



ارزیابی اثر بافت بلوری بر جهت گیری هیدریدها در غلاف زیر کونیم- (۱٪) نیویم

جلیل صالحی*^۱، خداکرم عرب^۱، امیر کیوان آرا^۱، محمدرضا رضوانیانزاده^۲

۱. شرکت سوخت رآکتورهای هسته‌ای، صندوق پستی: ۴۳۵۵۱-۱۴۳۷۶، اصفهان - ایران

۲. پژوهشکده‌ی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۳۳۶۵، تهران - ایران

چکیده: اثر بافت بلوری بر جهت گیری هیدرید در لایه‌ی داخلی و خارجی غلاف زیر کونیم- (۱٪) نیویم مورد ارزیابی قرار گرفت. تصویرهای قطبی صفحه‌های پایه (۰۰۰۲) به روش پراش پرتو ایکس و با تلفیق روش‌های عبور و بازتاب به دست آمد. نتایج آن از راه محاسبه‌ی کسر حجمی دانه‌های شامل صفحه‌های (۰۰۰۲) نسبت به راستای شعاعی (V_r) و کسر حجمی مؤثر (f_r) به نتایج کمی تبدیل شد. نتایج آزمون‌ها وجود تفاوت بافت در لایه‌ی داخلی و خارجی غلاف را نشان داد. مقدار $V_{r(\varphi:0-30^\circ)}$ و f_r با کسر هیدرید رابطه عکس داشت به طوری که در لایه‌ی داخلی مقادیرهای $V_{r(\varphi:0-30^\circ)}$ - f_r به ترتیب، برابر با ۰/۵۳ و ۰/۵۷ و مقدار کسر هیدرید برابر با ۰/۲۵ بود؛ این در حالی است که در لایه‌ی خارجی $V_{r(\varphi:0-30^\circ)}$ و f_r به ترتیب، ۰/۳۳ و ۰/۴۱ و کسر هیدرید ۰/۶۱ را نشان داد.

کلیدواژه‌ها: غلاف زیر کونیم- (۱٪) نیویم، بافت بلوری، جهت گیری هیدرید، تصویر قطبی

Effect of Crystallographic Texture on Hydride Orientation in Zr-(1%)Nb Fuel Clad

J. Salehi*¹, Kh. Arab¹, A. Keyvanara¹, M.R. Rezvanianzadeh²

1. Nuclear Reactors Fuels Company, P.O.Box: 14376-43551, Isfahan - Iran

2. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

Abstract: In this paper, the effect of crystallographic texture on hydride orientation in the inner and outer layers of Zr-(1%)Nb clad was investigated. (0002) pole figures were measured by transmission and reflection X-ray diffraction method. Volume fraction, V_r of grains having their basal poles in a specified orientation region with respect to the radial direction and effective fraction of basal poles aligned with a circumferential direction, f_r , were calculated from the data pole figures. The results of the analyses showed that there was a texture gradient in the clad thickness from the inner to the outer layers. f_r and $V_{r(\varphi:0-30^\circ)}$ had inverse relationship to hydride fraction (F). In the inner layer f_r , $V_{r(\varphi:0-30^\circ)}$ and F were 0.53, 0.57 and 0.25, respectively. In the outer layer, those were shown to be 0.41, 0.33 and 0.61, respectively.

Keywords: Zr-(1%)Nb Clad, Crystallographic Texture, Hydride Orientation, Pole Figure



۱. مقدمه

لوله‌ی زیرکونیمی بدون درز به دلیل خواص ویژه‌ی مکانیکی و شیمیایی به عنوان غلاف سوخت رآکتورهای هسته‌ای به کار برده می‌شود. لوله‌ی بدون درز معمولاً با استفاده از روش پیلگر تولید می‌شود. این روش عمدتاً سبب ایجاد بافت بلوری ویژه‌ای از ساختار شش گوشه‌ای فشرده (HCP) در آلیاژهای زیرکونیم می‌شود. بافت بلوری نقش مهمی در خواص مکانیکی و شیمیایی زیرکونیم، مانند استحکام، خزش و تشکیل هیدرید دارد؛ از این رو بافت بلوری یکی از مهم‌ترین ویژگی‌ها است که پژوهش‌های مختلف زیادی بر روی آن انجام شده است [۱، ۲].

