



تأثیر فرایند نوردکاری سرد بر خواص مکانیکی، خوردگی و جهت‌گیری هیدرید در آلیاژ زیرکنیم- (۱٪) نیوبیم

مهدی دادفر*، مرتضی انصاری‌پور

شرکت سوره، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۹۵۷-۸۱۴۶۵، اصفهان - ایران

چکیده: تشکیل هیدریدهای با جهت‌گیری شعاعی، تأثیر مخربی بر خواص مکانیکی و خوردگی آلیاژ زیرکنیم حاوی (۱٪) نیوبیم دارد. از جمله عوامل تأثیرگذار بر تشکیل این گونه هیدریدها فرایند سردکاری است. در این مطالعه تأثیر دو دسته مراحل متفاوت نوردکاری سرد برای تولید غلاف سوخت از این جنبه مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای مختلف طراحی مراحل نوردکاری بررسی و در نهایت دو روش نوردکاری به صورت ۴ مرحله‌ای (روش جدید) و ۶ مرحله‌ای (روش متعارف پیشین) از نظر ریزساختار، خواص مکانیکی، خوردگی و جهت‌گیری هیدرید مقایسه شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که طراحی پاس جدید نوردکاری سرد منجر به همگنی بیش‌تر ریزساختار تبلور مجدد، کاهش اندازه‌ی دانه و افزایش هم‌زمان استحکام و انعطاف‌پذیری و کاهش نرخ خوردگی آلیاژ می‌شود.

کلیدواژه‌ها: آلیاژ زیرکنیم- (۱٪) نیوبیم، فرایند نوردکاری سرد، جهت‌گیری هیدرید

Effect of Cold Rolling Process on Mechanical, Corrosion and Hydride Orientation Properties in Zr-1%Nb Alloys

M. Dadfar*, M. Ansaripour

Sourh Co, AEOL, P.O.Box: 81465-1957, Isfahan - Iran

Abstract: A radially-oriented hydride (RH) has been known to deteriorate the final properties of fuel claddings. One of the most effective factors on formation of these hydrides is cold working process. In this work, we were concerned with two different rolling processes to find their effects on mechanical and corrosion properties, as well as, on the hydride orientation of the final tubes. The first process used was our conventional method with six different rolling passes and the other was just involved with four passes. All the microscopic, hydride orientation, mechanical and corrosion behaviors of two samples were examined. The experimental practices showed better results of newly designed cold working process in comparison with our conventional method.

Keywords: Zr-1%Nb Alloy, Cold Rolling Process, Hydride Orientation



۱. مقدمه

استفاده شده است. بدین منظور، شمش‌ها در دمای حدود ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، در محدوده‌ی پایداری تک فاز β (دی‌گرام فازی زیرکنیم و نیوبیم)، پیش‌گرم شده و سپس سریعاً در آب سرد شدند. شمش‌های بتا آب داده شده، پس از حرارت‌دهی در محدوده‌ی دمایی 780°C – 820°C روزن‌رانی شدند. پس از عملیات اسید شویی، شمش‌های روزن‌رانی شده به منظور حذف اثرات سخت‌گردانی کاری، در کوره‌ی خلاء تابکاری شدند و پس از آماده‌سازی سطح برای عملیات نورد کاری سرد، مورد استفاده قرار گرفتند. جدول ۱ ترکیب شیمیایی دو نمونه‌ی استفاده شده را نشان می‌دهد.

۲.۲ طراحی مراحل نورد کاری سرد

طراحی جدید مراحل نورد کاری لوله‌ها با توجه به شرایط دستگاه، کیفیت شمش از نظر سختی و استحکام و ضریب Q ، که تعیین‌کننده‌ی جهت‌گیری قطب‌های پایه‌ی زیرکنیم (صفحه‌های (۰۰۰۱) در شبکه‌ی شش‌گوشه‌ای) و به تبع آن جهت‌گیری هیدریدها است، انجام شد. عملیات نورد کاری سرد با دو دستگاه نورد سرد دو غلتکی پیلگر^(۳) و دستگاه نورد سه غلتکی LD۳۰ انجام شد. مقدار خوراک، چرخش و فشار هیدرولیک دستگاه برای کاهش متغیرها ثابت در نظر گرفته شد. پس از اعمال هر مرحله نورد، نمونه‌ها داخل کوره‌ی عملیات حرارتی تحت خلاء به مدت دو ساعت تحت عمل تابکاری قرار گرفتند. شکل‌های ۱ و ۲ میزان کاهش سطح مقطع و ضریب Q را، به ترتیب، برای دو روش ۶ و ۴ مرحله‌ای نورد کاری نشان می‌دهند.

