

تأثیر ساختار میکروسکوپی بر جوش پذیری فولاد ریختگی 25Cr-35Ni

مرتضی شمعانیان* و علی سعیدی**

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۲/۱۱/۲۵ - دریافت نسخه نهایی: ۸۳/۷/۱۸)

چکیده - فولاد مقاوم در دمای بالای 25Cr-35Ni دارای مقاومت عالی در برابر اکسیداسیون و خزش در دمای بالاست. نتایج بررسیهای به عمل آمده نشان دهنده آن است که این فولاد در شرایط ریختگی دارای جوش پذیری مطلوبی بوده ولی چنانچه جوشکاری بر روی فولاد پیر شده انجام گیرد احتمال ایجاد ترکهایی در منطقه مجاور جوش به سمت فلز پایه وجود دارد. لذا در این پژوهش تأثیر ریز ساختار میکروسکوپی بر جوش پذیری این نوع فولاد مورد بررسی قرار گرفته است. ریز ساختار فولاد 25Cr-35Ni در شرایط ریختگی دارای زمینه آستنیتی و شبکه‌ای از کاربیدهای اولیه بوده در حالی که ریز ساختار این فولاد در شرایط پیر شده دارای زمینه آستنیتی و شبکه‌ای از کاربیدهای اولیه همراه با کاربیدهای ریز ثانویه است. تغییر مرفولوژی کاربیدهای اولیه همراه با تشکیل کاربیدهای ثانویه سبب کاهش انعطاف پذیری نمونه پیر شده و افزایش حساسیت آن به ترک خوردن در طی جوشکاری به خصوص از میان کاربیدهای اولیه شده و جوش پذیری این فولاد را در شرایط پیر شده کاهش می‌دهد. ترکها از نوع بین دانه‌ای و از میان کاربیدهای اولیه (بوتکتیک) است. کاربیدهای از نوع $M_{23}C_6$ و NbC در نمونه ریختگی و کاربیدهای از نوع $M_{23}C_6$ و $Ni_{16}Nb_6Si_7$ در نمونه پیر شده وجود دارد.

واژگان کلیدی: فولاد ریختگی 25Cr-35Ni، جوش پذیری، ساختار میکروسکوپی، ریختگی، پیر شده

Microstructural Effect on the Weldability of 25Cr-35Ni Cast Steel

M. Shamanian and A. Saidi

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract: The 25Cr-35Ni heat resistant steel has been widely used when resistance to oxidation and creep rupture at elevated temperatures is required. In this paper, the microstructural effect on the weldability of this alloy is investigated. The results of this study indicate that this steel has a perfect weldability in the as cast condition but does not possess good weldability in the aged condition. The as cast microstructure of 25Cr-35Ni steel consists of austenite matrix and a network of primary carbides, while the aged condition consists of austenite matrix and γ primary and secondary carbides. The morphological change of primary

** - استاد

* - استادیار

carbides and the secondary carbides precipitate formation, reducing the elongation and ductility of aged steel, should have enhanced the steel susceptibility to cracking, particularly in the area of the eutectic carbides, and hence, the reduced weldability of the steel. The cracking observed was of the intergranular type and spread along the eutectic carbides. It was found that the carbides in the as cast steel consisted of NbC and M₂₃C₆, whereas that of the aged steel also exhibited Ni₁₆Nb₆Si₇ and M₂₃C₆ carbides.

Keywords: 25Cr-35Ni cast steel, Weldability, Microstructure, As cast, Aged

۱- مقدمه

فولادهای ریختگی مقاوم در دمای بالا به طور وسیعی در صنایع پتروشیمی^۱، توربینهای گازی^۲، رفورمرهای^۳ تولید گاز احیا کننده برای فرایندهای احیای مستقیم^۴ و تجهیزات کوره‌های عملیات حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱ و ۸]. این نوع فولادها به نحوی طراحی شده‌اند که بتوانند دماهای بالاتر از ۶۵۰ °C را تحمل کنند [۹]. فولادهای مقاوم در دمای بالا دارای عناصر اصلی آهن، کرم و نیکل بوده و عناصری نظیر نیوبیم، تیتانیم، وانادیم و زیرکونیم برای افزایش مقاومت خزشی به آنها اضافه می‌شود. این عناصر باعث تشکیل فازهای پراکنده‌ای شده که در دماهای بالا پایدار باقی می‌مانند [۹]. از جمله مزایای برجسته این نوع فولادها، استحکام خزشی بالا و مقاومت بالا در برابر اتمسفرهای غنی از اکسیژن، کربن و گوگرد در دماهای بالاست [۱]. مقاومت خزشی این نوع فولادها در دمای بالا عمدتاً بستگی به دو فاکتور دارد. یکی شبکه‌ای از کاربیدهای یونکتیک که در طی فرایند انجماد ایجاد می‌شود و بین دندریتها و مرز دانه‌ها توزیع شده‌اند و دیگری ناشی از رسوبات کاربیدی ثانویه در داخل دندریتها و دانه‌هاست که در طی سرویس دهی از زمینه فوق اشباع^۵ رسوب می‌کنند. در دماهای بالا و یا زمانهای طولانی در طی سرویس دهی، رسوبات ریز تمایل به پیوستن به یکدیگر و خشن شدن داشته و تاثیر آنها بر استحکام بخشی به تدریج کاهش می‌یابد [۱۰-۱۲].

