

اثر عمليات حرارتي بعد از جوشكاري بر تغييرات ريزساختار و سختي فولاد زنك نزن رسوب سختي شونده PH 4-17 ترميم شده به روش جوشكاري

محمد رضا توکلی شوشتری^۱، محمد هادی مؤید^۲، علی داودی^۳

mtc.tech@gmail.com

چکیده

فولاد PH 4-17 يك فولاد زنك نزن رسوب سختي شونده مارتنزيتي كم كربن شامل ۵-۳٪ وزني مس مي باشد كه توسط عمليات پيرسازي با تشكيل رسوبات غني از مس توزيع شده در زمينه مارتنزيتي قابل سخت شدن است. ضرورت استفاده از اين فولاد به شكل محورهاي استحکام بالا در كشتي ها، توربين هاي گازی و در تاسيسات راکتورهاي هسته ای از يك طرف و گرانتربودن ساخت اين فولاد از ساير فولادهای زنك نزن از طرف ديگر، باعث شده است تا در صورت معيوب بودن قطعه امکان جايگزيني كاملا مشابه از لحاظ اقتصادي مقرون به صرفه نبوده و با استفاده از جوشكاري، مكان هاي معيوب ترميم شوند و هزينه تعميرات و زمان توقف کاهش يابد. در اين تحقيق، عمليات جوشكاري ترميمي GTAW انجام گرفته و سپس عمليات حرارتي پس گرم (PWHT) ابتدا در دماي حل سازي 1040°C و پس از آن پيرسازي در دماهاي ۴۸۰، ۵۵۰ و 620°C براي زمان هاي مشخص صورت پذيرفت. بررسي ميكروسكوبي ساختارهاي منطقه جوشكاري شده و همچنين سختي سنجي اين مناطق نشان از حذف HAZ و مشابهت ساختاري و سختي در مناطق جوش و فلز پايه در نمونه هاي PWHT مي باشد. همچنين در نمونه هاي ۵۵۰ و 620°C ميكروساختار لايه ای شكل مشابه با ساختار ويدمن اشتاتن، در مارتنزيت ترميم شده ديده مي شود.

واژه های کلیدی: فولاد زنك نزن PH 4-17، عمليات حرارتي بعد از جوشكاري، ريزساختار، سختي سنجي

¹ دانشجوي کارشناسي ارشد مهندسي مواد و متالورژي، دانشگاه فردوسي مشهد

² دانشيار گروه مهندسي مواد و متالورژي، دانشكده مهندسي، دانشگاه فردوسي مشهد

³ استاديار گروه مهندسي مواد، دانشكده مهندسي، دانشگاه تربيت معلم سبزوار

۱ مقدمه

فولادهای زنگ نزن رسوب سختی شونده^۱ اولین بار در سال ۱۹۴۰ گسترش یافتند و بعد از آن به طور روز افزونی بدلیل خواص ویژه ای که مهمترین آنها سهولت تولید، استحکام بالا، داکتیلیتی نسبتا خوب و مقاومت به خوردگی عالی می باشد، در مصارف مختلف مورد استفاده واقع شدند [1-5]. یکی از رایجترین آلیاژ رسوب سختی شونده در این گروه، فولاد PH 17-4 (AISI 630, UNS S17400) است که یک فولاد زنگ نزن مارتنزیتی شامل ۳-۵٪ وزنی مس می باشد که توسط رسوبات غنی از مس توزیع شده در زمینه مارتنزیت تیغه ای شکل تمپر شده استحکام یافته است [3-7]. به دلیل ترکیب عالی از خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی، کاربرد این فولاد برای استفاده در تجهیزات دریایی، صنایع شیمیایی و نیروگاههای هسته ای افزایش یافته است [5,8-9]. بعد از آنیل انحلالی و سرد کردن تا دمای اتاق، ساختار این فولاد، مارتنزیتی است؛ اما سختی بالایی را از خود نشان نخواهد داد. پیرسازی در محدوده دمایی °C ۴۸۰-۶۲۰ به دلیل تشکیل فاز نانومتری غنی از مس، منجر به رسوب سختی و افزایش در سختی و استحکام می گردد [2,4]. اعمال فرایندهای جوشکاری جهت تولید محصولات مهندسی اجتناب ناپذیر می باشند [10]. در این بین، عملیات جوشکاری قوسی با الکتروود تنگستن و گاز محافظ (GTAW)، در بسیاری اوقات برای مونتاژ کردن تجهیزات از جنس فولاد زنگ نزن استفاده میشود. ضرورت استفاده از فولادهای زنگ نزن رسوب سختی شونده PH 17-4 از یک طرف و گرانتر بودن ساخت این فولادها از سایر فولادهای زنگ نزن از طرف دیگر [11]، باعث شده است تا در صورت معیوب بودن قطعه امکان جایگزینی کاملاً مشابه از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نباشد. با استفاده از جوشکاری، مکان های معیوب و ترک خورده ترمیم می شوند و با توجه به کاهش زمان توقف و رفع نیاز خرید قطعه جدید، هزینه تعمیرات کاهش می یابد. فرایندهای انجمادی مثل جوشکاری، ترکیب و ریزساختار را در ناحیه جوش تغییر می دهد، همچنین حرارت ورودی ناشی از عملیات جوشکاری، باعث تغییرات ریزساختار در ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) می گردد. میکروساختار ناحیه فلز جوش در فولاد PH 17-4 اساساً شامل مارتنزیت است اما تشکیل کسر حجمی کم دلتا فریت نیز در زمینه مارتنزیت تمپر نشده مشاهده گردیده است [10]. از طرف دیگر، فولاد زنگ نزن PH 17-4 جوشکاری شده معمولاً در شرایط As-weld مورد استفاد قرار نمی گیرد مگر آنکه عملیات حرارتی پس از جوش^۲ عملی نباشد. برای بدست آوردن خواصی نزدیک به خواص فلز پایه، PWHT ضروری است که در اینصورت همزمان فلز جوش، منطقه HAZ و فلز پایه سخت می گردد و همچنین تنشهای پسماند همراه جوش کاهش می یابد و بنابراین راندمان اتصال بالا می رود. عملیات آنیل انحلالی قبل از پیرسازی نیز باعث می شود تا میزان دلتا فریت در فلز جوش و منطقه HAZ کاهش یافته و لذا یکنواختی و استحکام منطقه جوش افزایش یابد [10].