جدول ۱. نتایج تجزیه‌ی طیف‌سنجی اتمی و پراش پرتو ایکس (XRF) نمونه‌های استفاده شده

نوع نمونه	Nb	Zr	O	Hf	Si	N
۴ مرحله‌ای (کد ۱)	۰٫۹۵	۹۸٫۸	۰٫۱۵	<۱۰۰ppm	<۷۵ppm	<۶۰ppm
۶ مرحله‌ای (کد ۲)	۰٫۹۸	۹۸٫۷	۰٫۱۶	<۱۰۰ppm	<۷۵ppm	<۶۰ppm

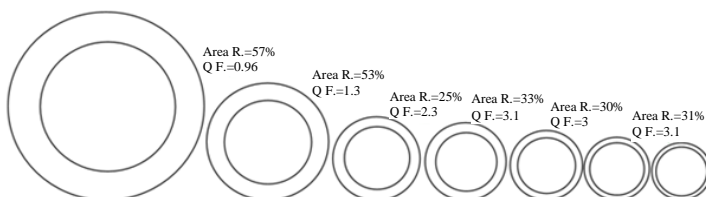
تأثیر هیدروژن بر خواص آلیاژهای زیرکنیم مورد استفاده به عنوان مؤلفه‌ی مجتمع سوخت هسته‌ای، یکی از عوامل مهمی است که کارآیی آلیاژها را به ویژه در سوختن‌های^(۱) بالاتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. با وجود انحلال‌پذیری محدود هیدروژن در زیرکنیم، با توجه به زمان سرویس طولانی آلیاژ در داخل رآکتور، مقدار قابل توجهی هیدروژن جذب و در نتیجه هیدریدهایی با ترکیب شیمیایی مختلف و مقادیر متنوع تشکیل می‌شود که بعضاً دارای جهت‌گیری‌های متفاوتی نیز هستند و اثرات متنوعی در خواص آلیاژ پدید می‌آورند. تُردی هیدروژنی در تغییرات ابعادی قطعه‌ها، به ویژه غلاف سوخت و شبکه‌ی نگه‌دارنده تأثیر دارد و شکل‌گیری هیدرید در لایه‌های سطحی با کاهش مقاومت آلیاژ در برابر خوردگی همراه است [۱].

جهت‌گیری هیدریدها تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر خواص نهایی آلیاژهای زیرکنیم دارد. این، می‌تواند عمر مفید لوله‌های سوخت را تا حد زیادی کاهش دهد. مشخص شده است که هیدریدهای با جهت‌گیری شعاعی (RH)، تأثیر مخربی بر کِش‌پذیری محیطی غلاف‌های سوخت دارند [۲، ۳، ۴]. در سال‌های اخیر هم‌چنین گزارش شده است که جهت‌گیری‌های شعاعی نقش مهمی در ترک‌دار شدن لوله‌های سوخت رآکتورهای آب جوشان (BWR) داشته است [۵، ۶]. شرایط شکل‌گیری جهت‌گیری شعاعی، عامل مهمی برای ارزیابی وضعیت لوله‌های سوخت است. به همین منظور دامنه‌ی وسیعی از مطالعات نظری و آزمایشگاهی، جهت‌گیری تنش‌ی هیدریدها را دربر گرفته است. این مطالعه‌ها تأثیر عامل‌هایی چون بافت، دما، استحکام، تنش، میزان هیدروژن، اندازه‌ی دانه، چرخه‌های حرارتی و سردکاری بر جهت‌گیری هیدریدها را نشان داده‌اند [۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴]. در این مطالعه سعی شده است اثر خاص فرایند سردکاری بر میزان جهت‌گیری هیدریدی و خواص خوردگی آلیاژ زیرکنیم (۱٪) نیوبیم مورد بررسی قرار گیرد.

۲. نحوه‌ی آزمایش

۱.۲ تهیه و آماده‌سازی نمونه

در این پژوهش از محصول‌های نوردکاری آلیاژ زیرکنیم (۱٪) نیوبیم به دست آمده از آلیاژسازی اسفنج زیرکنیم و ریخته‌گری در فرایند بازذوب در کوره‌ی قوسی تحت خلاء (VAR)^(۲)



شکل ۱. کاهش سطح مقطع‌ها و ضریب‌های Q در مراحل مختلف نورد کاری ۶ مرحله‌ای.

