

تأثير تشكيل فاز سيگما در دمای بالا بر روی رفتار شکست کششی فلز جوش فولاد زنگ نزن 316L

اسداله کریمیان¹، حسن فرهنگي²، علي عماري الهیاری³

چکیده:

در تحقیق حاضر تاثیر تشکیل فاز بین فلزی سیگما، بر روی رفتار شکست کششی فلز جوش فولاد زنگ نزن آستنیتی 316L مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور نمونه های مدور کششی فلز جوش برای مدت 1 الی 100 ساعت در دماهای 750 و 850 درجه سانتی گراد مورد عملیات حرارتی قرار گرفتند. سپس آزمون های متنوعی شامل آنالیز شیمیایی، متالوگرافی، فریتوسکوپی، تست کشش، و بررسی های شکست نگاری بر روی نمونه ها انجام گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده بر اثر تشکیل فاز سیگما در طی عملیات حرارتی علاوه بر بروز تغییرات نسبی در خواص کششی فلز جوش، حالت فنجان-مخروط سطح شکست فلز جوش ابتدا به حالت مورب و سپس به حالت تخت تغییر می یابد. این تغییرات در جهت گیری سطح شکست بر اساس تاثیرات شبکه فاز سیگما در ایجاد شرایط کرنش صفحه ای، تمرکز تنش موضعی در باندهای برشی و فعال شدن مکانیزم صفحه حفره ها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: فلز جوش 316L، شکست کششی، مکانیزم صفحه حفره ها.

مقدمه:

فولادهای زنگ نزن آستنیتی کاربرد وسیعی در صنایع نیروگاهی و پالایشگاهی برای مصرف در مکان هایی مانند فوق گرم کننده ها⁴، لوله های حاوی بخار و مبدل های حرارتی⁵ دارند [1 و 2]. از میان آن ها فولاد زنگ نزن آستنیتی 316 برای کاربرد در شرایط خورنده و دمای بالا، نسبت به گریدهای دیگر ترجیح داده می شود.

در جوشکاری این نوع فولادها برای جلوگیری از ایجاد ترک انجمادی، باید شرایط به گونه ای کنترل گردد که فلز جوش پس از انجماد حاوی 4-9 درصد فریت باشد [1-4]. علی رغم تاثیرات مفید

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی و مواد گرایش جوشکاری، دانشگاه تهران (karimiyan@ut.ac.ir).

² دانشیار مهندسی متالورژی مواد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران.

³ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی و مواد گرایش جوشکاری، دانشگاه تهران.

⁴ Super heater

⁵ Heat exchanger

فریت- دلتا در جلوگیری در تشکیل ترک های انجمادی و افزایش خواص استحکامی فلز جوش در دمای محیط، ناپایداری ذاتی این فاز و تولید کاربید و فازهای ترد بین فلزی در ساختار، حاصل از استحاله آن در طی عملیات تنش زدایی و یا عملیات پیرسازی ناشی از قرار گرفتن اتصالات در معرض دماهای سرویس بالا، افت قابل توجه خواص مکانیکی فلز جوش را به همراه خواهد داشت [2و3].

در تحقیق حاضر تأثیر وجود فاز بین فلزی سیگما تشکیل شده در اثر عملیات حرارتی در دماهای 750 و 850 درجه سانتی گراد، برای زمان های 1، 5، 25 و 100 ساعت، بر روی رفتار شکست کششی فلز جوش فولاد زنگ نزن 316L، مورد بررسی و تغییرات حاصل، مورد مطالعه قرار گرفته است.

مواد و روش تحقیق:

ابتدا ورق هایی به ضخامت 15 میلی متر از جنس فولاد زنگ نزن 316L، مطابق با استاندارد ISO 2560 به صورت لب به لب و با زاویه 20 درجه و فاصله ریشه 6 میلیمتر آماده جوشکاری به روش GTAW¹ گردید. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول 1 و رویه انجام جوشکاری در جدول 2 ارائه شده است. به منظور کنترل کیفی و اطمینان از عدم وجود عیوب جوشکاری، کلیه مقاطع جوشکاری شده با استفاده از آزمون های غیر مخرب مورد ارزیابی قرار گرفتند. سپس نمونه های متالوگرافی و نمونه های مدور آزمون کشش به قطر 9 و طول مبنای 40 میلی متر از فلز جوش تهیه گردید و پس از آماده سازی اولیه داخل کوره اتمسفر خنثی قرار داده شده و به مدت 1 الی 100 ساعت در دماهای 750 و 850 درجه سانتی گراد، مورد عملیات حرارتی قرار گرفتند.

