

The second Joint Conference of
12th Iranian Metallurgical
Engineers Society Annual
Congress
and

20th Iranian Foundry Society
Seminar

Islamic Azad University
Karaj Branch

2008, 18-19 November

ABSTRACTS

Dr. Mehrdad Abbasi



تأثير سيكلهاي عمليات حرارتي روي ريزساختار و سختي فولاد زنگنزن مارتنزيتي رسوب سخت شونده 17-4PH

فاطمه رشیدی^۱، سيد عبدالکریم سجادی^۲، سيد مجتبی زهرجد^۳

چکیده:

فولادهای زنگنزن رسوب سخت شونده، از جمله فولاد 17-4PH، برای دستیابی به استحکام و چقرمگی بالا و در عین حال داشتن مقاومت خوب خوردگی توسعه یافته‌اند. افزایش استحکام در فولادهای زنگنزن رسوب سختی ناشی از تشکیل ترکیبات بین فلزی نیوبیم، نیکل، آلومینیوم و مس در استتیت یا زمینه‌ی مارتنزیت کم کربن است. در این پژوهش، فولاد بعد از عملیات محلول‌سازی در دمای ۱۰۵۵ و ۱۰۶۵ درجه سانتیگراد مورد تمپر در دماهای ۴۸۰، ۵۵۰ و ۶۲۰+۷۶۰ درجه سانتیگراد در مدت زمان‌های ۱ و ۴ ساعت قرار گرفت. دو محیط روغن و آب به عنوان محیط کوئینچ انتخاب شد تا تأثیر سرعت سرد شدن بر سختی و ریزساختار فولاد بررسی شود. برای تشخیص درست فریت‌های دلتا از روش الکترواچ استفاده گردید. پس از آن، ریزساختار و سختی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی SEM و دستگاه سختی سنج مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با تغییر دمای محلول‌سازی سختی و ریزساختار فولاد تغییر محسوسی نمی‌کند. ولی افزایش دما و زمان پیرسازی موجب تغییر ریزساختار و سختی فولاد می‌گردد.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ نزن 17-4PH، رسوب سختی، محلول‌سازی، پیرسازی، SEM

۱. فارغ‌التحصیل رشته مهندسی متالورژی - گروه مهندسی متالورژی و مواد - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد
۲. دانشیار - گروه مهندسی متالورژی و مواد - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد
۳. دانشیار - گروه مهندسی متالورژی و مواد - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

تأثير سيكل‌هاي عمليات حرارتي روي ريزساختار و سختي فولاد زنگ‌نزن مارتنزيتي رسوب سخت شونده 17-4PH

فاطمه رشیدی^۱، سيد عبدالکريم سجادی^۲، سيد مجتبی زبرجدی^۳
گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده
فولادهای زنگ‌نزن رسوب سخت شونده، از جمله فولاد 17-4PH، برای دستیابی به استحکام و چقرمگی بالا و در عین حال داشتن مقاومت خوب خوردگی توسعه یافته‌اند. افزایش استحکام در فولادهای زنگ‌نزن رسوب سختی ناشی از تشکیل ترکیبات بین فلزی نیوبیم، نیکل، آلومینیوم و مس در آستنیت یا زمینه‌ی مارتنزیت کم کربن است. در این پژوهش، فولاد بعد از عملیات محلول‌سازی در دمای ۱۰۵۵ و ۱۰۶۵ درجه سانتیگراد مورد تیمر در دماهای ۵۵۰، ۴۸۰ و ۶۲۰+۷۶۰ درجه سانتیگراد در مدت زمان‌های ۱ و ۴ ساعت قرار گرفت. دو محیط روغن و آب به عنوان محیط کوئینچ انتخاب شد تا تأثیر سرعت سرد شدن بر سختی و ریزساختار فولاد بررسی شود. برای تشخیص درست فریت‌های دلتا از روش الکترواچ استفاده گردید. پس از آن، ریزساختار و سختی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی SEM و دستگاه سختی سنج مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با تغییر دمای محلول‌سازی سختی و ریزساختار فولاد تغییر محسوسی نمی‌کند. ولی افزایش دما و زمان پیرسازی موجب تغییر ریزساختار و سختی فولاد می‌گردد.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ نزن 17-4PH، رسوب سختی، محلول‌سازی، پیرسازی، SEM