در زمینه جوشکاری و بررسی ساختار و خواص مکانیکی فولادهای مقاوم در دمای بالا برخی تحقیقات انجام شده و یا در حال انجام است [۱۲-۱۴]. با توجه به آنکه در بعضی نیاز به تعمیر قطعاتی از این نوع فولادهاست که قبلاً در سرویس دهی

بوده‌اند و در ضمن جوشکاری آنها در برخی موارد ترکهایی در منطقه مجاور جوش در فلز پایه مشاهده می‌شود. لذا در این مقاله تاثیر ریز ساختار میکروسکوپی اولیه فولاد 25Cr-35Ni از گروه فولادهای HP در دو حالت ریختگی^۶ و پیر شده^۷ بر جوش پذیری آن مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش آزمایشها

در این پژوهش از فولاد ریختگی 25Cr-35Ni با مقاومت عالی در برابر اکسیداسیون و خزش و از گروه فولادهای HP استفاده شده است. نمونه ریخته گری شده به شکل لوله‌ای با قطر خارجی ۱۳۰ میلی متر و ضخامت ۲۰ میلی متر بود. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول (۱) ارائه شده است. به منظور بررسی تاثیر پیرشدن بر جوش پذیری این نوع فولاد، تعدادی نمونه از لوله‌ای از همین جنس که به مدت حدود ۱۰۰۰ ساعت در سرویس دهی در رفورمر با دمای ۹۵۰ °C بوده تهیه شد.

جوشکاری نمونه‌ها بر اساس مشخصات مراحل جوشکاری (WPS)^۸ توصیه شده توسط شرکت اشمیت- کلمنت اسپانیا و مطابق با ASME Section IX^۹، انجام گرفت. لبه هر کدام از نمونه‌ها در محل اتصال تا عمق ۱۸ میلی متری پخ ۵۰° زده شد و نمونه‌ها در کنار یکدیگر بدون فاصله قرار داده شدند. جوشکاری نمونه‌ها بدون پیشگرم و با استفاده از روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز محافظ (GTAW)^{۱۰} با مشخصات جدول (۲) و نوع جریان مستقیم با قطبیت منفی الکتروود (DCEN)^{۱۱} انجام شد. نوع گاز مصرفی از نوع آرگون خالص و نوع سیم جوش مصرفی از جنس Thermanit 25/35 R با ترکیب شیمیایی ارائه

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد 25Cr-35Ni و سیم جوش Thermanit 25/35 R مورد استفاده (درصد وزنی)

	Fe	Mn	Si	Nb	Mo	C	Cr	Ni	
فولاد	۳۵/۴	۱/۳۵	۱/۳	۱/۳	۰/۰۴	۰/۴	۲۴/۴	۳۵/۸	
سیم جوش	۳۵/۱	۱/۵۹	۱/۰	۱/۲	-	۰/۴	۲۵/۵	۳۵/۲	

جدول ۲- مشخصات جوشکاری نمونه ها

مشخصه	پاس اول	پاسهای بعدی
جریان (A)	۹۰	۱۳۰
ولتاژ (V)	۱۵	۱۵
سرعت جوشکاری (mms^{-1})	۱	۱
حرارت ورودی (J mm^{-1})	۹۴۵	۱۳۶۵

شده در جدول (۱) و با قطر ۲/۴ میلی متر بوده است. به منظور ارزیابی خواص مکانیکی این فولاد در شرایط مختلف ریز ساختاری، تعدادی نمونه کشش بر اساس استاندارد ASME با کد 1(b) : QW-462 تهیه [۱۵] و با استفاده از دستگاه کشش آزمایش شد.

به منظور بررسی ریز ساختار، نمونه‌هایی با ابعاد $۳۰ \times ۲۰ \times ۵۰$ میلی متر از نمونه ریختگی و پیرشده تهیه شد. نمونه‌ها با استفاده از کاغذ سنباده‌های کاربید سیلیسیم از ۸۰ تا ۴۰۰۰ سنباده زنی شده و سپس بر روی پارچه کتانی همراه با خمیر آلومینا در طی دو مرحله با اندازه ذرات آلومینای ۱ و ۰/۳ میکرون پولیش شدند. پس از آن نمونه‌ها در محلولی شامل ۴۵٪ اسید نیتریک، ۴۰٪ اسید کلریدریک و ۱۵٪ گلسیرین به مدت ۳۰ ثانیه اچ شده‌اند. ریز ساختار نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری^{۱۲} و همچنین میکروسکوپ الکترونی^{۱۳} مجهز به سیستم تحلیل شیمیایی (EDS)^{۱۴} مورد بررسی قرار گرفت.