پس از انجام فرایند عملیات حرارتی، بررسی های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی بر روی نمونه ها انجام پذیرفت. همچنین درصد فاز فریت موجود در ساختارهای اولیه و عملیات حرارتی شده، به کمک فریتوسکوپ اندازه گیری شد. تست کشش بر روی نمونه های عملیات حرارتی شده به کمک دستگاه MTS و با نرخ کرنش $8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ در دمای اتاق انجام گردید. سطوح شکست نمونه ها به همراه مقاطع متالوگرافی آماده شده در جهت عمود بر سطح شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند.

¹ Gas Tungsten Arc Welding

جدول 1- ترکیب شیمیایی فلز جوش

عنصر	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Co	Al	P	Cu
درصد وزنی	0.017	17.16	10.22	2.18	1.19	0.13	0.004	0.03	0.23

جدول 2- رویه انجام فرایند جوشکاری

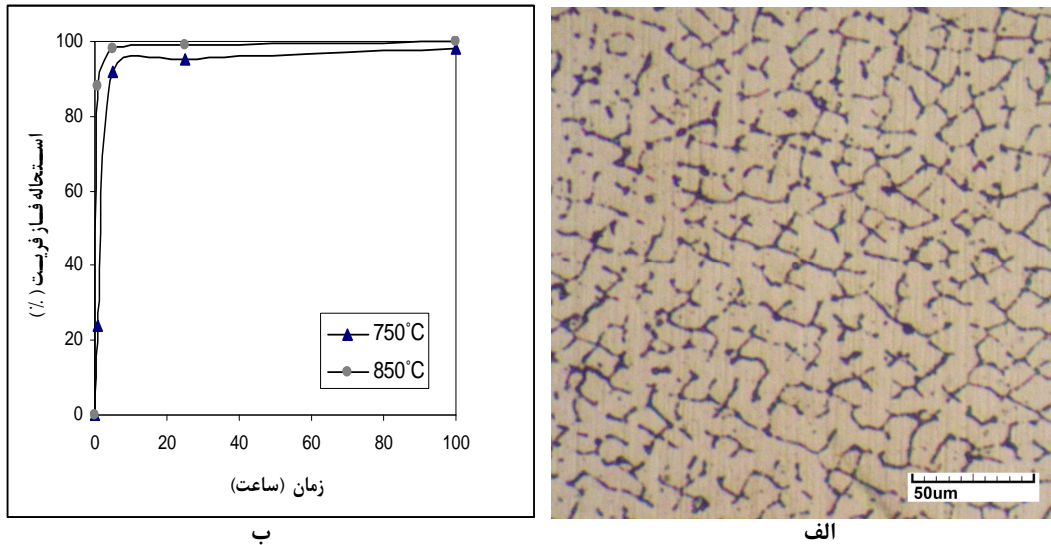
فرایند جوشکاری	سیم جوش جوشکاری	گاز محافظ
جوشکاری الکتروود تنگستنی با گاز محافظ	AISI 316L	آرگون 99/99 درصد
قطر الکتروود تنگستنی	قطر سیم جوش	پلارپته
3/2 میلیمتر	2/4 میلیمتر	DCEN
شدت جریان جوشکاری	نرخ سیلان گاز آرگون	سرعت جوشکاری
130 آمپر	8/5 لیتر بر دقیقه	1 سانتی متر بر دقیقه

یافته ها و بحث :

ساختار میکروسکوپی فلز جوش :

ساختار میکروسکوپی فلز جوش، متشکل از زمینه روشن آستنیت به همراه فاز تیره رنگ فریت دلتا، در شکل 1- الف نشان داده شده است. این ساختار دو فازی ناشی از استحاله ناتمام فریت دلتا به آستنیت در طی انجماد فلز جوش است. در این تحقیق، درصد وزنی فریت دلتا در فلز جوش بر اساس اندازه گیری های انجام شده با استفاده از فریتوسکوپ، به مقدار میانگین $7/5\%$ بالغ می شود.

