

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

مهدی دادفر*، مرتضی انصاری پور شرکت سوره، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۹۵۲-م۱٤۲۵، اصفهان ـ ایران

چکیده: تشکیل هیدریدهای با جهت گیری 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 جهت گیری هیدرید مقایسه شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که طراحی پاس جدید نوردکاری سرد منجر به همگنی بیش تر ریزساختار تبلور مجدد، کاهش اندازهی دانه و افزایش همزمان استحکام و انعطاف پذیری و کاهش نرخ خوردگی آلیاژ میشود.

کلیدواژه ها: آلیاژ زیرکنیم – (٪۱) نیوبیم، فرایند نورد کاری سرد، جهت گیری هیدرید

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

M. Dadfar*, M. Ansaripour Soureh Co, AEOI, 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

*email: mdadfar2001@gmail.com

۱. مقدمه

تأثیر هیدروژن بر خواص آلیاژهای زیرکنیم مورد استفاده به عنوان مؤلفه یمجتمع سوخت هسته ای، یکی از عامل های مهمی است که کارآیی آلیاژها را به ویژه در سوختن های^(۱) بالاتر تحت تأثیر قرار می دهد. با وجود انحلال پذیری 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 می شود که بعضاً دارای جهت گیری های متفاوتی نیز هستند و اثرات متنوعی در خواص آلیاژ پدید می آورند. تُردی هیدروژنی در تغییرات ابعادی قطعه ها، به ویژه غلاف سوخت و شبکهی نگهدارنده تأثیر دارد و شکل گیری هیدرید در لایه های سطحی با کاهش مقاومت آلیاژ در برابر خوردگی همراه است [۱].

جهت گیری هیدریدها تأثیر تعیین کنندهای بر خواص نهایی آلیاژهای زیرکنیم دارد. این، می تواند عمر مفید لولههای سوخت را تا حد زیادی کاهش دهد. مشخص شده است که هیدریدهای با جهت گیری شعاعی (RH)، تأثیر مخربی بر کِش پذیری محیطی غلاف های سوخت دارند [۲، ۳، ۴]. در سال های اخیر همچنین گزارش شده است که جهتگیریهای شعاعی نقش مهمی در تركدار شدن لولههاى سوخت رآكتورهاى آب جوشان (BWR) داشته است [۵، ۶]. شرایط شکل گیری جهت گیری شعاعی، عامل مهمی برای ارزیابی وضعیت لولههای سوخت است. به همین منظور دامنهی وسیعی از مطالعات نظری و آزمایشگاهی، جهت گیری تنشی هیدریدها را دربر گرفته است. اين مطالعهها تأثير عامل هايي چون بافت، دما، استحكام، تنش، میزان هیدروژن، اندازهی دانه، چرخههای حرارتی و سردکاری بر جهت گیری هیدریدها را نشان دادهاند [۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴]. در این مطالعه سعی شده است اثر خاص فرایند سردکاری بر میزان جهت گیری هیدریدی و خواص خوردگی آلیاژ زیرکنیم – (٪۱) نیوبیم مورد بررسی قرار گیرد.

۲. نحوه ی آزمایش ۲. تهیه و آماده سازی نمونه در این پژوهش از محصول های نورد کاری آلیاژ زیرکنیم - (۱٪) نیوبیم به دست آمده از آلیاژ سازی اسفنج زیرکنیم و ریخته گری در فرایند بازذوب در کوره یقوسی تحت خلاء (VAR)

استفاده شده است. بدین منظور، شمش ها در دمای حدود ۱۱۰۰ درجهی سانتی گراد، در محدودهی پایداری تک فاز β (دیاگرام فازی زیرکنیم و نیوبیم)، پیش گرم شده و سپس سریعاً در آب سرد شدند. شمش های بتا آب داده شده، پس از حرارتدهی در محدودهی دمایی ۷۸۰-2° ۸۲۰ روزنرانی شدند. پس از عملیات اسید شویی، شمش های روزنرانی شده به منظور حذف اثرات سخت گردانی کاری، در کورهی خلاء تابکاری شدند و پس از آماده سازی سطح برای عملیات نوردکاری سرد، مورد استفاده قرار گرفتند. جدول ۱ ترکیب شیمیایی دو نمونهی استفاده شده را نشان می دهد.