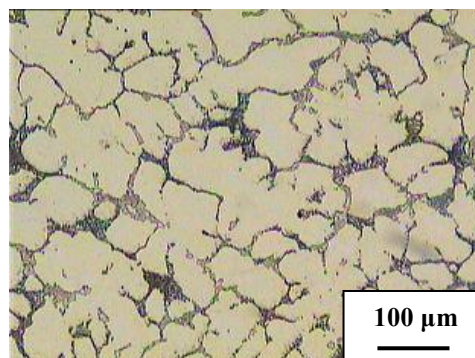
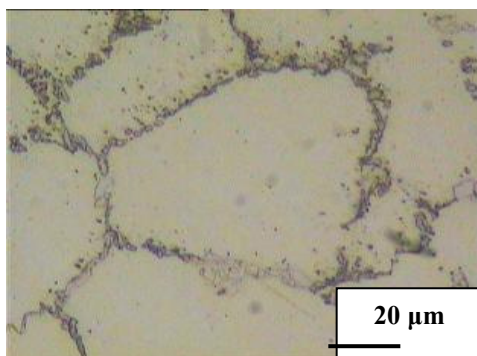
۳- نتایج

ریز ساختار فولاد 25Cr-35Ni که در شرایط ریختگی در دو بزرگنمایی متفاوت در شکل (۱) نشان داده شده دارای زمینه آستنیتی همراه با شبکه‌ای از کاربیدهای یوتکتیک است. شکل

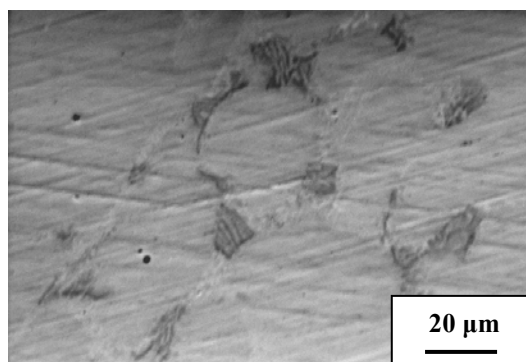
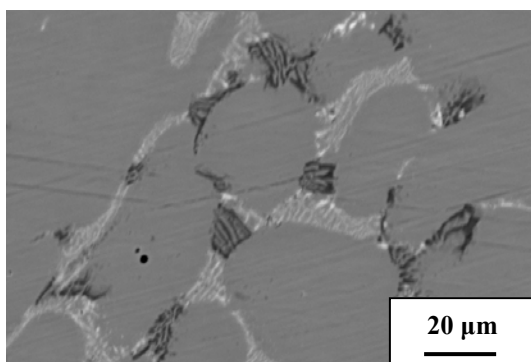
(۲) نشان دهنده ریز ساختار همین نمونه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی در دو حالت استفاده از الکترونهای ثانویه (SE)^{۱۵} (شکل ۲-الف) و الکترونهای برگشتی (BE)^{۱۶} (شکل ۲-ب) است.

با توجه به شکل ۲-ب دیده می‌شود که در حالت ریختگی شبکه کاربیدی دارای کاربیدهای با رنگ روشن و تیره بوده که نتایج تحلیل نقطه‌ای در این مناطق در شکل (۳) ارائه شده و نشان می‌دهد که کاربیدهای روشن غنی از نیویم و کاربیدهای تیره غنی از کروم است.

شکل (۴) نشان دهنده ریز ساختار این فولاد در شرایط پیر شده است. در حالت اخیر ریز ساختار شامل زمینه آستنیتی همراه با کاربیدهای اولیه تقریباً کروی شده و کاربیدهای ریز ثانویه در زمینه آستنیتی است. شکل (۵) نشان دهنده ریز ساختار همین نمونه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی در دو حالت استفاده از الکترونهای ثانویه (SE) شکل (۵-الف) و الکترونهای برگشتی (BE) شکل (۵-ب) است. با توجه به شکل (۵-ب) دیده می‌شود که در حالت پیر شده علاوه بر شبکه کاربیدی حاوی کاربیدهایی با رنگ روشن و تیره، کاربیدهای ریز تیره رنگی نیز در زمینه ایجاد شده است. نتایج تحلیل نقطه‌ای کاربیدها در این نمونه در شکل (۶) ارائه شده و نشان می‌دهد که کاربیدهای روشن عمدتاً حاوی عناصر نیویم، سیلیسیم و نیکل



شکل ۱- ریز ساختار فولاد 25Cr-35Ni در شرایط ریختگی در دو بزرگنمایی متفاوت



(ب)

(الف)

شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی الکترونی از فولاد 25Cr-35Ni در شرایط ریختگی
الف) با استفاده از الکترونهای ثانویه (SE) ب) با استفاده از الکترونهای برگشتی (BE)

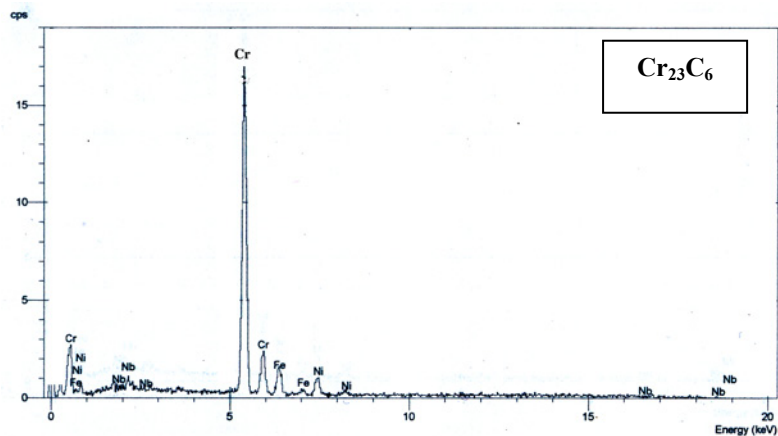
دهنده آن است که فولاد 25Cr-35Ni در حالت پیر شده از جوش پذیری مطلوبی برخوردار نیست.