در شکل 1- ب، درصد استحاله فاز فریت دلتا بر حسب زمان و دمای عملیات حرارتی رسم شده است. ملاحظه می گردد که نرخ انحلال فاز فریت با افزایش دما به سرعت افزایش یافته است به طوری که پس از گذشت 1 و 5 ساعت به ترتیب در دماهای 750 و 850 درجه سانتی گراد، کمتر از 10 درصد فاز فریت در ساختار باقی مانده است. بر اساس بررسی های ساختاری به عمل آمده فاز بین فلزی سیگما محصول اصلی استحاله فاز فریت دلتا در دماها و زمان های مورد بررسی می باشد که جایگزین ساختار اسکلتی فریت-دلتا می گردد.



شکل 1- الف- تصویر میکروسکوپ نوری ساختار دو فاز فلز جوش ، ب- درصد استحاله فاز فریت - دلتا بر حسب زمان و دمای عملیات حرارتی.

خواص کششی :

تغییرات استحکام کششی نهایی¹ فلز جوش فولاد 316L بر حسب دما و زمان انجام عملیات حرارتی در شکل 2- الف نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می گردد که به مرور با افزایش زمان عملیات حرارتی در دمای 750 و 850 درجه سانتی گراد، در اثر تشکیل فاز سخت بین فلزی سیگما در ساختار، استحکام کششی به مقدار کمی افزایش یافته است. در شکل 2- ب تغییرات درصد کرنش شکست نمونه ها نشان داده شده است. ملاحظه می گردد که با افزایش زمان عملیات حرارتی کرنش شکست یا انعطاف پذیری بیش از 30٪، نسبت به نمونه عملیات حرارتی نشده، کاهش یافته است.

شکست نگاری:

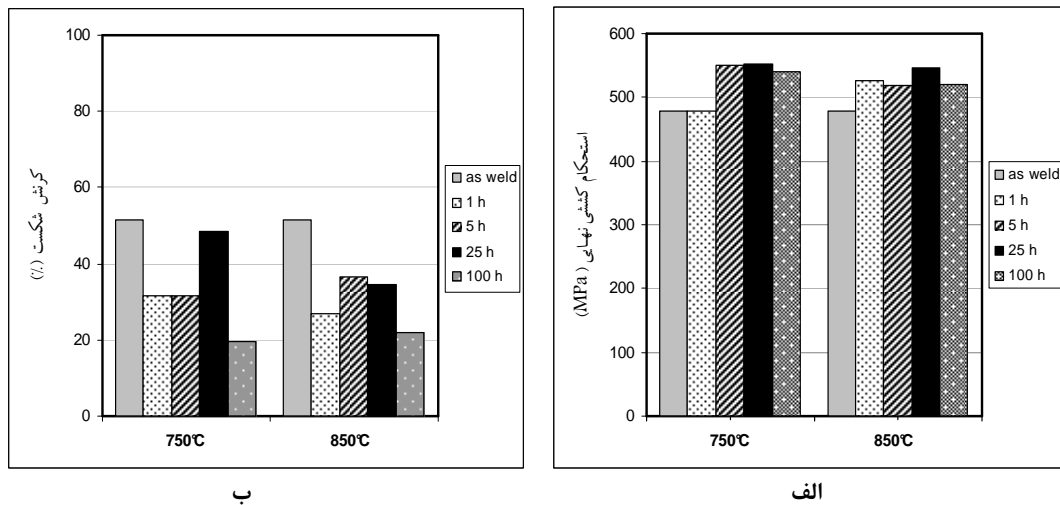
بررسی های به عمل آمده حاکی از تأثیرات مهم ایجاد فاز سیگما در ساختار، بر جهت گیری سطح شکست و در مجموع رفتار شکست کششی فلز جوش می باشد. همان طور که در شکل 3 نشان داده شده است، سطوح شکست نمونه ها را می توان به سه دسته کلی شامل حالت فنجان- مخروط² در فلز جوش عملیات حرارتی نشده، و حالت های مورب³ و تخت⁴ در فلز جوش عملیات حرارتی شده و حاوی فاز سیگما تقسیم کرد.