¹ Precipitation Hardening Stainless Steel / PH

² Post Weld Heat Treatment (PWHT)

از آنجا که مطالعه بر روی تغییرات ریزساختاری ناشی از عملیات جوشکاری در فولاد PH 4-17 و نیز اثر PWHT بر این تغییرات، یافت نشد، در این تحقیق اثر PWHT بر تغییرات ریزساختار و سختی این فولاد که به روش جوشکاری GTA ترمیم شده، بررسی گردیده است.

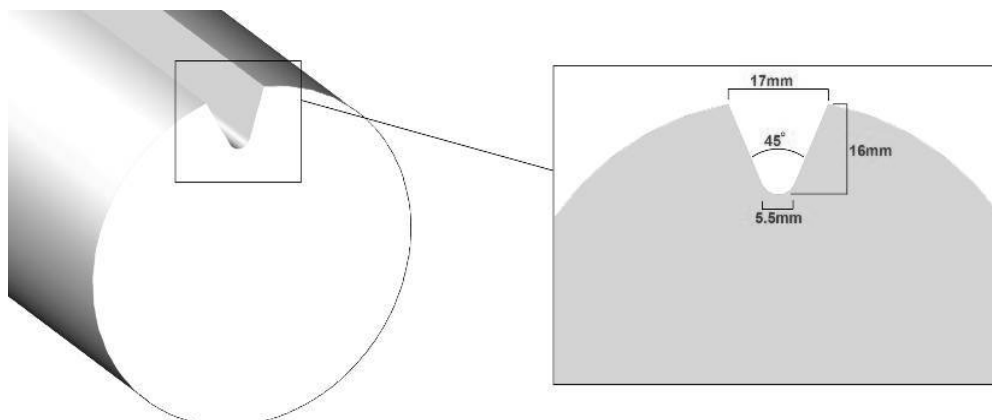
۲ مواد و روش تحقیق

برای انجام آزمایشات از یک قطعه فولاد استوانه ای شکل به قطر ۹۳ mm و طول ۴۰۰ mm از جنس فولاد زنگ نزن PH 4-17 استفاده شد. آنالیز ترکیب شیمیایی این آلیاژ بر حسب درصد وزنی، 0.01%C, 0.86%Mn, 0.021%P, 0.007%S, 0.8%Si, 15.74%Cr, 3.96%Ni, 0.06%Mo, 2.74%Cu, 0.3%(Nb+V) and Fe balance بود که با ASTM A705 (grade 630)، استاندارد برای فولاد زنگ نزن رسوب سختی شونده آهنگری شده، مطابقت دارد [12]. تاریخچه قبلی عملیات حرارتی این فولاد در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. تاریخچه قبلی عملیات حرارتی آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق.