۲.۲ طراحی مراحل نوردکاری سرد

طراحی جدید مراحل نوردکاری لوله ها با توجه به شرایط دستگاه، کیفیت شمش از نظر سختی و استحکام و ضریب Q، که تعیین کننده ی جهت گیری قطب های پایه ی زیرکنیم (صفحه های (۰۰۰۱) در شبکه ی شش گوشه ای) و به تبع آن جهت گیری هیدریدها است، انجام شد. عملیات نوردکاری سرد با دو دستگاه نورد سرد دو غلتکی پیلگر^(۳) و دستگاه نورد سه غلتکی ۰۳DL انجام شد. مقدار خوراک، چرخش و فشار هیدرولیک دستگاه برای کاهش متغیرها ثابت در نظر گرفته شد. پس از اعمال هر مرحله نورد، نمونه ها داخل کوره ی عملیات حرارتی تحت خلاء به مدت دو ساعت تحت عمل تابکاری قرار گرفتند. شکل های ۱ و ۲ میزان کاهش سطح مقطع و ضریب Q را، به ترتیب، برای دو روش ۶ و ۴ مرحله ای نوردکاری نشان میدهند.

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

Ν	Si	Hf	0	Nb	Zr	نوع نمونه
< % •ppm	<vsppm< td=""><td><\ppm</td><td>۰,۱۵</td><td>۰,۹۵</td><td>٩٨٫٨</td><td>۴ مرحلهای (کد ۱)</td></vsppm<>	<\ppm	۰,۱۵	۰,۹۵	٩٨٫٨	۴ مرحلهای (کد ۱)
<9∙ppm	<våppm< td=""><td><\ppm</td><td>•,19</td><td>• ٫۹۸</td><td>٩٨٫٧</td><td>۶ مرحلهای (کد ۲)</td></våppm<>	<\ppm	•,19	• ٫۹۸	٩٨٫٧	۶ مرحلهای (کد ۲)



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



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

۳.۲ آزمونهای انجام شده

۱۳۰۲ تعیین ترکیب شیمیایی برای اطمینان از ترکیب شیمیایی محصول و بعد از ریختگی و عملیات همگن سازی، نمونه هایی به صورت توده و براده برای انجام تجزیه های شیمیایی تهیه شد. آزمون تعیین ترکیب شیمیایی محصول به صورت ترکیبی از روش های مختلف پلاسمای جفت شده ی القایی (ICP)، فلوئور سانسی 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 سختیسنجی و کشش

سختی سنجی نمونه ها در مراحل مختلف نورد کاری، به روش ویکرز و با استاندارد مرجع ASTM E۹۲-۰۳ در مقاطع عرضی نمونه ها به انجام رسید. آزمون کشش نیز با دستگاه SANTAM ۱۵ TONS با نرخ کرنش ۰۰۰۷ در دمای محیط و طبق استاندارد SANTAM ۱۵ مد، برای اندازه گیری ابعادی از کولیس استفاده شد. پردازش داده ها نیز براساس استاندارد ASTM E۲۹-۱۰۲ انجام شد. برای اطمینان از نتایج، سه نمونه کشش در روش تهیه و استفاده شد.

٤.٣.٢ آزمون پراش پرتو ايکس

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

٥.٣.٢ آزمایش خوردگی و کسر هیدرید

برای مقایسه ینتایج خوردگی، از آزمون اتوکلاو در شرایط ۲۰۰°C با فشار بخار آب ۱۰/۵±۰/۱MPa و مقاومت الکتریکی ۲۰ در ۲۵=PH، در مدت ۷۲ ساعت، استفاده شد. برای اندازه گیری کسر هیدرید، از استاندارد ۲۳–۸۸ ASTM ASTM ستفاده شد؛ هیدریداسیون به روش گازی و اندازه گیری براساس شمارش هیدریدهای دارای زاویه ی بحرانی ۴۰ درجه (بین جهت هیدرید و جهت شعاعی لوله) و پایین تر انجام شد. مقاطع عرضی به وسیله یمیکروسکوپ 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 تاب گیری را نشان میدهند. همان طور که مشاهده می شود، ریزساختار نمونهی چهار مرحلهای دارای دانههای ریز تر و کاملاً تبلور مجدد یافته بوده و کشیدگی ناشی از نوردکاری پیش از آن دانهها به ندرت دیده می شود. نمونهی ۶ مرحلهای که دارای میزاًن کاهش سطح مقطع کم تر و تابکاری بیش تر در طی فرایند تولید است، همان طور که انتظار می رفت، دارای ریزساختار درشت تر، کشیده تر و ناهمگون تری است. بررسی کمّی ابعاد دانهها در هر دو روش نشان داد که میانگین اندازه یدانه ها در روش ۶ مرحلهای بزر گذیر از ۲۰ میکرون و در روش ۴ مرحلهای کم تر از این مقدار است.