¹Ultimate Tensile Stress

² Cup and Cone

³ Slant

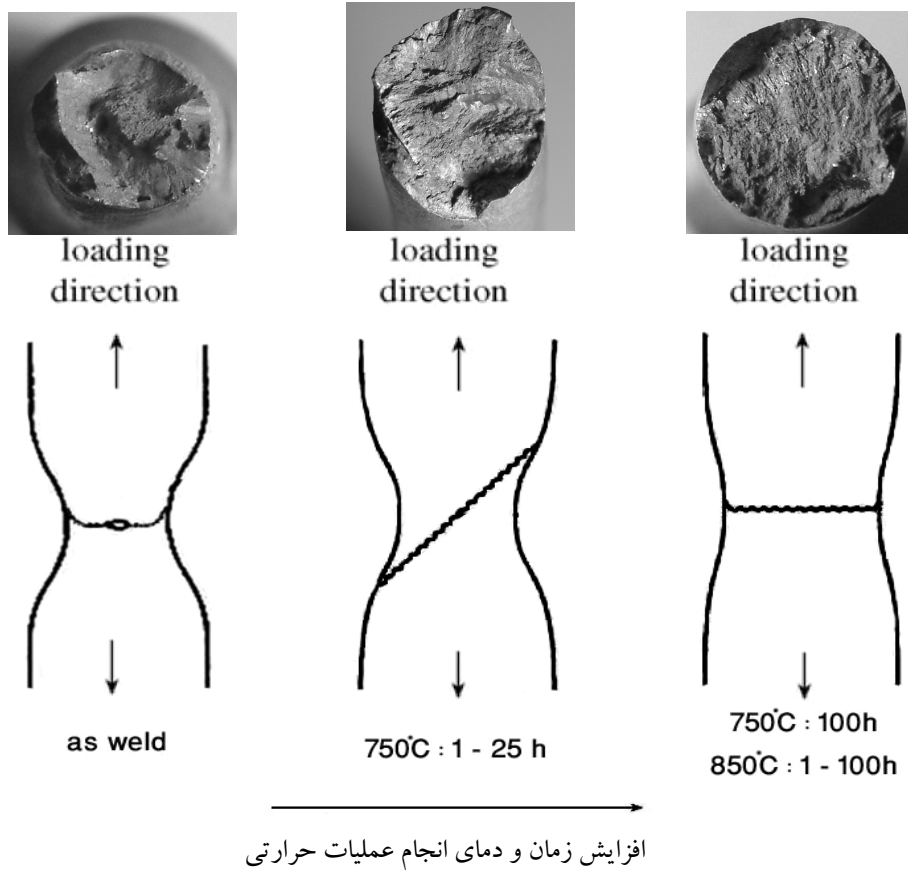
⁴ Flat



شکل 2- الف- تغییرات استحکام کششی نهایی، ب- تغییرات کرنش شکست، بر حسب زمان و دمای عملیات حرارتی.

بررسی سطح شکست نمونه فلز جوش در حالت عملیات حرارتی نشده و بدون فاز سیگما حاکی از وقوع شکست نرم و ایجاد حالت کلاسیک فنجان- مخروط بر روی سطح شکست نمونه مانند اکثر فلزات نرم می باشد (شکل 3). در این نوع از شکست، در مرکز منطقه گلوبی، روی صفحه ای عمود بر محور بارگذاری، ترک اولیه شکل می گیرد. این ترک روی همین صفحه گسترش یافته تا به نزدیکی لبه های نمونه برسد. در این ناحیه، شکست با سرعت زیادی روی سطوحی با زاویه تقریباً 45 درجه نسبت به محور بارگذاری خاتمه می یابد. در حالت ایده آل، مرحله آخر باعث شکل گیری لبه ای دایره ای شکل روی سطح نمونه و تشکیل حالت فنجان- مخروط می گردد [5].

بر اساس نتایج بررسی های ساختاری بر روی مقاطع متالوگرافی تهیه شده در جهت عمود بر سطح شکست، تمایل شدید فاز سیگما به شکست ترد و تشکیل ترک های متعدد در شاخه های فاز سیگما در حین بارگذاری، تاثیر مستقیمی بر جهت گیری سطح شکست و مکانیزم شکست نمونه های عملیات حرارتی شده می گذارد. تصاویری از ساختار میکروسکوپی در زیر سطح شکست نمونه های عملیات حرارتی شده در دمای 750 °C به مدت 1 و 5 ساعت در شکل 4- الف و ب نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود ترک های ایجاد شده در شاخه های فاز سیگما در ادامه تغییر شکل در ناحیه گلوبی، به حفره های کشیده تبدیل میشوند که با به هم پیوستن آن ها شکست کششی کامل می شود. بر اساس بررسی های ریز ساختاری نمونه های عملیات حرارتی شده، انحلال سریع فاز فریت دلتا در شرایط



شکل 3- تغییرات جهت گیری سطح شکست با افزایش زمان و دمای انجام عملیات حرارتی.