Label	Condition	Heat treatment	Hardness (RC)
I	As-received	Condition A(1h), Oil Quench, 550°C(4h), Air cool, 620 °C (4h), Air cool	37.5

با توجه به اینکه در این تحقیق، از جوشکاری به عنوان جوشکاری ترمیمی استفاده گردیده است لذا شرایط عملی با فرض وجود عیب یا ترک احتمالی در قطعه شبیه سازی شد. ابتدا شیاری با مدول فرز به منظور از بین بردن آن عیب و با ابعادی که در شکل ۱ نشان داده شده است ایجاد و سپس جوشکاری گردید. با توجه به استاندارد ASME section II عملیات جوشکاری به روش GTAW و با استفاده از سیم جوش ER630 با ترکیب شیمیایی 0.032%C, 0.54%Mn, 0.021%P, 0.01%S, 0.37%Si, 16.2%Cr, 4.59%Ni, 0.68%Mo, 3.9%Cu, 0.27%(Nb+V) and Fe balance مطابق با استاندارد AWS A5.9-93، انجام شد. پارامترهای جوشکاری نیز به این قرار است: جریان A ۱۵۰-۱۳۰، ولتاژ V ۱۶-۱۴، سرعت جوشکاری ۱۸۰-۲۰۰ mm/min، گاز محافظ آرگون با خلوص ۹۹/۹۹٪ و با نرخ جریان ۱۴-۱۱ lit/min.



شکل ۱. طراحی شماتیک شیار ایجاد شده جهت انجام عملیات جوشکاری ترمیمی.

بعد از عملیات جوشکاری، PWHT در سه شرایط مختلف II، III و IV و بر اساس استاندارد ASTM A705[12] همانطور که در جدول ۲ آمده است، انجام گرفت. با انتخاب این دماها، رنجی از نمونه های پیک پیرسازی (peak-aged) تا نمونه فرایپر شده (over-aged) بدست آمد [13].

جدول ۲. PWHT استفاده شده در این تحقیق.

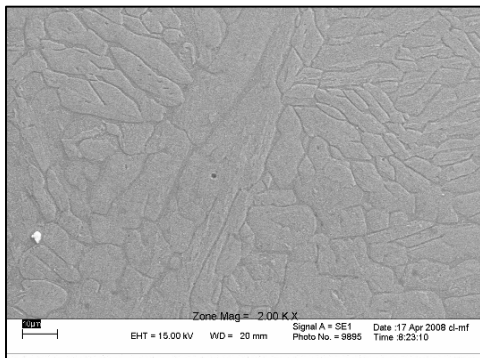
Label	Conditions	Heat treatment
II	H900	Condition A(1h) → 480°C × 1h → Air cool
III	H1025	Condition A(1h) → 550 °C × 4h → Air cool
IV	H1150	Condition A(1h) → 620 °C × 4h → Air cool

سپس نمونه های متالوگرافی از منطقه جوشکاری شده، جداسازی شد و با کاغذهای سنباده ۶۰ تا ۱۲۰۰ پولیش و با خمیر الماسه ۱ میکرون پرداخت نهایی گردید. جهت آزمایش ماکرواچ و تعیین ناحیه جوش و HAZ، نمونه ها در محلول ماربل با ترکیب ۴ گرم CuSO_4 ، ۲۰ میلی لیتر HCl ، ۲۰ میلی لیتر آب مقطر غوطه ور و سپس با الکل شستشو و با سشواری خشک گردیدند. برای مشاهده میکروسکوپی مناطق فلز پایه، فلز جوش و HAZ، نمونه ها در محلول ویلا (Villela) با ترکیب ۱ گرم اسید پیکریک، ۵ میلی لیتر HCl ، ۱۰۰ میلی لیتر اتانول، قرار داده شد. جهت آنالیز دقیق تر منطقه جوش، از میکروسکوپ الکترونی روبشی LEO 1455VP(SEM) استفاده شد. همچنین سختی سنجی با راکول C در سه ناحیه جوش، HAZ و فلز پایه انجام پذیرفت.

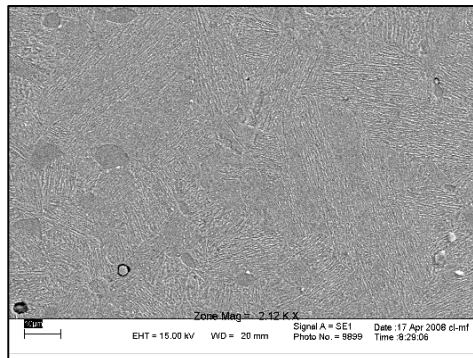
۳ یافته ها و بحث

۳-۱ نمونه I (As-weld)

میکروساختار نمونه As-received که تصویر SEM آن در شکل ۲ آمده است، شامل مارتنزیت تیغه ای تمپر شده و فریت می باشد.