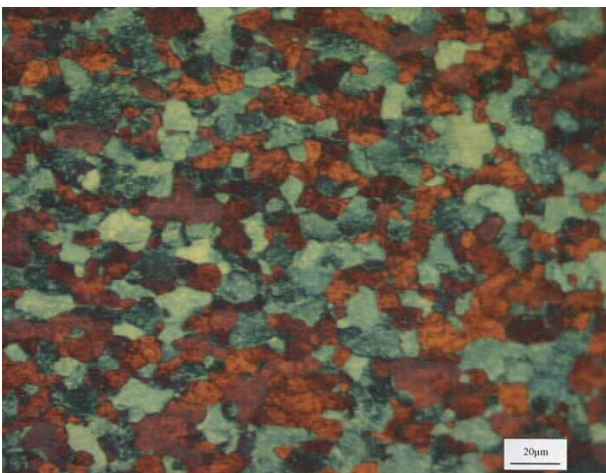
۵.۳.۲ آزمایش خوردگی و کسر هیدرید

برای مقایسه‌ی نتایج خوردگی، از آزمون اتوکلاو در شرایط 400°C با فشار بخار آب $10.5 \pm 0.1 \text{ MPa}$ و مقاومت الکتریکی 0.2 در $\text{pH}=7$ ، در مدت ۷۲ ساعت، استفاده شد. برای اندازه‌گیری کسر هیدرید، از استاندارد ASTM B۸۱۱-۰۳ استفاده شد؛ هیدریداسیون به روش گازی و اندازه‌گیری براساس شمارش هیدریدهای دارای زاویه‌ی بحرانی ۴۰ درجه (بین جهت هیدرید و جهت شعاعی لوله) و پایین‌تر انجام شد. مقاطع عرضی به وسیله‌ی میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند.

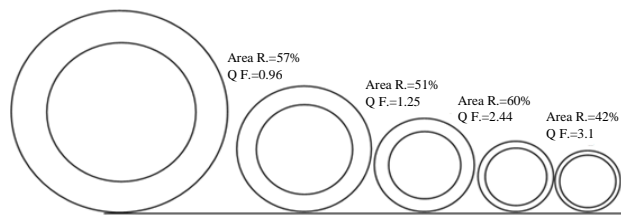
۳. نتایج و بحث

۱.۳ نتایج آزمون‌های فلزنگاری و اندازه‌ی دانه

شکل‌های ۳ و ۴ تأثیر عملیات نوردکاری ۴ و ۶ مرحله‌ای بر ریزساختار لوله‌ی نهایی شده بعد از عملیات تابکاری و تاب‌گیری را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ریزساختار نمونه‌ی چهار مرحله‌ای دارای دانه‌های ریزتر و کاملاً تبلور مجدد یافته بوده و کشیدگی ناشی از نوردکاری پیش از آن دانه‌ها به ندرت دیده می‌شود. نمونه‌ی ۶ مرحله‌ای که دارای میزان کاهش سطح مقطع کم‌تر و تابکاری بیش‌تر در طی فرایند تولید است، همان‌طور که انتظار می‌رفت، دارای ریزساختار درشت‌تر، کشیده‌تر و ناهمگون‌تری است. بررسی کمی ابعاد دانه‌ها در هر دو روش نشان داد که میانگین اندازه‌ی دانه‌ها در روش ۶ مرحله‌ای بزرگ‌تر از ۲۰ میکرون و در روش ۴ مرحله‌ای کم‌تر از این مقدار است.



شکل ۳. ریزنگار نمونه‌ی نوردکاری ۴ مرحله‌ای.



شکل ۲. کاهش سطح مقطع‌ها و ضریب Q در مراحل مختلف نوردکاری ۴ مرحله‌ای.

۳.۲ آزمون‌های انجام شده

۱.۳.۲ تعیین ترکیب شیمیایی

برای اطمینان از ترکیب شیمیایی محصول و بعد از ریختگی و عملیات همگن‌سازی، نمونه‌هایی به صورت توده و براده برای انجام تجزیه‌های شیمیایی تهیه شد. آزمون تعیین ترکیب شیمیایی محصول به صورت ترکیبی از روش‌های مختلف پلاسما جفت‌شده‌ی القایی (ICP)، فلورسانسی پرتو ایکس (XRF) و جذب اتمی (AA) بود.

۲.۳.۲ آزمون فلزنگاری و اندازه‌ی دانه

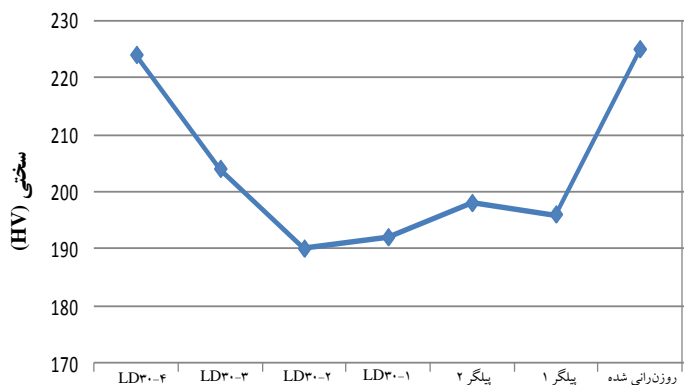
آماده‌سازی نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM E۳-۰۵ به روش الکتروپولیش و رنگ‌دهی حرارتی انجام شده، مقاطع عرضی نمونه، مورد بررسی قرار گرفت. آزمون اندازه‌ی دانه نیز به روش مقایسه‌ای و بر طبق استاندارد ASTM E۱۱۲-۰۴ به انجام رسید.