عملیات حرارتی انتخاب شده موجب جایگزینی ساختار فریت اسکلتی با شبکه ای از فاز سخت و بین فلزی سیگما می شود. تشکیل این شبکه فاز سخت سیگما در زمینه می تواند باعث ایجاد صفحات بدون انبساط¹ موضعی در بین شاخه های فاز سیگما و افزایش تنش های سه محوری و ایجاد شرایط حالت کرنش صفحه ای موضعی در فاز زمینه آستنیت گردد. که در نتیجه آن کرنش موضعی شدیدی در امتداد صفحات مورب 45 درجه به صورت باندهای برشی در زمینه و در مابین ترک های تشکیل شده در شاخه های مجاور فاز سیگما به وجود می آید. بررسی تصاویر ارائه شده در شکل های 4-الف و 4-ب، حاکی از گسترش و بزرگ شدن حفره های مرتبط با ترک های ایجاد شده در شاخه های فاز سیگما در امتداد باند های برشی 45 درجه نسبت به محور بار گذاری می باشد. در ادامه سطح مقطع باقی مانده در

¹ Plane of no extension

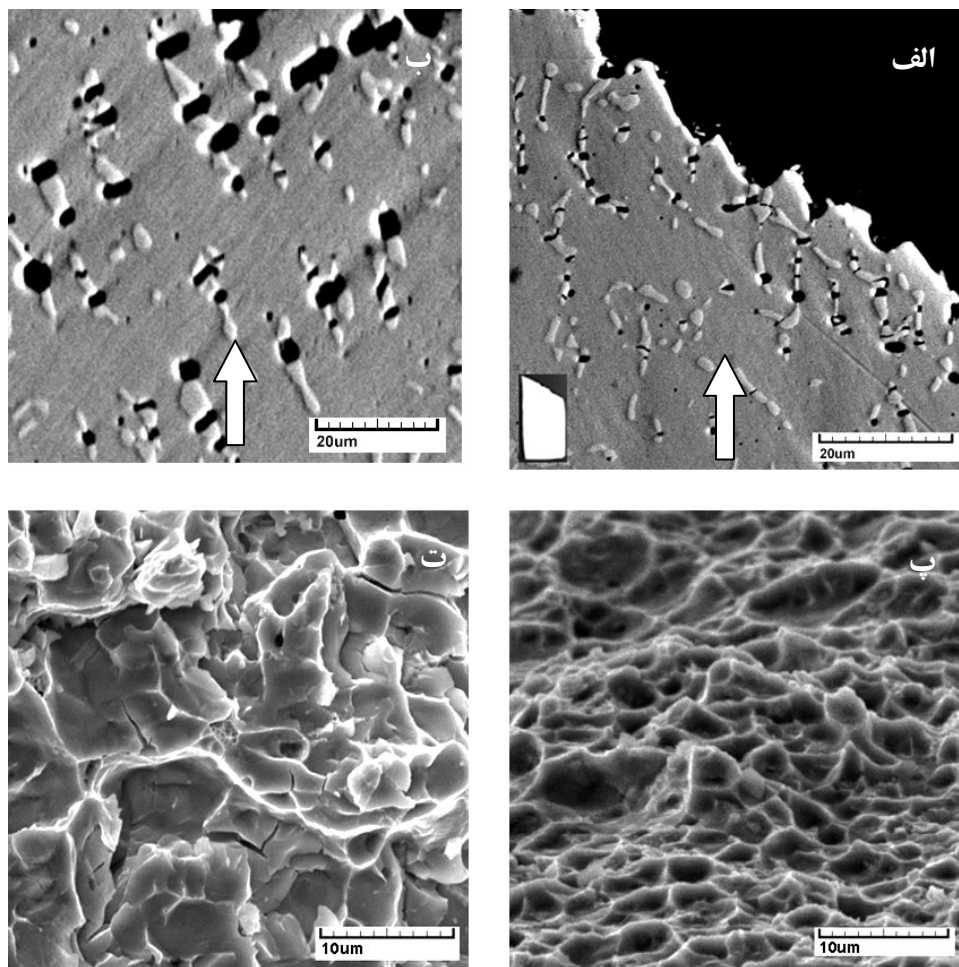
ميان حفره های بزرگ از طريق تشکيل گلویی میکروسکوپی و حفره های ریزتر به یکدیگر پیوسته و موجب تشکيل سطح شکست مورب در مقیاس ماکروسکوپی با زاویه تقریبی 45 درجه نسبت به محور بارگذاري می گردد. مشاهدات شکست نگاري سطح شکست نمونه ها حاکی از وجود دو نوع حفره با اندازه های متفاوت در سطح شکست می باشد که مرتبط با فعال شدن مکانیزم صفحه حفره ها¹ می باشد (شکل 4-پ). این گونه تاثیرات فازهای ثانویه در ایجاد شرایط کرنش صفحه ای و فعال سازی مکانیزم صفحه حفره ها و ایجاد سطح شکست مورب در فولاد HY100 و برخی آلیاژهای آلومینیم نیز گزارش گردیده است [6].