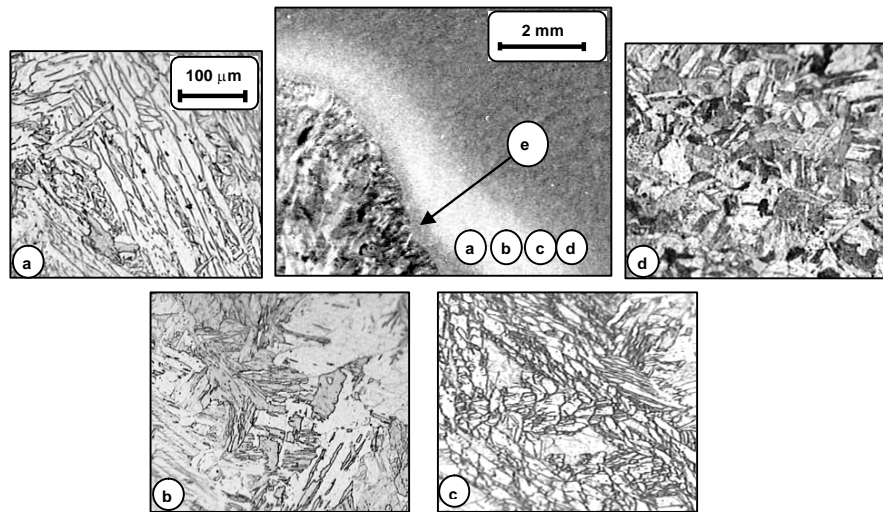


شکل ۳. تصویر SEM از میکروساختار ناحیه جوش در نمونه I فولاد 17-4PH جوشکاری با GTAW. مارتنزیت تمپر نشده و دلتا فریت.



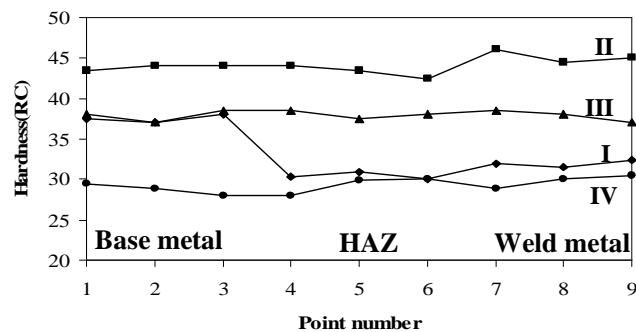
شکل ۲. تصویر SEM از میکروساختار نمونه as-received فولاد 17-4PH، فاز لایه ای شکل سفید رنگ فریت در زمینه مارتنزیت تیغه ای تمپر شده.

هنگامی که انجماد به صورت فریت اولیه رخ می دهد، در پایان انجماد مقداری آستنیت در مرزهای دندریتی فریت تشکیل می گردد و شروع به رشد کردن می کند و با سرد کردن در هوا و یا روغن، تحول آستنیت به مارتنزیت رخ می دهد و ساختار نهایی شامل تیغه های مارتنزیت تمپر نشده در داخل دانه های آستنیت اولیه به همراه دندریت های دلتا فریت اولیه می باشد [11]. در نمونه I، بعد از مراحل پیرسازی میکروساختاری مشابه با ساختار ویدمن اشتاتن دیده می شود اما در واقع این لایه های سفید رنگ که در شکل ۲ مشاهده می گردد، فاز آلفا فریت تبلور مجدد یافته است که در مارتنزیت تمپر شده تشکیل گردیده است. وجود رسوبات غنی از مس در مقیاس نانو نیز در طی عملیات حرارتی پیرسازی توسط دیگران گزارش شده است [1-6]. نواحی مختلف ایجاد شده بوسیله عملیات جوشکاری GTA ابتدا با ماکروگرافی مشخص گردید. تصویر SEM از ناحیه جوش نمونه As-weld، در شکل ۳ نشان داده شده است. ریزساختار شامل زمینه مارتنزیتی بصورت تیغه های بلند و کشیده مارتنزیت تمپر نشده که در جهات مختلف رشد کرده اند و همچنین دلتا فریت که این تیغه ها را احاطه کرده است، می باشد. نتیجه ماکروگرافی در شکل ۴ نشان دهنده ناحیه جوش، منطقه ذوب (Fusion Zone)، HAZ و فلز پایه می باشد. با توجه به تست ماکرواچ، پهنای HAZ در حدود ۳ میلی متر است. بر اساس مشاهدات متالوگرافی، ۴ ناحیه متمایز در HAZ مشخص است. شکل (a) ۴، نشان دهنده قسمتی از HAZ در مجاورت مرز ذوب است که ناحیه آنیل انحلالی است. در این ناحیه، که حل سازی رسوبات انجام می گیرد، عمده ریزساختار در درجه حرارت بالا از فریت تشکیل شده است ولی ممکن است مقداری آستنیت در مرز دانه های فریت وجود داشته باشد. به محض سرد شدن تا درجه حرارت اتاق، ریزساختار شامل تیغه های مارتنزیتی تمپر نشده و دلتا فریت می باشد.