۳.۳.۲ آزمون سختی سنجی و کشش

سختی سنجی نمونه‌ها در مراحل مختلف نورد کاری، به روش ویکرز و با استاندارد مرجع ASTM E۹۲-۰۳ در مقاطع عرضی نمونه‌ها به انجام رسید. آزمون کشش نیز با دستگاه SANTAM ۱۵ TONS با نرخ کرنش 0.007 در دمای محیط و طبق استاندارد ASTM B۸۱۱-۰۲ انجام شد، برای اندازه‌گیری ابعادی از کولیس استفاده شد. پردازش داده‌ها نیز براساس استاندارد ASTM E۲۹-۰۲ انجام شد. برای اطمینان از نتایج، سه نمونه کشش در روش تهیه و استفاده شد.

۴.۳.۲ آزمون پراش پرتو ایکس

به منظور بررسی تأثیر سردکاری بر بافت، نمونه‌های پودر (بافت تصادفی) اسفنج زیرکینیم و توده‌ی (بافت مرجع) زیرکینیم آمیخته شده با نیویم، به وسیله‌ی پراش پرتو ایکس در زوایای ۱۰ تا ۹۰ درجه مورد تجزیه قرار گرفتند.



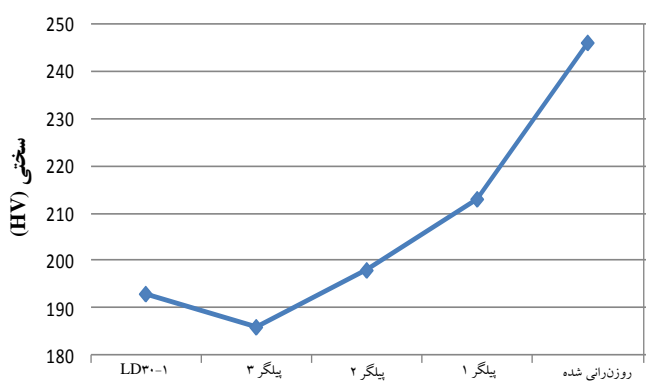
شکل ۵. نتایج آزمون سختی سنجی نمونه‌ی نورد کاری شش مرحله‌ای.



شکل ۴. ریزنگار نمونه‌ی نورد کاری ۶ مرحله‌ای.

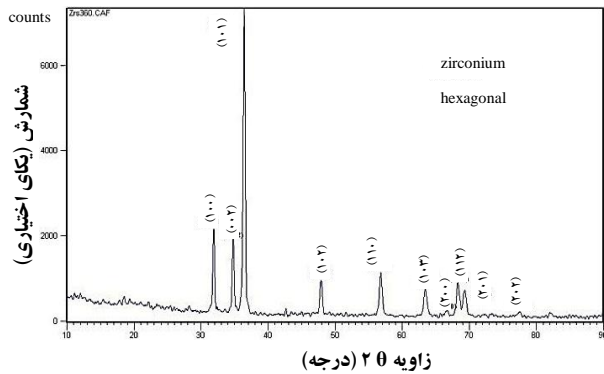
۲.۲ آزمون‌های سختی سنجی و کشش

به منظور شناخت و درک هر چه بهتر تأثیر نحوه‌ی عملیات نورد کاری سرد بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها، در هر مرحله بعد از عملیات تابکاری، سختی اندازه‌گیری شد. در شکل‌های ۵ و ۶ نتایج آزمون سختی از مرحله‌ی بعد از روزنرانی تا مرحله‌ی نهایی برای دو نمونه نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی نمونه‌های شش و چهار مرحله‌ای چندان تفاوتی در مراحل میانی نداشته و تنها نزول سختی و صعود مجدد آن در مراحل آخر نورد کاری قابل ملاحظه است. با توجه به کیفی بودن آزمون سختی نمی‌توان از شکل‌های ۴ و ۵ نتیجه‌ی قطعی گرفت؛ کاهش بیش‌تر سختی در نمونه‌های ۴ مرحله‌ای به دلیل میزان سرد کاری بیش‌تر را با توجه به میزان کاهش سطح مقطع‌های آن شاید بتوان به تبلور مجدد کامل و تشکیل دانه‌های عاری از تنش نسبت داد. لازم به ذکر است که در مراحل نورد کاری و تابکاری متعاقب آن در فرایند ساخت لوله، دو فرایند (۱) سخت‌گردانی - بازیابی و تبلور مجدد و (۲) رسوب‌گذاری ذرات غنی از نیوبیم سخت از ساختار فوق اشباع اولیه، در تقابل با یک‌دیگرند. از آنجایی که دمای تابکاری بعد از تمامی مراحل نورد کاری یکسان است، رفتار بازیابی یا تبلور مجدد شدیداً تحت تأثیر میزان سرد کاری اولیه قرار دارد. در یک دمای تابکاری یکسان، هر چه درصد سرد کاری بیش‌تر باشد تبلور مجدد به صورت یکنواخت‌تر انجام می‌شود. اما نباید فراموش کرد که با هر مرحله تابکاری اضافی، مطابق دیاگرام فازی دو تایی Zr-Nb، رسوب‌گذاری بیش‌تری از فاز غنی از نیوبیم اتفاق می‌افتد و این در ادامه بر روند کاهش سختی ناشی از اثرات بازیابی غلبه کرده، در مراحل انتهایی افزایش سختی محصول را به دنبال دارد.