بررسی های Bandstra و همکاران [6] بر روی شکست نرم فولاد HY100 نشان می دهد که در بارگذاري کششی این فولاد در شرایط تنش های سه محوری زیاد، کرنش بین ذرات بلند و کشیده و یا رشته های ناخالصی متمرکز می شود. نتیجه این امر تشکيل صفحه شکست با جهت گیری مورب در اثر فعال شدن مکانیزم صفحه حفره ها می باشد. هنگامی مکانیزم صفحه حفره ها فعال می شود که کرنش به شدت متمرکز شود. این امر معمولاً نیازمند صفحات بدون انبساط است که می تواند در بین رشته های ناخالصی MnS در فولاد HY100 شکل گیرد. بدین ترتیب رشته های MnS باعث ایجاد شرایط موضعی کرنش صفحه ای می شود.

بررسی جهت گیری سطح شکست در نمونه های عملیات حرارتی شده در دمای 750°C به مدت 100 ساعت، نشان می دهد که با افزایش زمان نوعی تغییر در جهت گیری سطح شکست از حالت مورب به سمت حالت تخت ایجاد می گردد. همچنین با افزایش دمای انجام عملیات حرارتی از 750 به 850 درجه سانتی گراد، نیز تغییری مشابه، در جهت گیری سطح شکست دیده می شود. با افزایش دمای انجام عملیات حرارتی به 850°C، (همچنین با افزایش زمان عملیات حرارتی در دمای 750°C به 100 ساعت)، سرعت تشکيل فاز سیگما افزایش می یابد و با گذشت زمان های کمی از آغاز عملیات حرارتی، فاز سیگما به ترکیب نهایی خود می رسد. در این حالت فاز سیگما کاملاً ترد و شکننده و زمینه به دلیل از دست دادن عامل محلول جامد ساز کرم، نرم تر از حالت قبل است [7]. تصویر SEM از سطح شکست نمونه عملیات حرارتی شده در دمای 850°C به مدت 100 ساعت در شکل 4-ت نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می گردد گسترش عرضی حفره های ایجاد شده بر اثر شکست ترد شاخه های

¹ Void -Sheet

فاز سیگما موجب تشکیل سطح شکست تخت گردیده که حاکی از آسانتر شدن اشاعه عرضی حفره های تشکیل شده در شاخه های فاز سیگما در جهت عمود بر محور بارگذاری در اثر نرمتر شدن زمینه می باشد. در این شرایط هنگام بارگذاری و پس از تشکیل حفره های اولیه، به دلیل ترد بودن شاخه های فاز سیگما و نرم تر شدن زمینه، صفحات بدون انبساط بین شاخه ها تشکیل نشده و شرایط کرنش صفحه ای موضعی و لذا باندهای برشی نیز ایجاد نمی گردد.



شکل 4- تصویر SEM از، الف- شکست شاخه های فاز سیگما در زیر سطح شکست مورب در نمونه 750°C و 1 ساعت، ب- گسترش حفره ها در شاخه های فاز سیگما در امتداد صفحات برشی در نمونه 750°C و 5 ساعت (فلش ها جهت بارگذاری را نشان می دهد)، پ- سطح شکست نمونه 750°C و 1 ساعت، نشان دهنده تشکیل حفره های ریز در میان حفره های درشت، ت- سطح شکست نمونه 850°C و 100 ساعت، نشان دهنده گسترش عرضی حفره های تشکیل شده بر اثر شکست شاخه های فاز سیگما.