۴- بحث

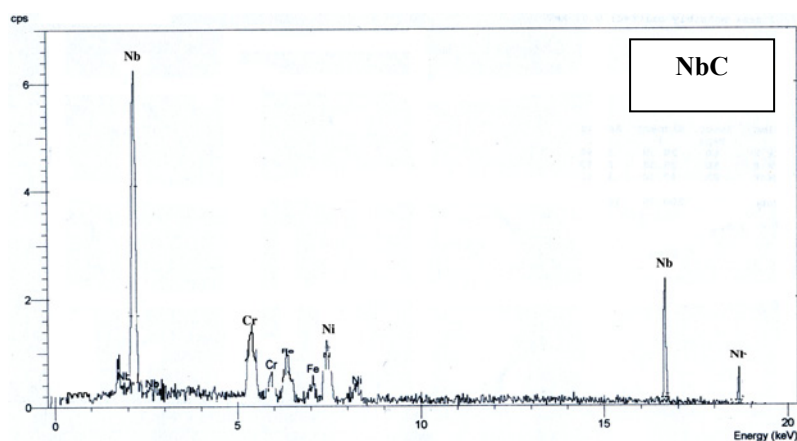
بررسی ساختار میکروسکوپی فولاد 25Cr-35Ni در شرایط ریختگی شکل (۱) نشان می‌دهد که در این حالت ساختار زمینه آستنیتی همراه با کاربیدهای یوتکتیک در مرز دانه‌ها است. بررسی این نمونه در بزرگنماییهای بالاتر، شکل (۱-ب) نشان می‌دهد که زمینه آستنیتی عاری از هرگونه رسوبات است. بررسی ساختار میکروسکوپی این نمونه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی از نوع الکترونهای ثانویه، شکل (۲-الف) اطلاعات اضافه‌تری نسبت به نمونه‌های متالوگرافی نشان نمی‌دهد. اما بررسی همین نمونه با استفاده از دکتور الکترونهای

و کاربیدهای تیره موجود در شبکه کاربیدی در مرز دانه‌ها و در زمینه غنی از کروم‌اند.

نتایج خواص مکانیکی فولاد 25Cr-35Ni در دو حالت ریختگی و پیر شده در جدول (۳) ارائه شده است که بیانگر افزایش استحکام و کاهش انعطاف پذیری در طی پیر شدن است. شکل (۷) ریز ساختار میکروسکوپی مناطق مختلف جوش این فولاد، در حالتی که فولاد در شرایط ریختگی جوشکاری شده را نشان می‌دهد. جوش حاصله در این حالت از پیوستگی مطلوبی با زمینه برخوردار بوده و فاقد هرگونه ترک است. شکل (۸) ریز ساختار منطقه مجاور جوش نمونه‌ای را نشان می‌دهد که در حالت پیر شده جوشکاری شده است، در این حالت مشاهده می‌شود که ترکهایی در منطقه مجاور جوش تشکیل شده و به سمت فلز پایه رشد کرده است. این امر نشان

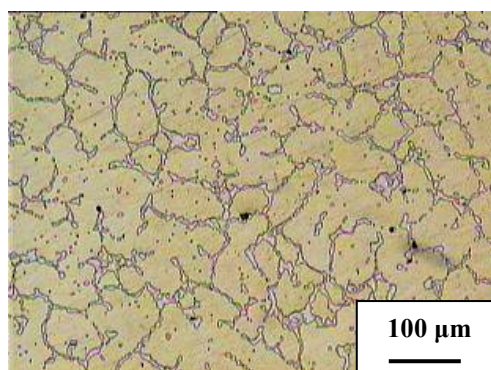
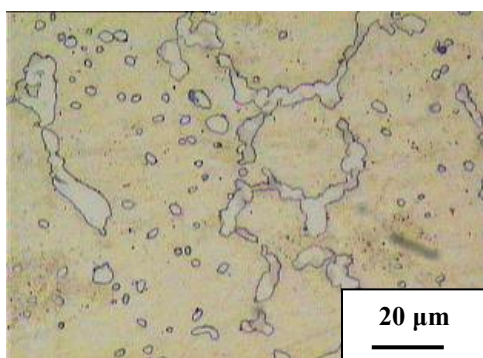


(الف)

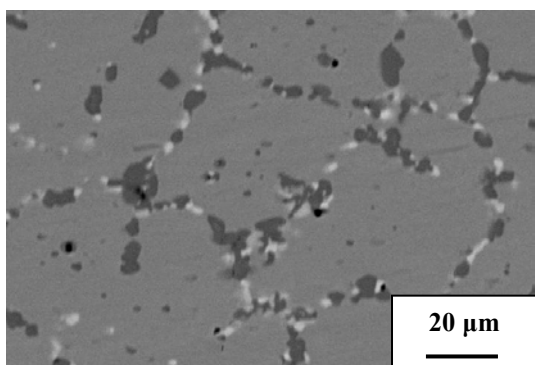


(ب)