اثر بافت بلوری بر جهت‌گیری هیدریدها همواره مورد توجه بوده است. هیدرید زیرکونیم فاز تدری است که به صورت صفحه‌هایی در زمینه‌ی زیرکونیم رشد می‌کند. در صورتی که این صفحه‌ها به موازات اعمال تنش قرار گیرد می‌تواند سبب ایجاد و اشاعه‌ی ترک در زمینه‌ی زیرکونیم شود و در نهایت شکست ترد لوله را به همراه داشته باشد. ترک هیدریدی تأخیری در لوله‌ی رآکتور «کندو» در کانادا و نیز ترک‌های هیدریدی در غلاف‌های رآکتورهای آب جوشان و رآکتورهای آب تحت فشار از جمله نمونه‌هایی است که بر اثر هیدرید دچار صدمه شده‌اند. از این رو پژوهش در مورد هیدریدها از ۴۰ سال پیش تاکنون هم‌چنان ادامه دارد [۳، ۴].

روش‌های گوناگونی برای مطالعه‌ی بافت وجود دارد؛ از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به روش استفاده از پراش نوترون، پرتو ایکس و الکترون پس‌پراکنده شده (EBSD) اشاره نمود [۵]. روش پراش نوترون برای اندازه‌گیری بافت در عمق نمونه مفید است زیرا نوترون به آسانی به عمق نمونه نفوذ می‌کند. روش پراش الکترون پس‌پراکنده شده برای اندازه‌گیری بافت بلوری در سطح‌های کوچک مثلاً یک یا چند دانه می‌تواند مفید باشد. روش پراش پرتو ایکس برای اندازه‌گیری بافت در نزدیکی سطح کاربرد گسترده‌ای دارد.

هدف از این پژوهش، اندازه‌گیری بافت بلوری غلاف‌های زیرکونیم- (۱٪) نیویم تولیدی شرکت سوره با دستگاه پراش پرتو ایکس معمولی همراه با تلفیق روش عبور دگر و روش بازتاب فیلد و مرچنت [۶، ۷] بود.

۲. روش پژوهش

در این پژوهش، غلاف زیرکونیم- (۱٪) نیویم با قطر داخلی و خارجی، به ترتیب، ۱۱/۷ و ۱۳/۶ میلی‌متر مورد استفاده قرار

گرفت. اسفنج‌های زیرکونیمی تولید شده از کاهش زیرکونیم کلرید به وسیله‌ی منیزیم (روش کرال)، به وسیله‌ی کوره‌ی ذوب مجدد قوسی تحت خلأ به شمش تبدیل شدند. پس از عملیات فشارکاری، پیلگر، نورد سه غلتکی و بازپخت‌های میان پاسی در دمای 600°C غلاف‌ها هم‌راستا شده و با سنباده‌زنی به اندازه‌ی نهایی رسیدند. اندازه‌گیری بافت در دو لایه از غلاف صورت گرفت. $2/3$ از ضخامت داخلی نمونه از سطح داخلی به سمت سطح خارجی به وسیله‌ی دستگاه تراش، براده‌برداری شد. به همین ترتیب $2/3$ لایه‌ی خارجی برداشته شد و نمونه‌ای شامل لایه‌ی داخلی به دست آمد. نمونه‌ها در محلول حاوی ۳۰ درصد H_2SO_4 ، ۳۰ درصد HNO_3 ، ۱۰ درصد HF و ۳۰ درصد H_2O در دمای 50°C تا 60°C اسید شویی شد. اسید شویی نمونه‌ها تا رسیدن ضخامت نمونه‌ها به حدود ۳۰ میکرون ادامه یافت.

۱.۲ اندازه‌گیری بافت

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد برای اندازه‌گیری بافت بلوری از تلفیق روش عبور دگر و بازتاب فیلد استفاده شد. در روش عبور، نمونه در نگه‌دارنده طوری قرار داده شد که جهت نورد آن عمودی و منطبق بر محور پراش سنج بود و صفحه‌ی نمونه زاویه‌ی باریکه‌ی فرودی را نصف می‌کرد (شکل ۱). چرخش نمونه در صفحه‌ی خود به صورت دستی انجام شد. در این پژوهش، اندازه‌گیری قطب صفحه‌های (۰۰۰۲) شبکه‌ی شش گوشه‌ای موردنظر بود. پرتو فرودی تحت زاویه‌ی $\theta = 17.4^{\circ}$ که با زاویه‌ی پراش صفحه‌های (۰۰۰۲) برابر بود، قرار گرفت و نمونه با گام‌های 5° هم‌سوی ساعت چرخانده شد. حرکت ورق در صفحه‌ی خود نیز با گام‌های 5° و در مقدارهای 0° تا 90° درجه برای زاویه‌ی β به انجام رسید. این میزان چرخش به دلیل تقارن شبکه‌ی شش گوشه‌ای کافی بود.