شکل ۶. نتایج آزمون سختی سنجی نمونه‌ی نورد کاری چهار مرحله‌ای.

نتایج آزمون کشش لوله‌های غلاف نهایی برای این دو روش در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان داده شده میانگین نتایج سه آزمون در هر روش است. با مقایسه اعداد جدول ۲ می‌توان مشاهده کرد که، همان‌طور که انتظار می‌رفت تنش تسلیم و نهایی نمونه‌های نورد کاری ۴ مرحله‌ای بیش‌تر از نمونه‌های ۶ مرحله‌ای است. این موضوع را می‌توان به ریزساختار کوچک‌تر نمونه‌های ۴ مرحله‌ای و تداخل نابه‌جایی‌ها و قفل شدن آن‌ها نسبت داد. البته این در حالی است که اصولاً افزایش سختی و استحکام با کاهش کش‌پذیری (که در این جا درصد افزایش طول نمونه معیاری از آن است) همراه است؛ در صورتی که در نمونه‌ی ۴ مرحله‌ای این کاهش مشاهده نمی‌شود. این حاکی از آن است که ریزدانه کردن در این آلیاژ در عین افزایش سختی و استحکام با حفظ کش‌پذیری همراه بوده است. شایان ذکر است که مقادیر تنش تسلیم، تنش نهایی و ازدیاد طول در هر دو روش از مقادیر استاندارد آن‌ها برای استفاده در رآکتور بالاتر است.



شکل ۷. الگوی پراش نمونه‌ی اسفنج زیرکیم.

در شکل‌های ۸ و ۹ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ی نوردکاری، به ترتیب، ۶ و ۴ مرحله‌ای نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جهت‌گیری ترجیحی صفحه‌های (۰۰۰۱) با شدت حدود ۶۰۰۰ نسبت به حالت تصادفی کاملاً مشخص است. با این حال برخی قله‌ها مثل (۱۰۶۰) تضعیف و برخی دیگر مثل (۱۰۶۳)، (۱۱۶۲)، (۱۰۶۲) تا ۱۰ برابر تقویت شده‌اند. مقایسه‌ی دو نمونه با هم نشان می‌دهد که شدت قله‌ای صفحه‌های (۰۰۰۱) در هر دو نمونه کاملاً یکسان و تنها تفاوت چشم‌گیر در شدت صفحه‌های (۱۰۶۳) و (۱۱۶۲) است. این، نشان از بافت‌دار شدن شدید این آلیاژ مشابه دیگر آلیاژهای خانواده‌ی زیرکیم دارد. البته باید در نظر داشت این مقایسه به طور نیمه کمی بوده و هم‌چنین نمی‌تواند وضعیت بافت تقویت شده یا تضعیف شده را نسبت به جهت نورد نشان دهد. برای این کار نیاز است از تصویرهای قطبی استفاده شود که در کشور عملاً قابل انجام نیستند ولی در کل، نمایان‌گر جهت‌گیری ترجیحی این صفحه‌ها نسبت به حالت تصادفی هستند. به عبارت دیگر نمی‌توان نتیجه گرفت که افزایش شدت صفحه‌های (۰۰۰۱)، به معنی جهت‌گیری مناسب هیدریدها است و برای این امر نیاز به آزمون‌های تکمیلی مثل توزیع کسر جهت‌گیری هیدرید است. از این‌رو آزمون مذکور برای نمونه‌های نوردکاری ۶ و ۴ مرحله‌ای انجام شد که نتایج آن در شکل‌های، به ترتیب، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. در این شکل‌ها رشته‌های چند ده میکرونی هیدرید در سه لایه‌ی مختلف ضخامت به تصویر کشیده شده‌اند. آنچه از تصاویر مشخص است، این است که هیدریدها که عمدتاً با توجه به شرایط آزمون هیدریداسیون با ریخت‌شناسی δ ظاهر می‌شوند، در نمونه‌ی نوردکاری ۶ مرحله‌ای دارای نایکنواختی جهت‌گیری هستند که عمده‌ی این نایکنواختی در لایه‌ی خارجی به چشم می‌خورد. در این لایه بخش عمده‌ای از هیدریدها در راستای شعاعی لوله جهت‌گیری نموده‌اند که این

جدول ۲. نتایج آزمون کشش نمونه‌های نوردکاری چهار و شش مرحله‌ای

نمونه‌ی مورد بررسی	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	درصد ازدیاد طول	عدد اندازه‌ی دانه
نمونه‌ی ۱ (۴ مرحله نورد)	۳۹۴	۵۲۹	۳۲	۱۰
نمونه‌ی ۲ (۶ مرحله نورد)	۳۲۲	۴۸۳	۳۱	۹
حد کمیته‌ی مشخصه‌ی قابل قبول	۲۰۰	۲۷۰	۲۸	بزرگ‌تر از ۷