¹ فارغ‌التحصیل رشته مهندسی متالورژی - گروه مهندسی متالورژی و مواد - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

² دانشیار - گروه مهندسی متالورژی و مواد - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

³ دانشیار - گروه مهندسی متالورژی و مواد - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

مقدمه

فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی 17-4PH تقریباً شامل 3wt% مس است که به وسیله‌ی ایجاد رسوبات مس در زمینه مارتنزیت استحکام می‌یابد [۱]. هدف از تولید فولادهای زنگ‌نزن رسوب‌سخت‌شونده، تولید فولادهای زنگ‌نزن با درصد کربن کم، درصد نیکل کم و حاوی عناصر پایدارکننده فریت بود. بنابراین آستنیت از پایداری کمی برخوردار بوده و در دمای پایین به مارتنزیت پایدار تبدیل می‌شود. سپس با پیر شدن در دمای پایین‌تر، رسوبات ریز و بسیار ظریف از ترکیبات بین فلزی حاوی نیکل (Ni_3Al) و نیویوم و مس تشکیل شده و بدین ترتیب استحکام افزایش می‌یابد [۲]. ریزساختار فولاد شامل زمینه‌ی مارتنزیتی به همراه حدود ۱۰ درصد فاز فریت دلتا است [۳]. مقاومت به خوردگی این فولادها مثل فولادهای مارتنزیتی است. در بسیاری از این فولادها سختی را تا بالای 44HRC می‌توان افزایش داد. اما روش سخت گردانی این فولادها مثل فولادهای مارتنزیتی نیست و سخت گردانی تند سرمایی برای این فولادها کاربردی ندارد. [۴]

گفته شده است در مراحل اولیه، رسوبات مس به صورت خوشه‌های همدوس bcc هسته‌سازی کرده و در زمینه‌ی bcc اشباع شده رشد می‌کنند. این رسوبات حالت همدوسی را بعد از رسیدن به یک اندازه‌ی بحرانی مشخص از دست می‌دهند [۵]. رفتار پیرسختی در این فولاد مشابه با آلیاژهای رسوب سخت معمولی هست. تمپر مارتنزیت تأثیر کمی روی سختی طی فرایند پیرسازی در فولاد دارد. رسوبات Cu در نمونه‌ی پیر شده در 480°C برای 1hr با TEM آشکار شده است. هرچند در دماهای پیرسازی بالاتر، 650°C ، که از دمای AC_1 کمتر است، شکل‌گیری رسوبات مس با تغییر فرم بیشتر آستنیت همراه است [۶].

Wang و همکارانش [۷] با مطالعه فولاد زنگ‌نزن 17-4PH گزارش کرده اند که وقتی آلیاژ در 350°C برای ۹ ماه پیر شد، مقداری آستنیت برگشتی تشکیل گردید و رسوبات $\varepsilon\text{-Cu}$ درشت شدند. ولی وقتی آلیاژ از ۹ تا ۱۲ ماه پیر شد، مقداری توده‌ی کاربید ثانویه، M_{23}C_6 ، رسوب کرده است. با افزایش زمان پیرسازی به ۱۵ ماه، یک مقدار آستنیت برگشتی تغییر شکل داده است و فاز G، یک نوع ترکیب بین فلزی مشابه با رسوبات $\varepsilon\text{-Cu}$ ، در زمینه‌ی آلیاژ در این دمای متوسط اتفاق می‌افتد. [۷]

Murayama و همکارانش [۸] ریزساختار فولاد زنگ‌نزن 17-4PH را مطالعه کرده است. آنها گزارش داده اند که نمونه‌های عملیات حرارتی محلول‌سازی شده شامل بیشترین مارتنزیت با کسری کوچک از فریت δ بود و هیچ رسوبی در فاز مارتنزیت حضور نداشت، در حالیکه ذرات مس fcc در فریت δ وجود داشت. بعد از تمپر در 580°C به مدت ۴ ساعت، ذرات همدوس مس در فاز مارتنزیت رسوب می‌کند. البته مشاهده‌ی رسوبات فقط با میکروسکوپ‌های الکترونی امکان‌پذیر است. کلیه خواص ریزساختاری و مکانیکی این فولاد از طریق عملیات حرارتی این فولاد به دست می‌آید، به این دلیل که رسوبات ریز مس که در اثر انجام عملیات حل‌سازی در حالت جامد و سپس انجام عملیات پیرسازی تشکیل شده‌اند، عامل

استحکام بخشی این فولاد می‌باشند [۸]. این تحقیق به منظور بررسی تأثیر دماهای حل‌سازی و پیرسازی و نیز محیط خنک‌کننده روی خصوصیات ریزساختاری و سختی فولاد 17-4PH انجام شده است.