بعد از روش عبور، نمونه در نگه‌دارنده‌ی روش بازتاب قرار گرفت و شدت قطب‌های (۰۰۰۲) در مقدارهای 75° تا 90° درجه برای زاویه‌ی α به دست آمد. مدت زمان پرتودهی در هر دو روش ۴۵ ثانیه بود و برای این منظور از شکاف به قطر ۵ میلی‌متر استفاده شد. در این شرایط شدت پراش صفحه‌های (۰۰۰۲) نمونه‌ی تصادفی که از آسیاب و پرس کردن اسفنج زیرکونیمی به دست آمده بود برای حالت عبور و بازتاب به ترتیب، ۴۰۰ و ۶۰۰ بود.



رابطه بین ضریب کرنز^(۱) f_r و کسر حجمی دانه‌ها این است

(الف)

$$f_r = \int_0^{\pi/2} V(\varphi) \cos^2 \varphi d\varphi \quad (۳)$$

و در نهایت f_r چنین به دست آمد

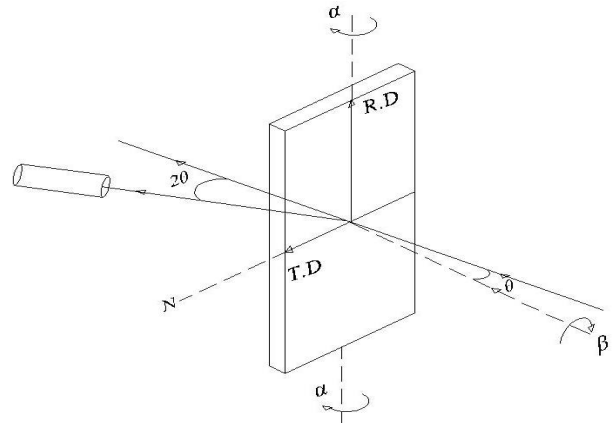
$$f_r = \frac{\int_0^{\pi/2} I(\varphi) \sin \varphi \cos^2 \varphi d\varphi}{\int_0^{\pi/2} I(\varphi) \sin \varphi d\varphi} \quad (۴)$$

۲.۲ هیدریددار شدن

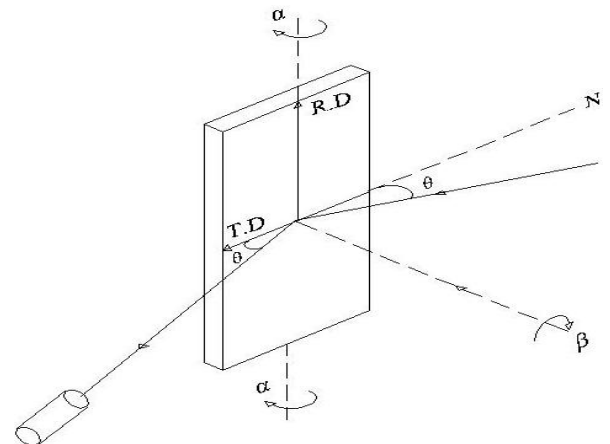
با توجه به رابطه‌ی بافت بلوری زیر کونیم و راستاگیری هیدرید آن، نمونه‌هایی با کد مشابه تحت عمل هیدریددار شدن قرار گرفت. هیدریددار شدن در لوله‌ی کوارتزی حاوی مخلوط مقدارهای مساوی از آرگون و هیدروژن در دمای 400°C ، به مدت ۵۰ دقیقه و در فشار ۱ بار انجام شد. بعد از هیدروژن‌دهی، نمونه‌ها به مدت ۵ ساعت در معرض گاز آرگون قرار داده شد تا هیدروژن جذب شده در کل نمونه پخش شود. بعد از متالوگرافی و الکتروپولیش، برای سونش از محلول ۴۵ درصد لاکتیک اسید، ۴۵ درصد نیتریک اسید و ۸ درصد فلئوئوریدریک اسید استفاده و تصویرهای میکروسکوپی با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر مشاهده شد.