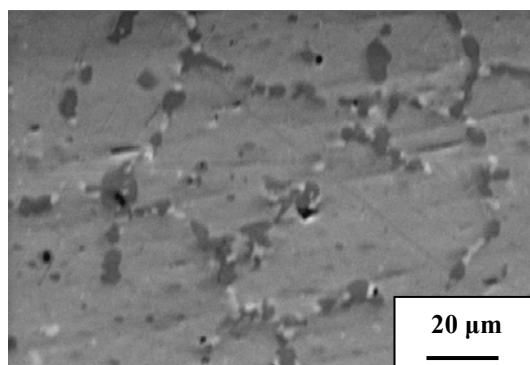
شکل ۳- تحلیل EDS کاربیدهای اولیه در نمونه ریختگی (الف) کاربیدهای تیره (ب) کاربیدهای روشن



شکل ۴- ریز ساختار فولاد 25Cr-35Ni در شرایط پیر شده در دو بزرگنمایی متفاوت

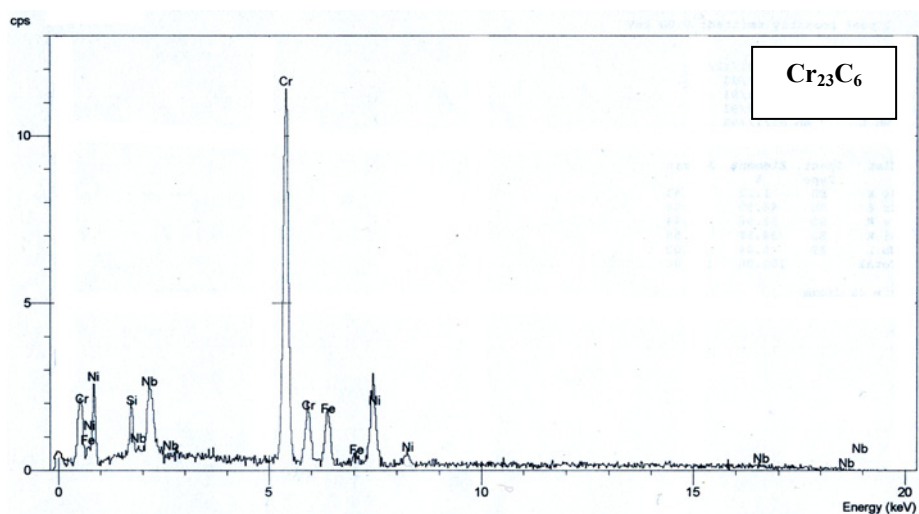


(ب)

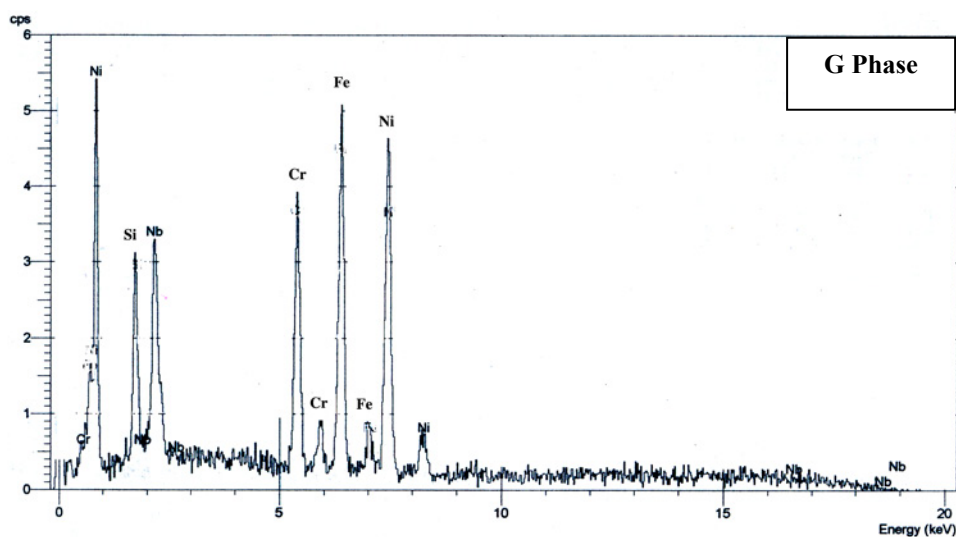


(الف)

شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی الکترونی از فولاد 25Cr-35Ni در شرایط پیر شده
الف) با استفاده از الکترون های ثانویه (SE) ب) با استفاده از الکترونهاي برگشتی (BE)