مواد و روش تحقیق

نمونه‌های مورد آزمایش از مجتمع فولاد اسفراین تهیه گردید. ضخامت نمونه‌ها ۱۵ mm بود که از میلگرد به قطر ۲۰mm بریده شده بودند. آنالیز شیمیایی فولاد در مجتمع فولاد اسفراین به وسیله‌ی دستگاه کوانتومتر تعیین گردید که در جدول ۱ آورده شده است.

عملیات حرارتی به این صورت انجام گردید که ابتدا عملیات حل‌سازی در دماهای 1055°C و 1065°C به مدت ۱ ساعت روی نمونه‌ها انجام شد. سپس نمونه‌ها در روغن یا آب سرد شدند. در نهایت عملیات پیرسازی به منظور تشکیل رسوبات مس در زمینه صورت گرفت [۹]. این عملیات در دماهای 550°C و 480°C به مدت زمان‌های ۱ و ۴ ساعت انجام شد. همچنین، یک عملیات پیرسازی دو مرحله‌ای در دو دمای 760°C به مدت ۲ ساعت و 620°C به مدت ۴ ساعت صورت گرفت.

برای مطالعه‌ی ریزساختار فولاد، اچ کردن نمونه‌ها با محلول ویللا و محلول ماربل انجام گردید [۱۰]. همچنین از روش الکترواچ برای تشخیص فاز فریت دلتا استفاده شد [۱۱]. سپس نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی SEM مدل LEO 1450 و نیز دستگاه سختی سنجی مورد مطالعه قرار گرفتند.

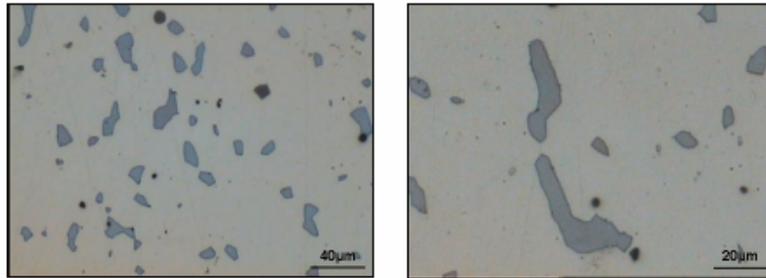
جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد 17-4PH مورد آزمایش.

C	Cr	Ni	Cu	Nb	Mo	V	Si	Mn	S	P	Fe
0.047	16.54	4.63	3.14	0.257	0.364	0.031	0.671	0.090	0.006	0.017	Bal.