۳.۳ بررسی کسر هیدرید و رفتار خوردگی

پدیده‌ی خوردگی و کسر هیدرید سال‌ها مورد توجه کارشناسان هسته‌ای بوده است و هر از گاهی این موضوع به طور پراکنده مورد بررسی قرار گرفته است. برخی، مشکلات این بخش را به اعمال تنش‌های پلاستیک در مرحله‌ی صاف کردن نهایی لوله و برخی دیگر آن را به عدم تشکیل بافت مناسب یعنی، جهت‌گیری نامناسب صفحه‌های (۰۰۰۱)، که قایده‌ی منشور شبکه‌ی شش‌گوشه‌ای است، ارتباط داده‌اند. با مطالعه‌ی مقاله‌های مروری در این زمینه نیز می‌توان به نقش مهم‌تر این عامل‌ها نسبت به سایر عامل‌ها در ایجاد خوردگی و افزایش میزان کسر هیدریدی (مقدار پارامتر f_H) پی برد. صفحه‌های (۰۰۰۱) صفحه‌های پر دانسیته‌ی شبکه‌ی شش‌گوشه‌ای فشرده (hcp) هستند که در صورت تشکیل به موازات صفحه‌ی نوردکاری، خواص خوردگی و هیدریدی مناسبی از خود نشان می‌دهند. اما تشکیل چنین بافتی نیاز به کنترل دقیق شرایط از ریخته‌گری تا عملیات نهایی دارد.

برای درک تأثیر کاهش سطح مقطع‌های مختلف در عملیات نوردکاری سرد بر تشکیل بافت، نمونه‌ای از اسفنج زیرکیم ریزدانه که دارای بافت کاملاً تصادفی بود، با استفاده از پراش پرتو ایکس مورد تجزیه قرار گرفت؛ الگوی پراش در شکل ۷ آورده شده است. با توجه به پودری بودن نمونه، این شکل شاهده‌ی از یک بافت کاملاً تصادفی از صفحه‌های مختلف زیرکیم، و مطابق با قله‌های مندرج در کتاب هاناوال است. وجود قله‌ی بزرگ مربوط به صفحه‌ی (۱۰۶۱)، که در شکل ۷ به صورت (۱۰۱) نشان داده شده است، به دلیل کثرت این صفحه‌ها (۱۲ عدد از این خانواده) در شبکه‌ی شش‌گوشه‌ای فشرده نسبت به سایر صفحه‌ها است. همان‌طور که مشخص است، شدت صفحه‌های (۰۰۰۲) که معادل صفحه‌های (۰۰۰۱) ترجیحی برای رسوب‌گذاری هیدرید هستند، حدود ۲۰۰۰ است. صفحه‌های (۱۰۶۰) که در شکل با (۱۰۰) نشان داده شده‌اند، صفحه‌های جانبی شش‌گوشه‌ای هستند که در هر شبکه‌ی واحد، ۶ عدد از آن‌ها وجود دارد. لذا همان‌طور که انتظار می‌رود، بعد از صفحه‌های (۱۰۶۰) این صفحه‌ها دارای بیش‌ترین شدت هستند.

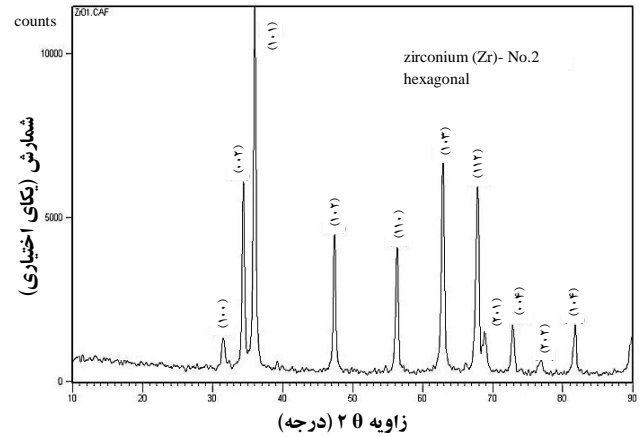


وضعیت جزء جهت گیری های شدیداً نامطلوب هیدرید در غلاف سوخت است. این در حالی است که با توجه به شکل ۱۱ این جهت گیری برای نمونه ی نورد کاری ۴ مرحله ای، مطلوب و مطابق با دیگر سطوح ضخامتی است.

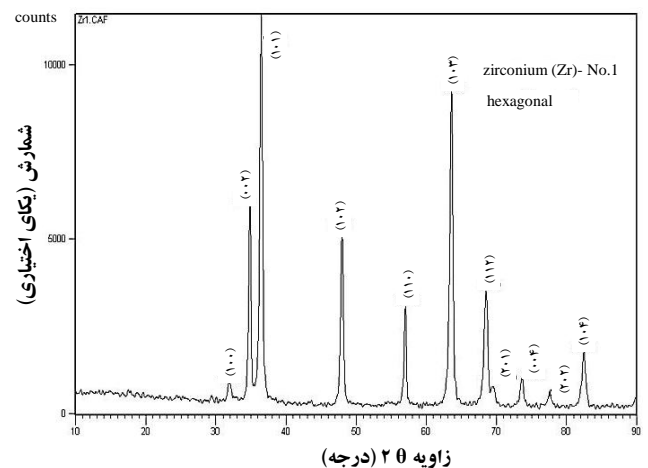


شکل ۱۱. جهت گیری هیدرید در قسمت های مختلف نمونه ی نورد کاری ۴ مرحله ای ($\times 100$).