شکل ۳. ریزنگار نمونهی نورد کاری ۴ مرحلهای.



شکل ٤. ریزنگار نمونهی نوردکاری ۶ مرحلهای.

۲.۳ آزمونهای سختی سنجی و کشش

به منظور شناخت و درک هر چه بهتر تأثیر نحوهی عملیات نوردکاری سرد بر رفتار مکانیکی نمونهها، در هر مرحله بعد از عملیات تابکاری، سختی اندازه گیری 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 می شود، سختی نمونه های شش و چهار مرحله ای چندان تفاوتي در مراحل میاني نداشته و تنها نزول سختي و صعود مجدد آن در مراحل آخر نوردکاری قابل ملاحظه است. با توجه به کیفی بودن آزمون سختی نمیتوان از شکلهای ۴ و ۵ نتیجهی قطعی گرفت؛ کاهش بیش تر سختی در نمونههای ۴ مرحلهای به دلیل میزان سردکاری 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 نوردکاری و تابکاری متعاقب آن در فرایند ساخت لوله، دو فرایند ۱) سخت گردانی– بازیابی و تبلور مجدد و ۲) رسوب گذاری ذرات غنى از نيوبيم سخت از ساختار فوق اشباع اوليه، در تقابل با یکدیگرند. از آنجایی که دمای تابکاری بعد از تمامی مراحل نوردكاري يكسان است، رفتار بازيابي يا تبلور مجدد شديداً تحت تأثیر میزان سردکاری اولیه قرار دارد. در یک دمای تابکاری یکسان، هر چه درصد سردکاری بیشتر باشد تبلور مجدد به صورت یکنواخت تر انجام می شود. اما نباید فراموش کرد که با هر مرحله تابكاري اضافي، مطابق دياگرام فازي دوتايي Zr-Nb، رسوب گذاری بیش تری 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.





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 می توان مشاهده کرد که، همان طور که انتظار می رفت تنش تسلیم و نهایی نمونه های نورد کاری ۴ مرحله ای بیش تر از نمونه های ۶ مرحله ای است. این موضوع را می توان به ریز ساختار کوچک تر نمونه های ۴ مرحله ای و تداخل نابه جایی ها و قفل شدن آن ها نسبت داد. البته این در حالی است که اصولاً افزایش سختی و استحکام با کاهش کِش پذیری (که است؛ در صورتی که در نمونه معیاری از آن است) همراه نمی شود. این حاکی از آن است که ریزدانه کردن در این آلیاژ نمی شود. این حاکی از آن است که ریزدانه کردن در این آلیاژ است. شایان ذکر است که مقادیر تنش تسلیم، تنش نهایی و ازدیاد طول در هر دو روش از مقادیر استاندارد آن ها برای استفاده در رآکتور بالاتر است.



شکل ۷. الگوی پراش نمونهی اسفنج زیر کنیم.