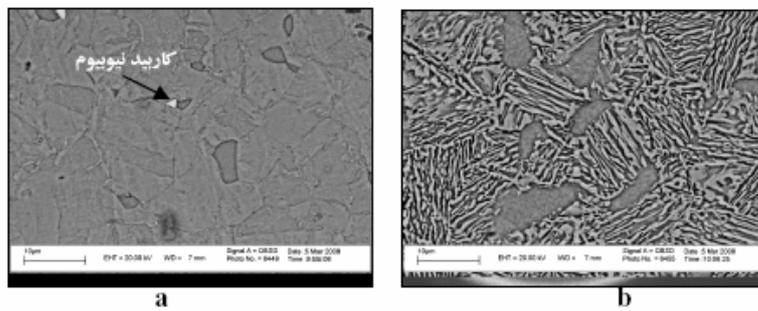
یافته‌ها

ساختار مارتزیتی خاص فولادهای زنگ‌نزن و فاز فریت دلتا با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱ تصاویر مربوط به نمونه‌های الکترواچ را نشان می‌دهد که فاز فریت دلتا در آن به خوبی مشاهده می‌شود. تأثیر دمای محلول‌سازی (1055°C و 1065°C) روی ریزساختار فولاد 17-4PH نیز مورد بررسی قرار گرفته است. زمان پیرسازی نیز روی ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد اثر می‌گذارد. شکل ۲ تصاویر حاصله از میکروسکوپ SEM مربوط به نمونه‌ی پیرسازی شده در 550°C به مدت زمان‌های ۱ و ۴ ساعت می‌باشد. شکل ۳ آنالیز EDS از نمونه‌ی پیرسازی شده در 550°C به مدت ۱ ساعت را نشان می‌دهد. شکل ۵ نیز تأثیر دمای پیرسازی را بر روی ریزساختار فولاد نشان می‌دهد.

تاثیر سیکل های عملیات حرارتی روی...

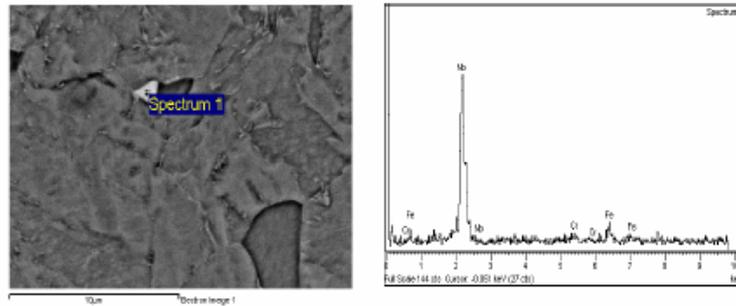


شکل ۱: حضور فاز فریت دلتا در نمونه‌ی عملیات محلول‌سازی شده در 1055°C و پیرسازی شده در 480°C .

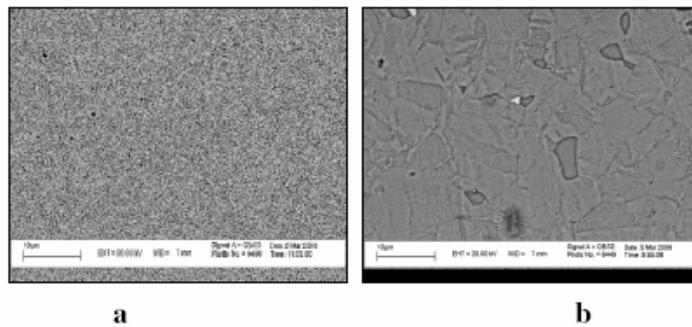


شکل ۲: تصاویر SEM از نمونه‌ی حل‌سازی شده در دمای 1055°C و پیرسازی شده در

550°C به مدت (a) ۱ ساعت و (b) ۴ ساعت.



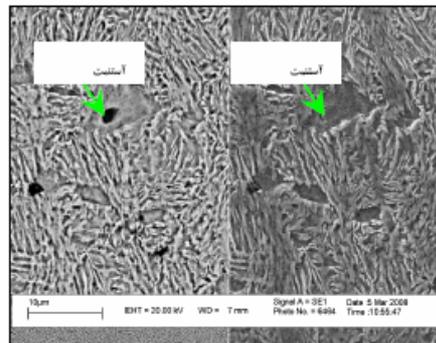
شکل ۳: آنالیز EDS از نمونه‌ی پیرسازی شده در 550°C به مدت ۱ ساعت.



شکل ۴: تصاویر SEM از نمونه‌ی پیرسازی شده

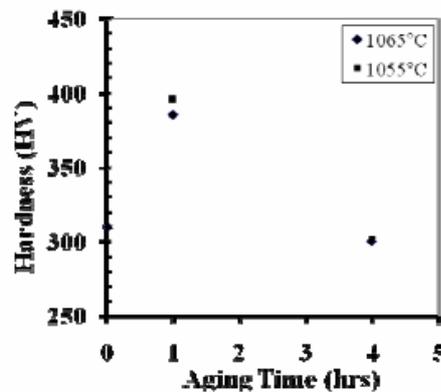
به مدت ۱ ساعت در (a) 480°C و (b) 550°C .

شکل ۵ تصاویر SEM مربوط به شرایط Over-aging می باشد. این تصاویر با دو آشکارساز پرتو الکترونیهای برگشتی و الکترونیهای ثانویه گرفته شده اند تا جزئیات ریزساختار بهتر مشخص شود.