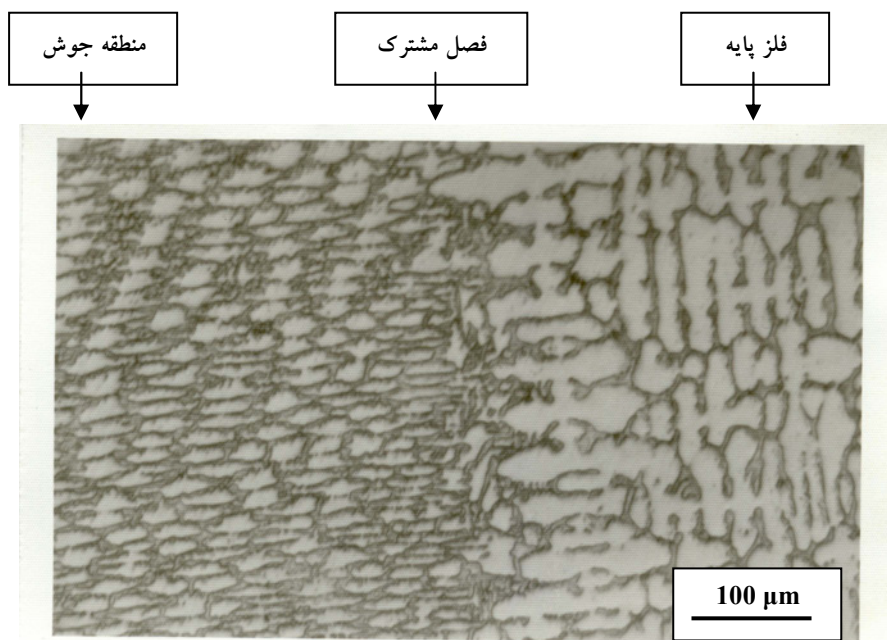
(الف)



(ب)

شکل ۶- تحلیل (EDS) کاربیدها در نمونه پیر شده (الف) کاربیدهای تیره (ب) کاربیدهای روشن
جدول ۳- خواص مکانیکی فولاد 25Cr-35Ni در شرایط مختلف

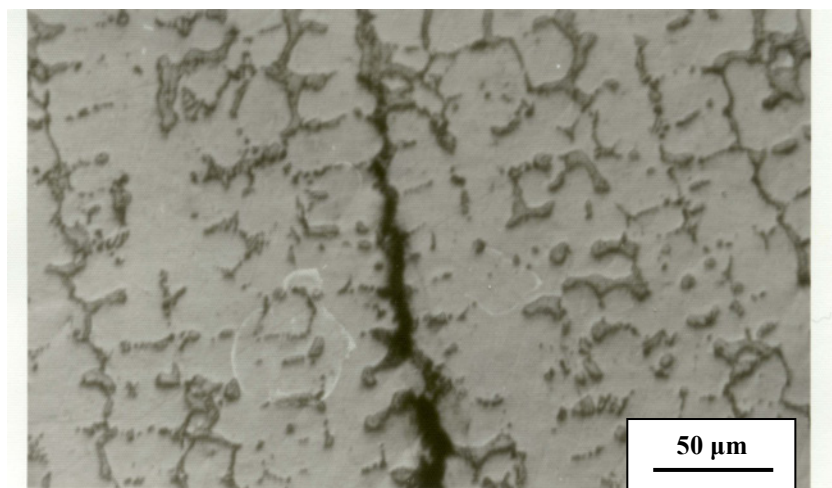
شرایط	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول (%)
ریختگی	۴۸۳	۶/۷
پیر شده	۵۱۲	۰/۸



شکل ۷- ساختار میکروسکوپی مناطق مختلف جوش برای نمونه‌ای با ساختار اولیه ریختگی

بررسی ساختار میکروسکوپی فولاد 25Cr-35Ni در شرایط پیر شده در شکل (۴) ارائه شده و نشان می‌دهد که در طی پیر شدن فولاد تغییرات متالورژیکی مهمی رخ داده است. شبکه تقریباً پیوسته کاربیدهای یوتکتیک اولیه که عمدتاً در طی پیر شدن تمایل به گسیختگی و کروی شدن دارد. همچنین در طی پیر شدن فولاد در دمای بالا، رسوب گذاری صورت گرفته و ذرات ریز کاربید ثانویه از زمینه فوق اشباع آستنیتی تشکیل می‌شود، شکل (۴-ب). بررسی ساختار میکروسکوپی این نمونه با استفاده دکتور الکترونیهای برگشتی در میکروسکوپ الکترونی شکل (۵-ب) نشان می‌دهد که شبکه کاربیدی در مرز دندریتها متشکل از دو نوع کاربید تیره و روشن بوده و همچنین کاربیدهای ریزی با رنگ تیره در زمینه مشاهده می‌شود. تحلیل نقطه‌ای کاربیدهای نمونه پیر شده، شکل (۶) نشان می‌دهد که کاربیدهای تیره موجود در شبکه کاربیدی همچنان

برگشتی در میکروسکوپ الکترونی، نشان می‌دهد که شبکه کاربیدهای اولیه در مرز دانه‌ها متشکل از دو نوع کاربید متفاوت بوده که یکی نسبت به دیگری رنگ روشنتری دارد، شکل (۲-ب). علت تفاوت در رنگ این کاربیدها به دلیل تفاوت در وزن اتمی عناصر تجمع یافته در این کاربیدهاست، کاربیدهای غنی از عنصری با وزن اتمی کمتر به رنگ تیره و کاربیدهای غنی از عنصری با وزن اتمی بیشتر به رنگ روشن مشاهده می‌شوند. تحلیل نقطه‌ای کاربیدها، شکل (۳) نشان می‌دهد که کاربیدهای تیره غنی از کروم و آهن بوده و مقایسه نتایج حاصل با بررسی سایر محققان در زمینه فولادهای مقاوم به حرارت و زنگ نزن نشان می‌دهد که این کاربیدها از نوع $M_{23}C_6$ (M نشان دهنده کروم و آهن) است و کاربیدهای اولیه به رنگ روشن غنی از نیوبیم بوده و از نوع NbC هستند [۱-۲].