در شکلهای ۸ و ۹ الگوی پراش پرتو ایکس نمونهی نوردکاری، به ترتیب، ۶ و ۴ مرحلهای نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، جهت گیری ترجیحی صفحه های (۰۰۰۱) با شدت حدود ۶۰۰۰ نسبت به حالت تصادفی کاملاً مشخص است. با این حال برخی قلهها مثل (۱۰ آ ۱۰) تضعیف و برخی دیگر مثل (۱۰ آ۲۰)، (۲۱ آ۱۱)، (۱۰ آ۱۰) 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 چشم گیر در شدت صفحه های (۱۰ آ ۱۰) و (۱۱ T۲) است. این، نشان از بافتدار شدن شدید این آلیاژ مشابه دیگر آلیاژهای خانوادهی زیرکنیم دارد. البته باید در نظر داشت این مقايسه به طور نيمه كمّى بوده و همچنين نمى تواند وضعيت 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، نمایان گر جهت گیری ترجيحي اين صفحه ها نسبت به حالت تصادفي هستند. به عبارت دیگر نمیتوان نتیجه گرفت که افزایش شدت صفحههای (۰۰۰۱)، به معنی جهت گیری مناسب هیدریدها است و برای این امر نیاز به آزمونهای تکمیلی مثل توزیع کسر جهت گیری هیدرید است. از اینرو آزمون مذکور برای نمونههای نوردکاری ۶ و ۴ مرحلهای انجام شد که نتایج آن در شکل های، به ترتیب، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. در این شکل ها رشته های 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 ریخت شناسی δ ظاهر میشوند، در نمونهی نوردکاری ۶ مرحلهای دارای نایکنواختی جهت گیری هستند که عمدهی این نایکنواختی در لايهي خارجي به چشم ميخورد. در اين لايه بخش عمدهاي از هیدریدها در راستای شعاعی لوله جهت گیری نمودهاند که این

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

عدد اندازهی دانه	درصد ازدیاد طول	تنش نھایی (MPa)	تنش تسليم (MPa)	نمونهي مورد بررسي	
۱.	٣٢	579	894	نمونهی ۱ (۴ مرحله نورد)	
٩	۳۱	۴۸۳	****	نمونهی ۲ (۶ مرحله نورد)	
بزرگتر از ۷	۲۸	۲۷.	۲	حد کمینهی مشخصهی قابل قبول	

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، جهت گیری نامناسب صفحههای ((۰۰۰)، که قایدهی منشور شبکهی شش گوشهای است، ارتباط دادهاند. با مطالعه ی مقالههای مروری در این زمینه نیز می توان به نقش مهم تر این عامل ها نسبت به سایر مامل ها در ایجاد خوردگی و افزایش میزان کسر هیدریدی (مقدار پارامتر fn) پی برد. صفحههای (۱۰۰۰) صفحههای پر مورت تشکیل به موازات صفحهی نوردکاری، خواص خوردگی و هیدریدی مناسبی از خود نشان میدهند. اما تشکیل چنین بافتی نیاز به کنترل دقیق شرایط از ریخته گری تا عملیات

برای درک تأثیر کاهش سطح مقطعهای مختلف در عملیات نوردکاری سرد بر تشکیل بافت، نمونهای از اسفنج زیرکنیم 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 شاهدی از یک بافت کاملاً تصادفی از صفحههای مختلف زیرکنیم، و مطابق با قلههای مندرج در کتاب هاناوالت است. وجود قلهی بزرگ مربوط به صفحهی (۱ آ ۱۰)، که در شکل ۷ به صورت (۱۰۱) نشان داده شده است، به دلیل کثرت این صفحهها (۱۲ عدد از این خانواده) در شبکهی شش گوشهای فشرده نسبت به سایر صفحهها است. همان طور که مشخص است، شدت صفحه های (۰۰۰۲) که معادل صفحه های (۰۰۰۱) ترجیحی برای رسوب گذاری هیدرید هستند، حدود ۲۰۰۰ است. صفحههای (۱۰ آ ۰۰) که در شکل با (۱۰۰) نشان داده شدهاند، صفحههای جانبی شش گوشهای هستند که در هر شبکهی واحد، ۶ عدد از آنها وجود دارد. لذا همان طور که انتظار میرود، بعد از صفحههای (۱۰ - ۱۰) این صفحه ها دارای بیش ترین 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 نمونهی نوردکاری ۴ مرحلهای، مطلوب و مطابق با دیگر سطوح ضخامتی است.





شکل ۱۰. جهت گیری هیدرید در قسمت های مختلف نمونهی نوردکاری ۴ مر حلهای (۱۰۰×).



شکل 11. جهت گیری هیدرید در قسمتهای مختلف نمونهی نوردکاری ۴ مر حلهای (۱۰۰×).

