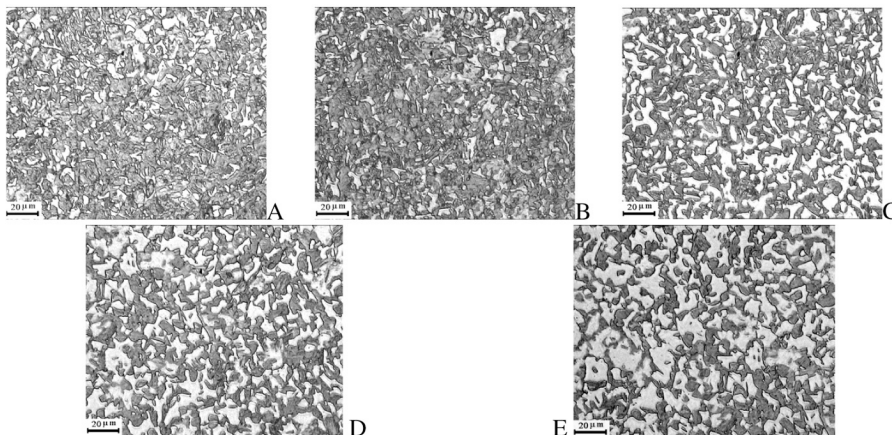
- [1] M. Erdogan, "Effect of Austenite Dispersion on Phase Transformation in Dual Phase Steel", *Scr. Metall.*, 2003, 48, pp. 501-506.
- [2] A. J. Abdalla, L. R. D. Hein, M. S. Periera, "Mechanical Behaviour of Strain Aged Dual Phase Steels", *Mater. Sci. & Tech.*, 1999, 15, pp. 1167-1170.
- [3] M. S. Rashid, B. V. N. Rao, "Tempering Characteristics of a Vanadium Containing Dual Phase Steel", *Metall. Trans.*, 1982, 13A, pp. 1679-1686.
- [4] T. M. Hashimoto, M. S. Periera, "Fatigue Life Studies in Carbon Dual-Phase Steels", *Int. J. Fatigue*, 1996, 18, pp. 529-533.
- [5] S. K. Mirsa, S. K. Nath, "Development of Dual-Phase Steels from Plain Carbon Sheet Steels", *Z. Metallkd.*, 1998, 89, pp. 779-785.
- [6] S. J. Sun, M. Pugh, "Properties of Thermomechanically Processed Dual-Phase Steels Containing Fibrous Martensite", *Mater. Sci. & Eng.*, 2002, A335, pp. 298-308.
- [7] M. Erdogan, R. Priestner, "Effect of Martensite Content, its Dispersion, and Epitaxial Ferrite Content on Bauschinger Behaviour of Dual Phase Steel", *Mater. Sci. & Tech.*, 2002, 18, pp. 369-376.
- [8] R. Priestner, M. Ajmal, "Effect of Carbon Content and Microalloying on Martensitic Hardenability of Austenite of Dual-Phase Steel", *Mater. Sci. & Tech.*, 1987, 3, pp. 360-364.
- [9] D. K. Mondal, R. K. Ray, "Microstructural Changes and Kinetics of Recrystallisation in a few Dual-Phase Steels", *Steel Res.*, 1989, 60, pp. 33-40.

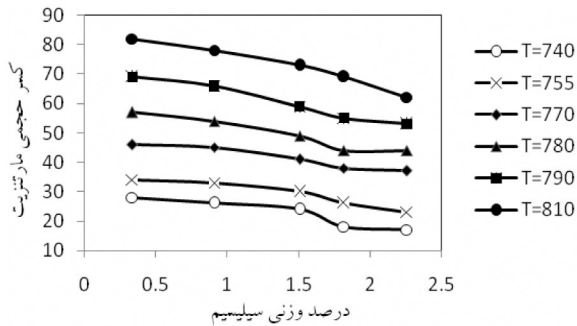
جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولادها بر حسب درصد وزنی.

کد فولاد	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Fe
A	۰/۱۴	۱/۶۷	۰/۳۴	۰/۰۱۲	۰/۰۱۵	۰/۱۷	۰/۰۱	مابقی
B	۰/۱۴	۱/۵۵	۰/۹۱	۰/۰۱۳	۰/۰۱۶	۰/۲۹	۰/۰۴	مابقی
C	۰/۱۴	۱/۷۳	۱/۵۱	۰/۰۱۱	۰/۰۱۵	۰/۱۹	۰/۰۷	مابقی
D	۰/۱۴	۱/۶۰	۱/۸۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱۴	۰/۱۴	۰/۰۲	مابقی
E	۰/۱۴	۱/۶۳	۲/۲۶	۰/۰۰۹	۰/۰۱۵	۰/۱۴	۰/۰۳	مابقی