شکل ۴. ماکروگرافی از جوش GTA که نشاندهنده مناطق HAZ (d و c, b, a) و منطقه ذوب می باشد. همه تصاویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی یکسان هستند که در (a) نشان داده شده است.

در شکل (b) ۴، ریزساختار در درجه حرارت بالا شامل فریت و آستنیت خواهد بود. در این منطقه از HAZ دما به مقدار کافی بالا می باشد که رشد دانه آستنیت رخ خواهد داد. به محض سرد شدن، این منطقه شامل تیغه های مارتنزیت درشت شده و البته تمپر نشده و دلتا فریت خواهد شد. شکل (c) ۴، بخشی از HAZ می باشد که در هنگام جوشکاری تا منطقه دو فازی آستنیت و فریت گرم می شود، ولی از آنجایی که درجه حرارت آن پایین تر از ناحیه b می باشد، دانه ها ریزترند. در شکل (d) ۴، ریزساختار تحت متالوگرافی کاملاً نشاندهنده فلز پایه فرایپر شده (Over-aged) می باشد که این مساله سبب نرم شدن موضعی آن نسبت به فلز پایه می شود. چنین تغییرات ساختاری در HAZ در فولاد زنگ نزن مارتنزیتی نیز گزارش شده است [11]. فرایند جوشکاری GTA همچنین باعث تغییراتی در خواص مکانیکی نواحی مختلف می شود. نتیجه سختی سنجی در نمونه I از نواحی فلز پایه، HAZ و جوش که در شکل ۵ آمده است، نشان می دهد که مقدار سختی در نواحی HAZ و جوش کاهش پیدا کرده است.

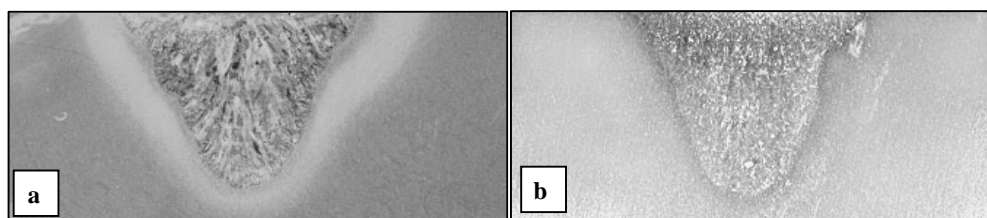


شکل ۵. سختی سنجی مناطق فلز پایه، HAZ و جوش در نمونه های I, II, III و IV.

کاهش در میزان سختی فلز جوش و HAZ نسبت به فلز پایه به ترتیب می تواند فقدان رسوبات غنی از مس و پدیده نرم شدن ناشی از دلتا فریت اضافی و یا درشت شدن دانه ها باشد [11]. بطور خلاصه می توان گفت که فرایند جوشکاری GTA باعث تغییرات میکروساختاری و در نتیجه رفتار مکانیکی در نواحی جوش و HAZ می گردد.