شکل ۵: تصاویر SEM مربوط به شرایط Over-aging (760°C/2hr+620°C/4hr)

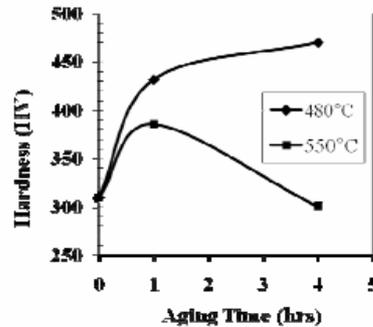
دمای حل سازی روی خواص مکانیکی از جمله سختی فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی تاثیر می گذارد. در شکل ۶ ملاحظه می شود سختی با افزایش دمای محلول سازی تغییر محسوسی نکرده است.



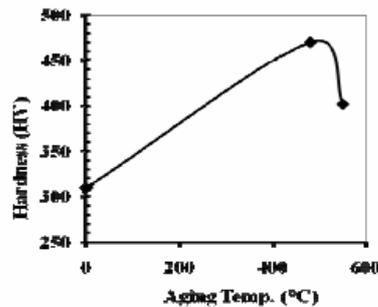
شکل ۶: تاثیر دمای حل سازی روی سختی در دماهای محلول سازی ۱۰۶۵°C و ۱۰۵۵°C. دمای پیرسازی ۵۵۰°C، محیط کوئینچ روغن.

تاثیر محیط کوئینچ نیز بر سختی فولاد 17-4PH بررسی شد. مشخص گردید که با کاهش سرعت سرد کردن، سختی فولاد افزایش می یابد. شکل ۷ تاثیر زمان پیرسازی بر سختی فولاد 17-4PH که در دماهای ۴۸۰°C و ۵۸۰°C پیرسازی شده اند را نشان می دهد. با افزایش زمان پیرسازی و درشت شدن رسوبات در دمای ۵۵۰°C سختی کاهش یافته است.

شکل ۸ نمودار سختی بر حسب دمای پیرسازی را برای این فولاد نشان می‌دهد. بیشترین میزان سختی مربوط به دمای 480°C می‌باشد.



شکل ۷: مقایسه نمودارهای سختی بر حسب زمان پیرسازی در دو دمای 480°C و 550°C .



شکل ۸: نمودار سختی بر حسب دمای پیرسازی در دمای محلول سازی 1055°C ، در مدت زمان ثابت ۴ ساعت، دماهای پیرسازی 480°C و 580°C ، محیط کوئینچ روغن.

بحث

فاز زمینه نشان داده شده در شکل ۱ مارتنزیت می‌باشد و فریت دلتا در این فاز به صورت پراکنده مشاهده می‌شود. چندین متغیر روی ریزساختار فولاد 17-4PH اثر می‌گذارد از جمله دمای محلول سازی. فاز فریت دلتا در هر دو دمای محلول سازی به خوبی مشاهده گردید. همچنین اختلاف چندانی بین ساختار در دو دمای مختلف محلول سازی دیده نشد.

با بررسی تأثیر سرعت سرد شدن روی ریزساختار فولاد 17-4PH، مشخص شد که فریت‌های دلتا در هر دو محیط کوئینچ روغن و آب به خوبی آشکار هستند ولی اندازه‌ی رسوبات در نمونه‌ی کوئینچ شده در روغن بیشتر می‌باشد، به این دلیل که سرعت سرد شدن در روغن مناسب‌تر است و فرصت برای رسوب‌دهی بیشتر می‌باشد. سرعت مناسب برای سرد شدن نمونه‌ها $10^{\circ}\text{C}/\text{s}$ می‌باشد که محیط روغن این

سرعت مناسب را تا حدی فراهم می کند و رسوبات در این محیط فرصت بیشتری برای تشکیل و رسیدن به اندازه و شکل بهینه‌ی خود پیدا می کنند.