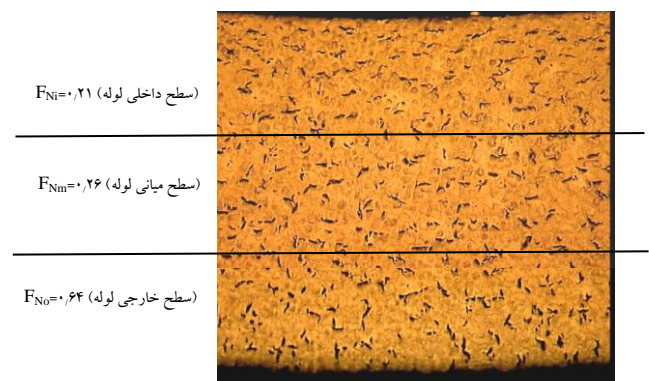
برای بررسی جذب H، اصولاً آزمون های خوردگی خارج از رآکتور مورد استفاده قرار می گیرد. کسر هیدروژن جذب شده در طی فرایند خوردگی، براساس بازه ی زمانی فرایند خوردگی تا حدودی متفاوت است بدین صورت که هر چه میزان خوردگی بیش تر باشد، میزان جذب هیدروژن نیز بیش تر خواهد بود. لذا بررسی رفتار خوردگی اهمیت زیادی دارد. بررسی های خوردگی انجام شده در این پژوهش نشان می دهند که نمونه های نورد کاری ۴ مرحله ای دارای رفتار خوردگی یکنواخت بهتری نسبت به نمونه های نورد کاری ۶ مرحله ای هستند. وجود رگه ها و لکه های سفید رنگ ZrO_2 با ساختار چهار گوشه ای روی سطح نمونه ی نورد کاری ۶ مرحله ای با میانگین نرخ خوردگی 2.70 g/m^2 در مقایسه با نمونه های نورد کاری ۴ مرحله ای با نرخ خوردگی 1.60 g/m^2 مؤید این مطلب است که با وجود ریزدانه ای بودن ریزساختار نمونه های نورد کاری ۴ مرحله ای، رفتار خوردگی بهتری به دست آمده است. لازم به ذکر است که علاوه بر اندازه ی دانه، عامل های متعدد دیگری نیز وجود دارند که در زمینه ی خواص خوردگی آلیاژهای زیرکینم مؤثرند؛ از آن جمله می توان به ریخت شناسی و نوع رسوب های ثانویه، میزان بازیابی یا تبلور مجدد ساختار و وجود تنش در ریزساختار اشاره نمود. از آنجایی که در شیوه ی ۴ مرحله ای، تعداد عملیات تابکاری از ۷ مرحله به ۵ مرحله کاهش یافته است و کاهش اندازه ی دانه ها چه در طی نورد کاری های سنگین تر و چه پس از تابکاری، مسیرهای نفوذ کوتاه تری را فراهم ساخته است، در مقایسه با ریزساختار نمونه ی نورد کاری ۶ مرحله ای می توان توزیع و اندازه ی متفاوت تری از رسوب های فاز دوم، که عمدتاً رسوب های غنی از نیویم هستند، انتظار داشت. البته در این پژوهش با توجه به عدم دسترسی به امکانات لازم، بررسی رسوب ها برای اثبات این فرض میسر نشد.



شکل ۸. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه ی نهایی نورد کاری ۶ مرحله ای.



شکل ۹. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه ی نهایی نورد کاری ۴ مرحله ای.



شکل ۱۰. جهت گیری هیدرید در قسمت های مختلف نمونه ی نورد کاری ۶ مرحله ای ($\times 100$).