۲-۳ نمونه های PWHT

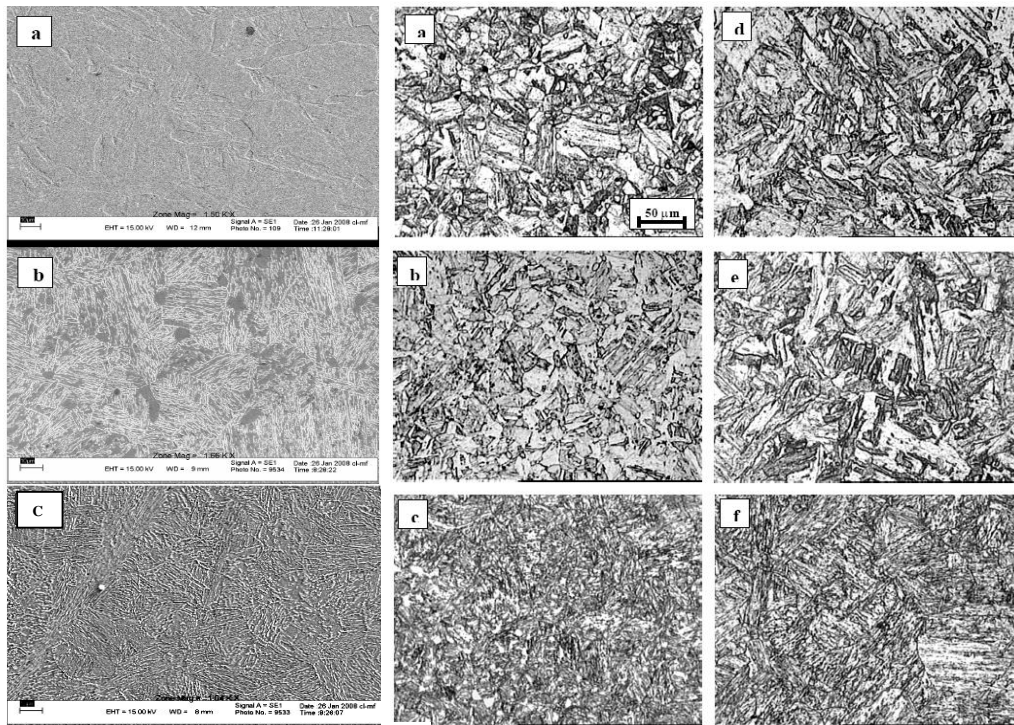
اولین مرحله در PWHT، آنیل انحلالی است که باعث حذف ناحیه مضر HAZ در مقایسه با نمونه As-weld می شود. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، مقایسه ماکروگرافی در نمونه I و IV (به عنوان مثال) مؤید این مطلب است که عملیات آنیل انحلالی منجر به از بین رفتن HAZ گردیده و فقط منطقه ذوب بین ناحیه جوش و فلز پایه آشکار است.



شکل ۶. ماکروگرافی از جوش GTA در نمونه های I (a) و IV (b) که نشاندهنده از بین رفتن HAZ می باشد.

ریزساختار نمونه های PH 4-17 در نواحی فلز پایه و جوش در شرایط II، III و IV در شکل ۷ نشان داده شده است. ریزساختار در همگی شرایط شامل زمینه مارتنزیت تمپر تیغه ای شکل به همراه مقدار کمی دلتا فریت می باشد. با افزایش دمای پیرسازی ریزساختار تغییراتی می کند و واضح است که کسر حجمی و مورفولوژی فاز یا فازهایی تغییر کرده است که این موضوع در نمونه IV به دلیل وقوع تبلور مجدد در ساختار، بیشتر مشخص است. اما نکته مهم اینست که با اعمال PWHT میکروساختار در هر دما در ناحیه فلز جوش کم و بیش مشابه فلز پایه است. به دلیل آنکه بررسی میکروسکوپ نوری خصوصیات میکروساختار و جزییات زمینه مارتنزیتی را در نمونه های مختلف بدست نمی دهد می بایستی برای تعیین دقیق تر میکروساختار از SEM استفاده کرد؛ هرچند رسوبات نانومتری غنی از مس را با این میکروسکوپ نیز نمی توان بررسی کرد [2]. در شکل ۸ تصاویر SEM از میکروساختار ناحیه فلز پایه در نمونه های II، III و IV آمده است. در نمونه II (شکل ۸ (a))، تیغه های مارتنزیت هم محور تمپر شده که در دانه های آستنیت اولیه تشکیل شده است، دیده می شود؛ اما در نمونه های III و IV (اشکال ۸ (b,c)) ساختار متفاوتی وجود دارد و یک ساختار لایه ای مشابه با ساختار ویدمن اشتاتن مشاهده می گردد که مانند ساختار مارتنزیت تمپر شده معمول در نمونه II نیست و شامل فریت آلفای تبلور مجدد یافته (فاز لایه ای سفید رنگ) در مارتنزیت تمپر شده است. از طرف دیگر، با افزایش دمای پیرسازی از ۵۵۰ به ۶۲۰^o C