۳. نتایج و بحث

شکل ۲ (الف، ب و ج)، به ترتیب ریزساختار غلاف نهایی را در سه جهت طولی، عرضی و شعاعی نشان می‌دهد. دانه‌ها به صورت هم‌محورند به طوری که کشیدگی محسوسی در راستای نورد دیده نمی‌شود. میانگین اندازه‌ی دانه‌ها تقریباً $5\mu\text{m}$ است. اندازه‌گیری دقیق دانه‌ها به وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی نشان داد که اندازه‌ی دانه در راستای طولی، عرضی و شعاعی رو به کاهش است و در سطح طولی و عرضی، دانه‌ها کشیدگی کمی با نسبت کشیدگی تقریباً ۲ دارند. بنابراین دانه‌ها را می‌توان به صورت صفحه‌های مکعب مستطیلی تصور کرد که طول آن در جهت نورد و عرض آن در جهت عرض غلاف و سطح مقطع کوچک آن به موازات سطح مقطع شعاعی است.



(ب)



شکل ۱. محل قرارگیری نمونه و محورهای چرخش در روش عبور دکر (الف) و در روش بازتاب فیلد و مرچنت (ب).

تغییر در زاویه‌ی α باعث تغییر در حجم ماده‌ی پراکننده و طول مسیرهای پرتو ایکس در درون نمونه شد ولی چون عرض پرتو ورودی نسبتاً کم ($50\mu\text{m}$) بود، از ضریب جذب صرف‌نظر شد. اطلاعات به دست آمده از پراش پرتو ایکس، بعد از بهنجارسازی به وسیله‌ی نرم‌افزار، روی دایره‌ی استریوگراف رسم شد.

برای کمی‌سازی نتایج، کسر حجمی مؤثر دانه‌ها در راستای

مرجع محاسبه شد [۸، ۹]

$$V_i = \int_0^{\pi/2} I(\varphi) \sin \varphi d\varphi \quad (۱)$$

که در آن φ زاویه‌ی دانه نسبت به راستای شعاعی است، $I(\varphi)$ چنین به دست آمد

$$I(\varphi) = \int_0^{2\pi} I(\varphi, \beta) d\beta \quad (۲)$$



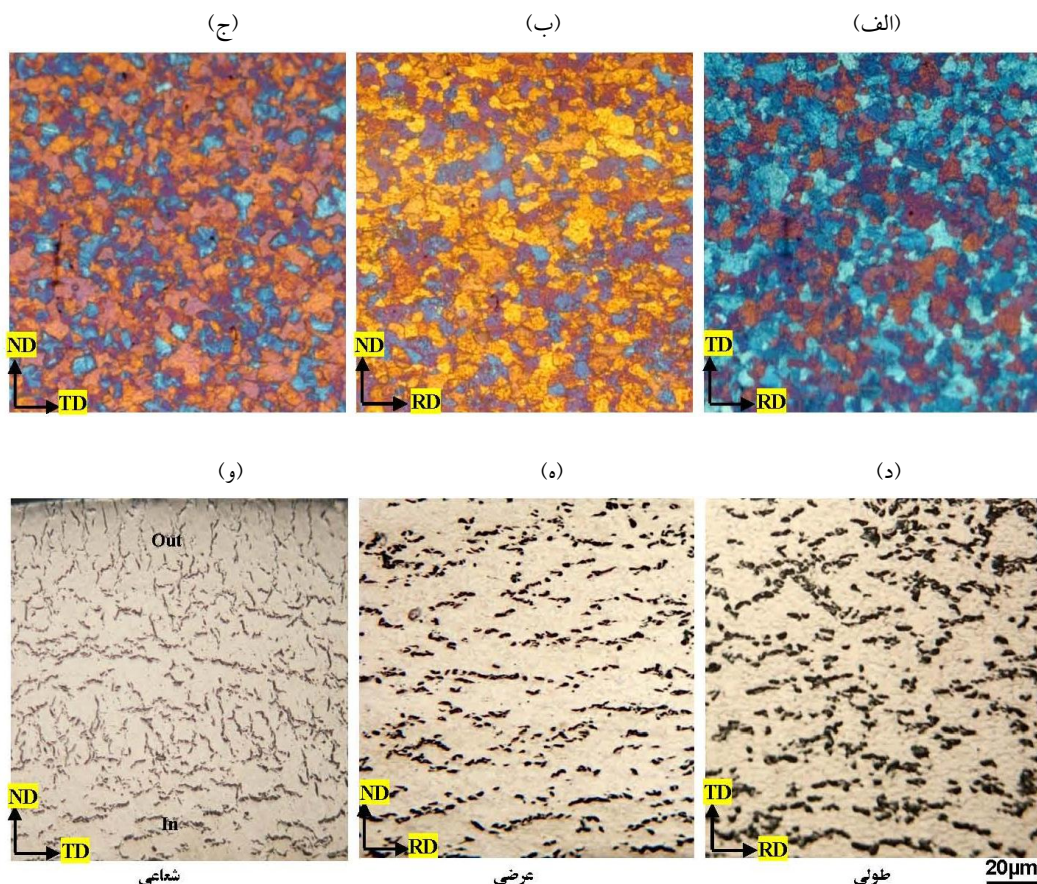
صفحه‌های پایه با انحراف کمی نسبت به راستای عمود (ND) تجمع یافته‌اند. در حالی که در لایه‌ی خارجی صفحه‌های پایه با انحراف زیاد نسبت به راستای عمود، تجمع دارند.