نتیجه گیری:

- 1- در دماهای 750 و 850°C فریت دلتا به سرعت توسط فاز سیگما جایگزین می شود و به ترتیب پس از گذشت 5 و 1 ساعت، محتوی فریت دلتا به کمتر از 10% مقدار اولیه آن در فلز جوش کاهش می یابد که باعث افزایش اندک استحکام کششی و کاهش قابل توجه انعطاف پذیری می گردد.
- 2- جایگزینی تدریجی فریت دلتا با شبکه فاز سیگما در طی عملیات حرارتی موجب تغییر جهت گیری سطح شکست از حالت فنجان-مخروط در فلز جوش، به حالت مورب و سپس حالت تخت می گردد.
- 3- جهت گیری مورب سطح شکست در نمونه های عملیات حرارتی شده در دمای 750°C و برای زمان های کم (1-25 ساعت)، مرتبط با ترک خوردن شاخه های مجاور به هم فاز سیگما، در امتداد باندهای برشی 45 درجه، و حاکی از تمرکز کرنش موضعی بر اثر ایجاد شرایط کرنش صفحه ای و فعال شدن مکانیزم شکست "صفحه حفره ها" میباشد.
- 4- با افزایش زمان و دمای عملیات حرارتی جهت گیری سطح شکست از حالت مورب به حالت تخت تغییر می کند که حاکی از آسانتر شدن اشاعه عرضی حفره های تشکیل شده در شاخه های فاز سیگما در جهت عمود بر محور بارگذاری در اثر نرمتر شدن زمینه می باشد.

منابع:

1. J. J. Smith and R. A. Farrar, "Influence of microstructure and composition on mechanical properties of some AISI 300 series weld metals", international material review, 38(1), 1993, 25-51.
2. J. J. Smith and R. A. Farrar, "Effect of composition on the transformation behavior of duplex 316 weld metal", Journal of Material Science, 26, 1991, 5025-5036.
3. R. A. Farrar, "The importance of microstructural transformations for welding and the stability of long term service properties", Welding In the World, 36, 1995, 143-151.
4. T.P.S. Gill, M. Vijayalakshmi, P. Podriguez, and K. A. Padmanabhan, "On microstructural-property correlation of thermally aged type 316L stainless steel weld metal", Metallurgical Transaction A, 20A, 1989, pp. 1115-1124.
5. E. Reed-Hill, R. Abbaschian, Physical Metallurgy Principles, 1994, 3th edition, PWS pub. .
6. J.P. Bandstra, D.A. Koss, "Modeling the ductile fracture process of void coalescence by void-sheet formation", Materials Science and Engineering, A319, 2001, 490-495.
7. H. Shaikh, H. S. Khatak, S. K. Seshadri, J. B. Gnanmoorthy, P. Rodriguez, "Effect of ferrite transformation on the tensile and stress corrosion properties of type 316L stainless steelweld metal thermally aged at 873 K", Metallurgical and Materials Transaction A, 26A, 1995, 1859-1868.

Effect of sigma phase formation at high temperature, on the tensile fracture behavior of 316L stainless steel weld metal

A. Karimiyan (karimiyan@ut.ac.ir)¹
H. Farhangi (hfarhangi@ut.ac.ir)²
A. Amari allahyari³

Abstract:

In this research, effects of sigma phase formation on the tensile fracture behavior of 316L weld metal have been investigated. Tensile specimens of the weld metal were subjected to heat treatments at 750 and 850°C for durations of up to 100 hours. Various tests including chemical analysis, metallography, tensile test, and fractographic studies were performed on the specimens. Based on the obtained results, sigma phase formation not only affects the tensile properties of the weld metal, but also results in a change in macroscopic fracture surface orientation, from a cup and cone fracture in the weld metal, to a slant fracture and finally to a flat fracture surface orientation. The changes in the orientation of fracture surface have been evaluated based on the effects of the sigma phase network on promoting plane strain conditions, strain concentration in shear bands and triggering the operation of void sheet fracture mechanism.

Key words: 316L weld metal, aging, fracture, void-sheet mechanism

¹ M.Sc. Student, Welding Engineering, School of Metallurgy, Faculty of Engineering, University of Tehran

² Associate Professor, School of Metallurgy, Faculty of Engineering, University of Tehran

³ M.Sc. Graduate, Welding Engineering, School of Metallurgy, Faculty of Engineering, University of Tehran