همانطور که در شکل ۲ نشان داده است زمان پیرسازی روی ریزساختار فولاد زنگ‌نزن 17-4PH اثر می گذارد. فریت‌های دلتا در هر دو زمان ۱ و ۴ ساعت به خوبی مشاهده می شود ولی همانطور که دیده می شود با افزایش زمان پیرسازی رسوبات درشت تر شده اند. در تصویر ۲(a) فاز سفید رنگی اطراف برخی از فریت‌های دلتا مشاهده می شود که با توجه به آنالیزهای متعدد EDS که از این فازها گرفته شد و یکی از آنها در شکل ۳ آورده شده است، این فاز سفید رنگ کاربرد نیویوم می باشد که باعث افزایش سختی فولاد در این دما و مدت زمان پیرسازی گردیده است.

در شکل ۴ تاثیر دمای پیرسازی روی ریزساختار فولاد نشان داده شده است. حضور فریت‌های دلتا در آن تصاویر کاملاً مشخص است. مشاهده می شود که با افزایش دمای پیرسازی رسوبات ریز و پراکنده کمتر شده و رسوبات درشت تر و متمرکز تر شده اند.

همانطور که در تصاویر شکل ۵ دیده می شود رسوبات در اثر بیش از اندازه پیر شدن، درشت شده اند. در شکل ۵(a) درون فریت دلتا یک فاز تیره رنگ دیده می شود که شکل ۵(b) به خوبی نشان می دهد که منطقه‌ی تیره رنگ حفره نیست بلکه یک فاز است که با توجه به مطالعاتی که در این زمینه صورت گرفته به نظر می آید که این فاز آستنیت برگشتی باشد که جایگزین رسوبات مس شده است و یکی از دلایل کاهش سختی در این شرایط می باشد. رسوبات مس مکان مناسبی برای جوانه زنی و رشد آستنیت برگشتی می باشد، در واقع آستنیت برگشتی جایگزین رسوبات مس می شود به همین دلیل هم سختی در این مرحله خیلی کاهش می یابد و به مقداری کمتر از شرایط بعد از محلول سازی می رسد. همانطور که در تصاویر هم مشاهده می گردد رسوبات در این مرحله رشد کرده اند و رسوبات ریز به هم پیوسته اند و تشکیل رسوبات با اندازه های بزرگتر را داده اند. حتی شکل رسوبات هم تغییر کرده است و از حالت بیضوی به شکل کروی در آمده است. فریت‌های دلتا در این شرایط هم به خوبی قابل رؤیت هستند.

متغیرهای عملیات حرارتی با تاثیر گذاری روی ریزساختار موجب تغییر خواص مکانیکی از جمله سختی نیز می شوند. یکی از این متغیرها دمای حل سازی می باشد. گرچه همانطور که در شکل ۶ ملاحظه می گردد سختی با افزایش دمای محلول سازی تغییر محسوسی نکرده است فقط اندکی افزایش داشته که ناچیز می باشد.

نمونه هایی که در محیط روغن سرد شدند سختی بیشتری از نمونه هایی که در محیط آب کوئینچ شده اند دارند. علت این افزایش سختی را می توان به سرعت سرد شدن نسبت داد. از آنجایی که تشکیل رسوبات

علت افزایش سختی می باشد، هرچه سرعت سرد شدن کمتر باشد فرصت برای تشکیل رسوبات بیشتر است و رسوبات اندازه و شکل بهینه تری دارند و به همین دلیل هم سختی بیشتری خواهند داشت. سرعت مناسب برای سرد شدن نمونه ها 10°C است. محیط روغن این سرعت مناسب را فراهم می کند.

شکل 7 تأثیر زمان پیرسازی بر سختی فولاد 17-4PH که در دماهای 480°C و 580°C پیرسازی شده اند را نشان می دهد. ملاحظه می شود که سختی نمونه ی 4 ساعت پیرسازی شده حتی از نمونه ی فقط حل سازی شده هم کمتر گردیده است. علت این کاهش سختی به دلیل به هم پیوستن رسوبات ریز و همدوس و تشکیل رسوبات با اندازه درشت تر است. اما همانگونه که در شکل 7 مشاهده می شود با افزایش زمان پیرسازی در 480°C نه تنها سختی کاهش نیافت، بلکه اندکی هم افزایش یافته است. زیرا در 480°C رسوبات به اندازه بهینه ی خود در 4 ساعت می رسند و سختی افزایش می یابد.