**پی‌نوشت‌ها**

۱. Higher Burnup
۲. Vacuum Arc Remelt
۳. Pilger

مرجع‌ها

1. B. Cox, P. Rudling, Hydriding mechanisms and impact on fuel performance, Advanced Nuclear Technology, Uppsala Science Park, SWEDEN.
2. M. R. Louthan, R. P. Marshall, Control of hydride orientation in Zircaloy, J. Nuclear Material, 9 (1963) 170-184.
3. S. K. Yagnik, R-CKuo, Y. R. Rashid, A. J. Machiels, R. L. Yang, Effect of hydrides on the mechanical properties of Zircaloy-4, Proc. 2004 Int. Meeting on LWR Fuel Performance, Orland, Florida, Sept. 19-22, 2004, 1089, (2004) 191-199.
4. J. Bai, C. Prioul, D. Francois, Hydride embrittlement in Zircaloy-plate: part 1. Influence of microstructure on the hydride embrittlement in Zircaloy-4 at 20C and 350C, Metall. Trans. A, 25A (1994) 1185-1197.
5. S. Shimada, E. Etoh, H. Hayashi, Y. Tukuta, A metallographic and fractographic study of outside-in cracking caused by power ramp tests, J. Nuclear Material, 327 (2004) 97-113.
6. F. Nagase, T. Fuketa, Influence of hydride re-orientation on BWR cladding rupture under accidental conditions, J. Nuclear Science Tech., 41 [12] (2004) 1211-1217.
7. D. Hardie, M. W. Shanahan, Stress reorientation of hydrides in zirconium-2.5% niobium, J. Nuclear Material, 55 (1975) 1-13.
8. G. W. Parry, Stress reorientation of hydrides in cold-worked Zirconium-2.5% Niobium pressure tubes, AECL-2624, 1 (1996).
9. R. P. Marshall, Influence of fabrication history on stress-oriented hydrides in Zircaloy tubing, J. Nuclear Material, 24 (1967) 34-48.
10. J. J. Kearns, C. R. Woods, Effect of texture, grain size, and cold work on the precipitation of oriented hydrides in Zircaloy tubing and plate, J. Nuclear Material, 20 (1966) 241-261.

رادلین و همکاران در سال ۱۹۹۹، در بحث توزیع اندازه‌ی رسوب‌های فاز ثانویه و اثر آن بر میزان خوردگی و هیدریداسیون، وجود چگالی بالاتر ذرات فاز ثانویه با اندازه‌ی متوسط (در مقایسه با ذرات ریزتر یا به مراتب درشت‌تر) را مطلوب‌تر گزارش کردند [۱۵]. البته این موضوع نیاز به بررسی‌های بیش‌تر دارد.

۴. نتیجه‌گیری

- طراحی فرایند نوردکاری می‌تواند به طور مشخص بر خواص ریزساختاری، مکانیکی، خوردگی و هیدریداسیون غلاف‌های سوخت زیرکنیم (۱٪) نیویم تأثیر گذار باشد.
- کاهش تعداد مراحل نوردکاری از طریق افزایش میزان کاهش سطح مقطع‌ها می‌تواند به نحو مطلوبی بر جهت‌گیری هیدرید و خواص خوردگی تأثیر گذار باشد در عین این که کاهش اندازه‌ی دانه را نیز به همراه دارد.
- با توجه به نتایج پراش پرتو ایکس نمونه‌های آلیاژ زیرکنیم (۱٪) نیویم و از مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج نمونه‌های با بافت تصادفی، مشخص شد که این آلیاژ در طی نوردکاری، شدیداً بافت‌دار شده و صفحه‌های (۰۰۰۱)، (۱۰۲۳) یا (۱۱۲۲) و (۱۰۲۲) نسبت به حالت تصادفی کاملاً تقویت شده‌اند.
- تغییر طراحی مراحل نورد توانست به میزان مطلوبی وضعیت جهت‌گیری هیدریدها در لایه‌ی خارجی ضخامت لوله را اصلاح نماید.
- به نظر می‌رسد با وجود ریزدانه‌ای شدن نمونه‌های نوردکاری ۴ مرحله‌ای، خواص خوردگی بهبود یافته است که می‌توان آن را به دیگر عوامل اصلاح‌کننده‌ی خواص خوردگی نظیر ریخت‌شناسی و نوع رسوب‌های ثانویه، میزان بازیابی یا تبلور مجدد ساختار و میزان تنش در ریزساختار در طی تغییر مراحل نوردکاری ربط داد.

تشکر و قدردانی

در پایان بر خود لازم می‌دانیم از مدیریت محترم عامل شرکت سوره، ریاست مجتمع، معاونت و مدیریت بهره‌برداری و هم‌چنین تمامی پرسنل کارگاه نورد سرد که ما را در رسیدن به اهداف این پژوهش یاری رسانده‌اند تشکر کنیم. هم‌چنین از واحدهای آزمایشگاهی درگیر در این کار پژوهشی، صمیمانه قدردانی می‌کنیم.



- 11.M. Leger, A. Donner, The effect of stress on orientation of hydrides in zirconium alloy pressure tube materials, *Can. Metall. Q.*, 24[3] (1985) 235–243.
- 12.J. B. Bai, C. Prioul, D. Francois, Effect of microstructure factors and cold work on the hydride precipitation in Zircaloy-4 sheet, *J. Adv. Science*, 3[4] (1991) 188.
- 13.Y. Mishima, T. Okubo, Effect of thermal cycling on the stress orientation and circumferential ductility in Zircaloy-2, *Can. Metall. Q.*, 11[1] (1972) 157–164.
- 14.R. P. Marshall, Control of hydride orientation in Zircaloy by fabrication practice, *J. Nuclear Material*, 24 (1967) 49–59.
- 15.P. Rudling and G. Wikmark, A unified model of Zircaloy BWR corrosion and hydriding mechanisms, *J. Nuclear Material*, 265 (1999) 44-59.