شکل ۸- ساختار میکروسکوپی منطقه مجاور جوش برای نمونه ای با ساختار اولیه پیر شده

با توجه به نتایج خواص مکانیکی فولاد 25Cr-35Ni در شرایط ریختگی و پیر شده، جدول (۳)، دیده می شود که تشکیل کاربیدهای ثانویه در طی پیر شدن فولاد، اگرچه سبب افزایش استحکام کششی (و همچنین استحکام خزشی) آن می شود اما درصد ازدیاد طول و نرمی^{۱۷} آن را به شدت کاهش می دهد [۱، ۳ و ۱۴]. نرمی فلز زمینه به منظور توانایی تغییر شکل پلاستیکی آن در طی سرد شدن پس از جوشکاری الزامی است، در غیر این صورت احتمال ایجاد ترک در منطقه مجاور جوش در طی جوشکاری و پس از آن وجود دارد [۱۲-۱۴]. برخی از فولادها بیش از ۸۰٪ انعطاف پذیری خود را طی سرویس دهی در دمای بالا از دست می دهند [۱۴].

با توجه به شکل (۷) دیده می شود که منطقه جوش فولاد 25Cr-35Ni در شرایط ریختگی دارای ساختاری متفاوت (ریزتر) با فلز پایه (درشتتر) بوده ولی باز هم متشکل از زمینه آستنیتی و کاربیدهای یوتکتیکی است. تفاوت ساختار میکروسکوپی منطقه جوش و فلز پایه ناشی از تفاوت در سرعت سرد شدن و لذا تفاوت در نحوه انجماد است. بررسی مناطق مختلف نمونه جوشکاری شده نشان می دهد که در مناطق مختلف پیوستگی کاملی بین جوش و فلز پایه وجود داشته و هیچ گونه علائمی از وجود ترک مشاهده نمی شود. لذا

غنی از کروم و آهن بوده و تغییراتی را نسبت به کاربیدهای تیره نمونه ریختگی نشان نمی دهند، یعنی در طی پیر شدن ترکیب آنها تقریباً ثابت باقی مانده است. بررسیها نشان می دهد که این کاربیدها از نوع $M_{23}C_6$ (M نشان دهنده کروم و آهن) است. تحلیل نقطه‌ای کاربیدهای روشن نمونه پیر شده، شکل (۶-ب) نشان می دهد که کاربیدهای روشن غنی از سیلسیم، نیوبیم و نیکل بوده و با کاربیدهای روشن موجود در نمونه ریختگی تفاوت اساسی دارند. بررسیها نشان می دهد که این کاربیدها از نوع $Ni_{16}Nb_6Si_7$ (فاز G) است. علت تشکیل این نوع کاربید به دلیل ناپایداری ذرات کاربید NbC در دماهای بالا و دیفوزیون در حالت جامد Ni و Si از طرف زمینه به طرف NbC و دیفوزیون به طرف بیرون کربن از NbC برای واکنش با کروم زمینه است. تشکیل فاز G در طی حرارت دیدن فولاد زنگ نزن ۳۰۴ در دمای $750^{\circ}C$ و زمانی حدود ۱۰ ساعت مشاهده شده است [۱۶]. تحلیل نقطه‌ای کاربیدهای ریز زمینه نمونه پیر شده نیز نشان می دهد که این کاربیدها غنی از کروم و آهن و از نوع $M_{23}C_6$ (M نشان دهنده کروم و آهن) هستند. تشکیل کاربیدهای ثانویه ریز در داخل شبکه کاربیدهای اولیه در زمینه آستنیتی می تواند باعث افزایش تردی این فولاد در شرایط پیر شده و کاهش جوش پذیری آن شود [۱ و ۱۴].

می‌توان ادعان داشت که این نوع فولاد در شرایط ریختگی از جوش‌پذیری مطلوبی برخوردار است.

با توجه به شکل (۸) دیده می‌شود که در منطقه مجاور جوش فولاد 25Cr-35Ni که در شرایط پیر شده جوشکاری شده است، آثاری از ترک مشاهده می‌شود. ترکهای تشکیل شده از نوع بین دانه‌ای بوده و عمدتاً در بین کاربیدهای یوتکتیک رشد کرده‌اند. بنابراین می‌توان گفت که این نوع فولاد در شرایط پیر شده از جوش‌پذیری مطلوبی برخوردار نیست. جوش‌پذیری نامطلوب این فولاد در این شرایط قویا بستگی به از دست دادن نرمی فولاد در طی پیر شدن دارد. از دست دادن نرمی و ترد شدن فولاد بستگی به سه فاکتور، رسوب‌گذاری و رشد کاربیدهای ثانویه در زمینه آستنیتی، تغییر ترکیب شیمیایی کاربیدهای یوتکتیک و حضور فازهای رسوب کرده در داخل آنها در طی پیر شدن دارد.

۲- در طی پیر شدن کاربیدهای اولیه از نوع NbC به کاربیدهایی از نوع $Ni_{16}Nb_6Si_7$ تبدیل شده‌اند.