مشاهده می گردد که اندازه و مقدار این لایه های سفید رنگ افزایش یافته است. مطالعات قبلی نشان داده است که یک ساختار لایه ای در میکروساختار آلیاژ PH 4-17 در دماهای پیرسازی بالاتر از 570°C وجود دارد که ممکن است به خاطر تشکیل آستنیت برگشتی¹ و یا فاز آلفا فریت تبلور مجدد یافته در مارتنزیت تمپر شده باشد [5]. اندازه و مقدار این فاز لایه ای سفید رنگ در تحقیق حاضر، حداقل ۴۲٪ حجمی در نمونه IV (طبق اندازه گیری با نرم افزار پردازش تصویر متالورژی²) می باشد و احتمال اینکه این ساختار، به علت تشکیل آستنیت برگشتی باشد وجود ندارد؛ زیرا مقدار این فاز طبق اندازه گیری با XRD توسط هونگ وو و همکارانش [5] ۹-۶٪ حجمی می باشد که خیلی کمتر از میزان این لایه های سفید اندازه گیری شده در اشکال (b,c) ۸ می باشد. همچنین دمای A_s (دمای تبدیل مارتنزیت به آستنیت) برای آلیاژهای آهن - نیکل نیز نشان داده است که میزان فاز آستنیت خیلی کمتر از فاز فریت در 620°C میباشد [5]. نتایج نشان می دهد که اعمال PWHT یعنی آنیل انحلالی و به دنبال آن عملیات حرارتی پیرسازی، باعث به حداقل رساندن ناهمگونی و غیر یکنواختی ساختاری بین نواحی جوش و فلز پایه می گردد که این موضوع با گفته مقدمه نیز مطابقت دارد.



شکل ۷. تصاویر نوری از مناطق فلز پایه (a,b,c) و جوش (d,e,f) به ترتیب در نمونه های II، III و IV
 شکل ۸. تصاویر SEM از میکروساختار ناحیه فلز پایه در (a) II، (b) III و (c) IV.

¹ Reverted Austenite

² Metallurgical Image Processing / MIP

نتایج سختی سنجی در شکل ۵ نیز نشان از حذف HAZ در نمونه های II، III و IV می دهد و با نتایج اخیر همخوانی دارد؛ یعنی با انجام عملیات حرارتی بعد از جوشکاری توزیع سختی بسیار یکنواختی بدست آمد. از طرف دیگر با افزایش دمای پیرسازی از ۴۸۰ به ۶۲۰°C مقدار سختی از بیشترین مقدار ۴۳/۵ به کمترین مقدار ۳۰ HRC کاهش یافت. اگرچه کمترین دمای پیرسازی، ۴۸۰°C، منجر به مقدار سختی بالاتر می گردد اما تردی در میکروساختار ایجاد می شود که این مطلوب نیست [3]. در این دما، رسوبات مس کوهزنت هستند و این خوشه های ریز غنی از مس موجب افزایش سختی می شوند [2,7,13]. اما در دمای پیرسازی بالا تاثیر معکوس دیده می شود و همانطور که از نتایج سختی سنجی در دمای ۶۲۰°C نیز قابل مشاهده است، سبب نرم شدن قابل ملاحظه ای در ساختار می گردد. این می تواند مربوط به درشت شدن رسوبات غنی از مس اپسیلون (ε-Cu) باشد که کوهزنی خود را از دست داده اند [14]. یکی دیگر از عوامل تاثیر گذار در نرم شدن، تشکیل آستنیت برگشتی می باشد که در دماهای ۴۸۰ و ۵۵۰°C تشکیل نمی شود [2,3,5]. عامل دیگر می تواند فاز فریت لایه ای شکل باشد که موجب کاهش سختی گردیده است [5]. دمای پیرسازی ۵۵۰°C، توزیع سختی یکنواختی را در حدود ۳۷ HRC را نشان می دهد. پس با توجه به اندازه گیری سختی، دمای میانی حدود ۵۵۰°C بهینه است.

۴ نتیجه گیری

از بررسی اثر PWHT بر تغییرات ریزساختار و سختی آلیاژ PH 4-17 جوشکاری ترمیمی شده، نتایج زیر قابل دستیابی است.

- ✓ اولین مرحله در PWHT، آنیل انحلالی است که باعث حذف ناحیه مضر HAZ در مقایسه با نمونه as-weld می شود.
- ✓ PWHT موجب کاهش غیریکنواختی میکروساختار و همچنین سختی بین نواحی فلز پایه و جوش می گردد.
- ✓ در نمونه پیرسازی شده در ۴۸۰°C، تیغه های مارتنزیت هم محور تمپر شده که در دانه های آستنیت اولیه تشکیل شده است، دیده می شود. در مقابل، در نمونه های ۵۵۰ و ۶۲۰°C ریزساختار شامل فاز لایه ای شکل سفیدرنگ آلفا فریت تبلور مجدد یافته در مارتنزیت تمپر شده است.
- ✓ با در نظر گرفتن بررسی نتایج ریزساختار و سختی، عملیات حرارتی پیرسازی در ۵۵۰°C به مدت ۴ ساعت، شرایط بهینه را حاصل نمود.

۵ تشکر و قدردانی

نویسندگان از آقای مهندس گلپانی در شرکت طراحی مهندسی توس دریا برای در اختیار گذاشتن آلیاژ 17-4 PH و همچنین از آقای دکتر خلیل رنجبر در دانشگاه شهید چمران اهواز برای انجام آزمایشات SEM کمال تشکر را دارند.