دمای پیرسازی پارامتر بسیار مؤثر در میزان سختی فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی هست. به منظور مشاهده ی تأثیر دما، مدت زمان 4 ساعت برای دماهای 480°C - 550°C در نظر گرفته شد. افزایش دمای پیرسازی باعث کاهش سختی در فولاد 17-4PH گردید. می توان گفت با افزایش دمای پیرسازی، با انجام نفوذ و ملحق شدن رسوبات به یکدیگر، از تعداد رسوبات کاسته شده و اندازه ی آنها بزرگتر می شود و به همین دلیل هم سختی کاهش می یابد. از طرفی افزایش دمای پیرسازی باعث افزایش حلالیت مس در زمینه می گردد که به نوبه ی خود باعث کاهش تعداد و توزیع رسوبات در زمینه می شود.

در شرایط Over-aging که ابتدا نمونه در دمای 760°C به مدت 2 ساعت پیرسازی و سپس در دمای 620°C به مدت 4 ساعت قرار می گیرد کمترین میزان سختی ملاحظه گردید که $\text{HV}=308.5$ می باشد. همانطور که قبلاً توضیح داده شد علت افت سختی در این شرایط حضور فاز آستنیت برگشتی و کاهش رسوبات مس می باشد.

نتیجه گیری

فولاد 17-4PH دارای یک زمینه ی مارتنزیتی با حدود 10 درصد فریت دلتا است که در تمامی دماها و زمان ها فریت های دلتا ملاحظه گردید. تغییر دمای حل سازی تأثیر چشم گیری بر سختی و ریز ساختار فولاد ندارد و تقریباً سختی در دو دمای 1055°C و 1065°C یکسان می باشد.

محیط کوئینچ روغن به دلیل داشتن سرعت مناسب تر سرد شدن برای کوئینچ بهتر می باشد و سختی بیشتری در این محیط نسبت به آب به دست می آید. ریزساختار در این حالت رسوبات بیشتری را نشان می دهد.

با افزايش زمان و دمای پيرسازی سختی کاهش می يابد.

نتايج آناليز EDS نشان داد که رسوبات سفيد رنگ در اطراف فریت های دلتا کاربرد نیویم می باشد. بیشترین تاثیر عملیات پيرسازی در دمای 480°C می باشد. در این دما با افزايش زمان پيرسازی سختی کاهش نیافت.

در شرایط Over-aging درون فریت های دلتا فاز آستنیت برگشتی بوجود می آید، رسوبات مس مکان مناسبی برای جوانه زنی و رشد آستنیت برگشتی می باشد، در واقع آستنیت برگشتی جایگزین رسوبات مس می شود به همین دلیل هم سختی در این مرحله خیلی کاهش می يابد و به کمتر از شرایط بعد از محلول سازی می رسد.

مراجع

1. K. C. Antony, J. Metals, vol. 15, 1963, 922.
- 2- دکتر محمد علی گلعدار" اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها" ۱۳۷۸ دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان.
3. Lee Dillinger, "Revealing Delta Ferrite in Martensitic Stainless Steels", 2002, LECO Corporation
- 4- راهنمای کاربران عملیات حرارتی، مترجمین: بهناز ربیعی - راحله قنبری - افشین مقصودی.
- 5- حمیدرضا حبیبی "آنالیز رسوبات در یک فولاد زنگ نزن ماراجینگ از نوع SANDVIK IRK91" سمپوزیم فولاد ۷۸، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۸، ص ۲۲۳-۲۳۵.
6. C. N. Hsiao, C. S. Chiu, J. R. Yang, "Aging reactions in a 17-4PH stainless steel", Materials Chemistry and Physics 7, 2002, 134-142.
7. Jun Wang, Hong Zou, Cong Li, Shao-yu Qiu, Bao-Luo Shen "The effect of microstructural evolution on hardening behavior of type 17-4PH stainless steel in long-term aging at 350 °C long-term aging at 350°C", Materials Characterization, Vol. 57, Issues 4-5, 2006, 274-280.
8. M. Murayama, Y. Katayama and K. Hono "Microstructural evolution in a 17-4PH stainless steel after aging at 400°C" National Research Institute for Metal, April 21, 1998.
9. Metals handbook, Volume 4, Heat Treating, 2002.
10. William H. Cubberly, "Metals Handbook 9th Ed., vol. 4", 1981, ASM.
11. Metals Handbook, Metallographic Techniques and Microstructure, 2002.