۳- نمونه پیر شده اگرچه دارای استحکام بالاتری در مقایسه با نمونه ریختگی است اما به دلیل تشکیل کاربیدهای ثانویه در زمینه، انعطاف‌پذیری آن به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

۴- در ضمن جوشکاری این فولاد در شرایط پیر شده، ترکهایی در منطقه مجاور جوش مشاهده می‌شود. علت تشکیل این ترکها ناشی از تغییر ترکیب شیمیایی کاربیدهای یوتکتیک، تشکیل کاربیدهای ثانویه در زمینه و کاهش انعطاف‌پذیری فولاد در طی پیر شدن است.

۵- ترکهای تشکیل شده در منطقه مجاور جوش در نمونه‌ای که در حالت پیر شده جوشکاری شده است از نوع بین دانه‌ای بوده و در بین کاربیدهای یوتکتیک رشد کرده‌اند.

۵- نتیجه‌گیری

یافته‌های پژوهشی نشان می‌دهد که:

۱- ریز ساختار فولاد 25Cr-35Ni در شرایط ریختگی دارای زمینه آستنیتی و شبکه‌ای از کاربیدهای اولیه از نوع NbC و $M_{23}C_6$ بوده در حالیکه ریز ساختار این فولاد در شرایط پیر شده دارای زمینه آستنیتی و شبکه‌ای از کاربیدهای اولیه کروی $M_{23}C_6$ و تبدیل یافته $Ni_{16}Nb_6Si_7$ همراه با کاربیدهای ریز ثانویه از نوع $M_{23}C_6$ است.

واژه‌نامه

- | | | |
|-------------------------------|---|------------------------------------|
| 1. petrochemical | 8. welding procedure specification (WPS) | 12. optical microscopy |
| 2. gas turbines | 9. American Society for Mechanical Engineering (ASME) | 13. scanning electron microscopy |
| 3. reformers | 10. gas tungsten arc welding (GTAW) | 14. energy dispersive spectrometer |
| 4. direct reduction processes | 11. direct current electrode negative (DCEN) | 15. secondary electron (SE) |
| 5. supersaturated matrix | | 16. backscattered electron (BE) |
| 6. as cast | | 17. ductility |
| 7. aged | | |

1. Wu, X.Q., Jing, H.M., Zheng, Y.G., Yao, Z.M., Ke, W., and Hu, Z. Q., "The Eutectic Carbides and Creep Rupture Strength of 25Cr20Ni Heat-Resistant Steel Tubes Centrifugally Cast with Different Solidification Conditions," *Materials Science and Engineering*, A293, pp. 252-260, 2000.
2. Borges, R.M.T., and de Almeida, L.H., "Microstructure of a Centrifugally Cast Modified-HP Steel Tube with Yttrium Additions," *Acta Microscopy Supply A*, 8, pp. 251 – 252, 1999.
3. Ibanez, R. A. P, Soares, G. D. A., de Almeida, L. H., and May I. Le, "Effects of Si Content on the Microstructure of Modified- HP Austenitic Steels," *Materials Characterization*, 30, pp. 243-249, 1993.
4. McGannon, H. E., Editor., "The making, shaping and treating of steel," *Pittsburgh: USS Steel*, p. 417, 1970.
5. Velasco, A., and Esquivel, J. T., "Thermal Equipment Tubes," Internal Report, HYL, Monterrey 1988:17.
6. ASM Handbook. "Properties and Selection of Irons, Steels and High Performance Alloys," vol.1, Metals Park, OH: ASM International, p. 930, 1990.
7. ASM Handbook. "Castings," vol.15, Metals Park, OH: ASM International, p. 727, 1988.
8. Borges, R.M.T., and de Almeida, L.H., "Microstructure of a Centrifugally Cast Modified-HP Steel Tube with Yttrium Additions," *Acta Microscopy Supply A*, 8, pp. 251 – 252, 1999.
9. Rodriguez, J., Haro, S., Velasco, A., and Colas, R., "A Metallographic Study of Aging a Cast Heat Resisting Alloy," *Materials Characterization*, 45, pp. 25-32, 2000.
10. Soares, G.D.A, de Almeida, L.H., Silveira, T.L., and May, I.Le, "Niobium Additions in HP Heat-Resistant Cast Stainless Steels," *Materials Characterization*, 29, 387–96, 1992.
11. Zhu, S. J., Li, P. E., Zhao, J., and Cao, Z. B., "The Effect of Prior Aging on the Creep Crack Growth Behaviour of Austenitic HK40 Steel," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 114, pp. 7-12, 1989.
12. de Almeida, L.H., Ribetas, A.F., and May, I.Le, "Microstructural Characterization of Modified 25Cr-35Ni Centrifugally Cast Steel Furnace Tubes," *Materials Characterization* 49, pp. 219-229, 2003.
13. Haro, S., Ram´rez, C., Mendoza, E., Rodr´guez, J., and Cola´s, R., "Microstructural Analysis of Heat-Resistant Welded Pipes," *Materials Characterization*, Article in press, 2003.
14. Haro, S., Lo´pez, D., Velasco, A., and Viramontes, R., "Microstructural Factors that Determine the Weldability of a High Cr-High Si HK 40 Alloy," *Materials Chemistry and Physics*, 66, pp.90-96, 2000.
15. "Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers and Welding and Brazing operators," ASME, Section IX, 1998.
16. Vitek, J.M., "G-Phase Formation in Aged Type 308 Stainless Steel," *Metallurgical Transactions A*, 18A, p.154, 1987.