۶ مراجع

1. J.R. Davis, ASM Specialty handbook stainless steel, ASM international, Materials Park, OH, USA, 1994.
2. C.N. Hsiao, C.S. Chiou and J.R. Yong, 'Aging reactions in a 17-4 PH stainless steel'. *Mater Chem. Phys.*, 74, 2002, 132-42.
3. Wang Jun, Zou Hong, Li Cong, Qiu Shao-Yu, Shen Bao-Luo, 'The effect of microstructural evolution on hardening behavior of type 17-4 PH stainless steel in long-term aging at 350 °C'. *Mater Charact*, 57, 2006, 274-80.
4. J.D. Bressan, D.P. Daros, A. Sokolowski, R.A. Mesquita, C.A. Barbosa, 'Influence of hardness on the wear resistance of 17-4 PH stainless steel evaluated by the pin-on-disc testing', *J. Mater. Process. Technol*, 205, 2008, 353-359.
5. J. Hung Wu, C. Kung Lin, 'Influence of high temperature exposure on the mechanical behavior and microstructure of 17-4 PH stainless steel'. *Mater. Sci. Eng.*, 38, 2003, 965-971.
6. M. Murayama, Y. Katayama and K. Hono, 'Microstructural Evolution in a 17-4 PH Stainless Steel after Aging at 400°C', *Metall. Mater. Trans. A.*, 30A, 1999, 345-353.
7. W.C. Chiang, C.C. Pu, B.L. Yu, J.K. Wu, 'Hydrogen susceptibility of 17-4 PH stainless steel', *Mater. Lett.*, 57, 2003, 2485-2488.
8. AK steel. '17-4PH stainless steel product Data Bulletin', AK steel corporation, Middleton, OH, 2000.
9. Anees U. Malik, N.A. Siddiqi and Ismail N. Andijani, 'Corrosion behavior of some highly alloyed stainless steels in seawater', *Desalination*, 97, 1994, 189-197.
10. ASM Handbook Vol. 6: Welding, Brazing, and Soldering, 10th edn, 482-490, 1993, ASM international, Materials Park, OH, USA.
11. J.C. Lippold, D.J. Kotecki, Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel, John Wiley & Sons, 2005.
12. ASTM A 705: Standard specification for age-hardening stainless steel forgings, 1996, Annual Book of ASTM standards.
13. L. W. Tsay, W. C. Lee, R. K. Shiue and J. K. Wu, 'Notch tensile properties of laser-surface-annealed 17-4 PH stainless steel in hydrogen-related environments', *Corr. Sci.*, 44, 2002, 2101-2118.
14. H. R. Habibi Bajguirani, 'The effect of ageing upon the microstructure and mechanical properties of type 15-5 ph stainless steel', *Mater. Sci. Eng. A.*, 338, 2002, 142-159.

Influence of PWHT on weldment microstructure and hardness of repair GTAW 17-4 PH stainless steel

M.R. Tavakoli Shoushtari¹ mtc.tech@gmail.com
M.H. Moayed² mhmoayed@um.ac.ir
A. Davoodi³ davoodi@sttu.ac.ir

Abstract

17-4 PH is a martensitic stainless steel containing 3-5 wt.% Cu and is strengthened by the precipitation of nano-size dispersed copper particles. Due to its appropriate combination of mechanical property and corrosion resistance, application of this alloy has been increased for a variety of usages in marine constructions, chemical industries and nuclear power plants. However, producing this type of stainless steel is much expensive than the other types, in the presence of any defects, replacement of exactly same material is expensive. Therefore, repair welding is commonly technique to reduce both shut down period and the cost for providing the new material. In this paper, the influence of post weld heat treatment, solution annealing followed by ageing at 480, 550 and 620 °C on weldment microstructure and hardness in GTAW 17-4 PH stainless steel was studied. SEM results revealed that all PWHT's improve the microstructural similarity by disappearing HAZ due to solution annealing treatment confirmed by hardness measurement. In 550 and 620 °C the microstructure is similar to the Windmännstätten structure, unlike the typical tempered martensite structure consisting of recrystallized lamellar ferrite layer formed in the tempered martensite.

Key Words: 17-4 PH stainless Steel, PWHT, Microstructure, Hardness.

¹ M.Sc student in Metallurgical and Material Engineering Department of Ferdowsi university of Mashhad.

² Associate Professor in Metallurgical and Material Engineering Department of Ferdowsi university of Mashhad.

³ Assistant Professor in Material Engineering Department of Tarbiat Moallem University of Sabzevar.