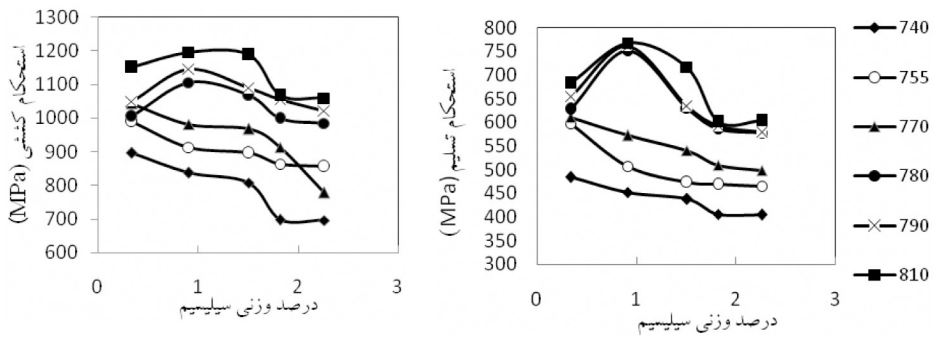
جدول ۲. تاثیر مقدار سیلیسیم بر دمای بین بحرانی فولادها (محاسبه شده با آنالیز حرارتی).

درصد وزنی سیلیسیم	۰/۳۴	۰/۹۱	۱/۵۱	۱/۸۲	۲/۲۶
$A_{c1} (^{\circ}C)$	۷۱۸	۷۳۷	۷۵۰	۷۶۱	۷۷۳
$A_{c3} (^{\circ}C)$	۸۴۹	۸۷۴	۹۰۰	۹۱۵	۹۳۵

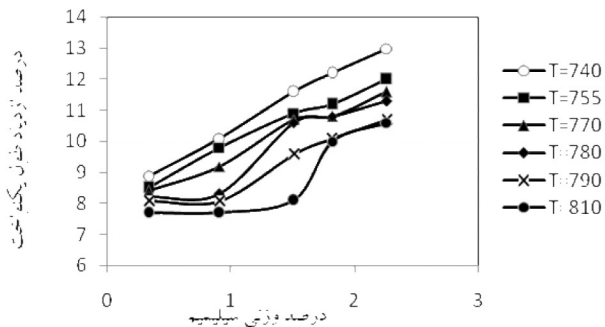
شکل ۱. ریزساختار نوری فولادهای A, B, C, D, E در دمای $810^{\circ}C$.



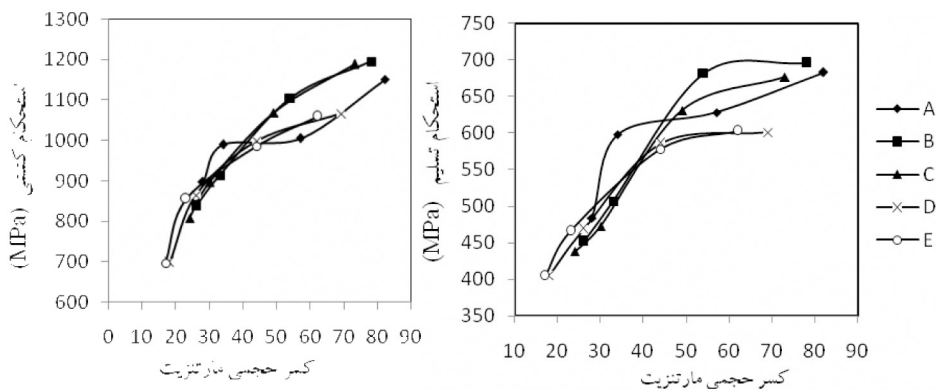
شکل ۲. تغییر کسر حجمی مارتنزیت با دمای آنیل بین بحرانی و مقدار سیلیسیم.



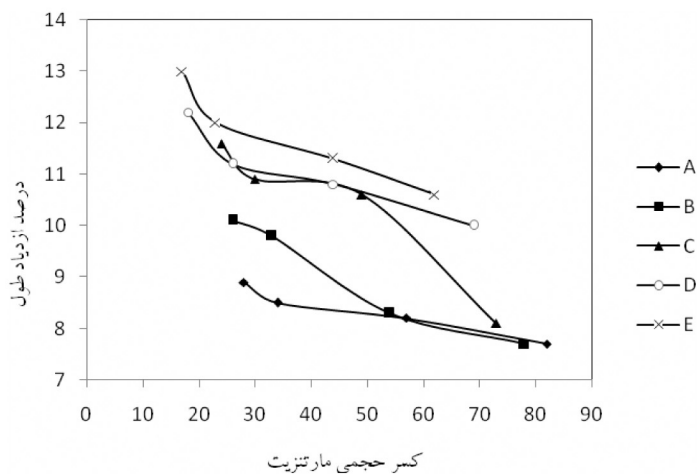
شکل ۳. تغییر استحکام کششی و تسلیم فولاد های دوفازی با درصد سیلیسیم و دمای آنیل بین بحرانی.



شکل ۴. تغییر ازدیاد طول فولاد های دوفازی با درصد سیلیسیم و دمای آنیل بین بحرانی.



شکل ۵. تغییر استحکام کششی و تسلیم فولاد های دوفازی با کسر حجمی مارتنزیت.



شکل ۶. تغییر ازدیاد طول فولاد های دوفازی با کسر حجمی مارتنزیت.