برای بررسی جذب H، اصولاً آزمونهای خوردگی خارج از رآکتور مورد استفاده قرار می گیرد. کسر هیدروژن جذب شده در طی فرایند خوردگی، براساس بازهی 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 میدهند که نمونههای نوردکاری ۴ مرحلهای دارای رفتار خوردگی یکنواخت بهتری نسبت به نمونههای نوردکاری ۶ مرحلهای هستند. وجود رگهها و لکههای سفید رنگ ZrO_r با ساختار چهارگوشهای روی سطح نمونهی نوردکاری ۶ مرحلهای با میانگین نرخ خوردگی ۲٫۷۰ g/m در مقایسه با نمونههای نوردکاری ۴ مرحلهای با نرخ خوردگی ۱/۶۰ g/m¹ مؤید این مطلب است که با وجود ریزدانهای بودن ریزساختار نمونههای نوردکاری ۴ مرحلهای، رفتار خوردگی بهتری به دست آمده است. لازم به ذکر است که علاوه بر اندازهی دانه، عاملهای متعدد دیگری نیز وجود دارند که در زمینهی خواص خوردگی آلیاژهای زیرکنیم مؤثرند؛ از آن جمله می توان به ریختشناسی و نوع رسوبهای ثانویه، میزان بازیابی یا تبلور مجدد ساختار و وجود تنش در ریزساختار اشاره نمود. از آنجایی که در شیوهی ۴ مرحلهای، تعداد عملیات تابکاری از ۷ مرحله به ۵ مرحله کاهش یافته است و کاهش اندازهی دانهها چه در طی نوردکاریهای سنگینتر و چه پس از تابکاری، مسیرهای نفوذ کوتاه تری را فراهم ساخته است، در مقایسه با ریزساختار نمونهی نوردکاری ۶ مرحلهای می توان توزیع و اندازهی متفاوت تری از رسوبهای فاز دوم، که عمدتاً رسوبهای غنی از نیوبیم هستند، انتظار داشت. البته در این پژوهش با توجه به عدم دسترسی به امكانات لازم، بررسي رسوبها براي اثبات اين فرض ميسّر نشد. پینوشتھا

- 1. Higher Burnup
- Y. Vaccum Arc Remelt
- ۳. Pilger

مرجعها

- 1. B. Cox, P. Rudling, Hydriding mechanisms and impact on fuel performance, Advanced Nuclear Technology, Uppsala Science Park, SWEDEN.
- M. R. Louthan, R. P. Marshall, Control of hydride orientation in Zircaloy, J. Nuclear Material, 9 (1963) 170–184.
- 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.
- 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.
- 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.
- F. Nagase, T. Fuketa, Influence of hydride reorientation on BWR cladding rupture under accidental conditions, J. Nuclear Science Tech., 41 [12] (2004) 1211–1217.
- 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).
- 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 درشت تر) را مطلوب تر گزارش کردند [10]. البته این موضوع نیاز به بررسیهای بیش تر دارد.

٤. نتيجه گيري

- طراحی فرایند نوردکاری می تواند به طور مشخص بر
 خواص ریزساختاری، مکانیکی، خوردگی و هیدریداسیون
 غلافهای سوخت زیرکنیم- (٪۱) نیوبیم تأثیرگذار باشد.
- کاهش تعداد مراحل نوردکاری از طریق افزایش میزان
 کاهش سطح مقطعها می تواند به نحو مطلوبی بر جهت گیری
 هیدرید و خواص خوردگی تأثیر گذار باشد در عین این که
 کاهش اندازه ی دانه را نیز به همراه دارد.
- با توجه به نتایج پراش پرتو ایکس نمونه های آلیاژ زیرکنیم
 (/۱) نیوبیم و از مقایسهی آن ها با نتایج نمونه های با بافت تصادفی، مشخص شد که این آلیاژ در طی نوردکاری، شدیداً بافتدار شده و صفحه های (۰۰۰۱)، (۳۰(۱) یا شدیداً (۱۱۳۲) و (۱۰ آ ۱۰) نسبت به حالت تصادفی کاملاً تقویت شده اند.
- تغییر طراحی مراحل نورد توانست به میزان مطلوبی وضعیت
 جهت گیری 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 می توان آن را به دیگر عوامل اصلاح کنندهی 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.

تشكر 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.