تصویرهای قطبی، اطلاعات کیفی مناسبی در مورد راستاگیری صفحه‌ها در دو بعد ارائه می‌دهند، اما با محاسبه‌ی کسر حجمی (V_V) هر دانه شامل قطب پایه نسبت به راستای شعاعی و یا کسر مؤثر صفحه‌ها نسبت به راستای شعاعی (f_T) اطلاعات کمی مفیدی به دست می‌آید.

شکل ۴ کسر حجمی دانه‌های حاوی صفحه‌های (۰۰۰۲) نسبت به راستای مرجع شعاعی را نشان می‌دهد. در لایه‌ی داخلی، تجمع بیشینه‌ی قطب‌ها در زاویه‌ی 10° نسبت به راستای شعاعی است که مجموع مقدار آن برابر با ۰٫۲۹ است. در لایه‌ی خارجی دو ناحیه‌ی تجمع وجود دارد: تجمع در زاویه‌ی 10° با مجموع مقدار ۰٫۱۶، که کم‌تر از مقادیر مشابه در لایه‌ی داخلی است، و تجمع در زاویه‌ی 90° با مجموع مقدار ۰٫۲۰ که با مجموع مقدار ۰٫۱۱ در لایه‌ی داخلی قابل مقایسه است.

شکل ۲ (د، ه، و) ریزساختار هیدریدها را در سه راستای غلاف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضخامت هیدریدها در راستای طولی، عرضی و شعاعی رو به کاهش است. برای مقایسه‌ی راستاگیری هیدریدها، ارزیابی تصویر سطح مقطع شعاعی مناسب است. بررسی شکل ۲ و نشان می‌دهد که راستاگیری هیدریدها در لایه‌های داخلی و خارجی متفاوت است. در لایه‌ی داخلی هیدریدها عمدتاً در راستای محیطی قرار گرفته‌اند در حالی که در لایه‌ی خارجی مقدار هیدریدهای با راستای شعاعی بالاتر است. مقدار کسر هیدرید (F) که از ارزیابی راستای هیدریدهای مشاهده شده در سطح مقطع شعاعی به دست آمد، حاصل تقسیم هیدریدهای با زاویه‌ی بیش از 40° درجه نسبت به راستای محیطی به تمامی هیدریدها است. مقدار این کسر در لایه‌ی داخلی و خارجی به ترتیب برابر با ۰٫۲۵ و ۰٫۶۱ بود.

شکل ۳ تصویرهای قطبی صفحه‌های (۰۰۰۲) لایه‌های داخلی و خارجی را نشان می‌دهد. در هر لایه، صفحه‌های پایه (۰۰۰۲) در راستای عرضی (TD) کشیده شده‌اند. در لایه‌ی داخلی



شکل ۲. ریزساختارهای غلاف زیرکونیم-نیوبیم (۱٪) (الف، ب، ج) و هیدریدها (د، ه، و) در راستاهای، به ترتیب، طولی، عرضی، و شعاعی.



ضریب کرنز، کسر هیدرید و کسر حجمی دانه‌های با انحراف 0° تا 30° نسبت به راستای شعاعی در جدول ۱ آورده شده‌اند. علت انتخاب زاویه‌ی 30° درجه این است که هیدریدها با صفحه‌های پایه معمولاً زاویه‌ی 0° تا 30° درجه می‌سازند.

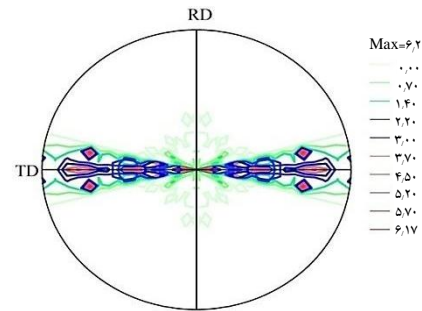
۱.۳ رابطه‌ی بافت بلوری و ضریب Q

تشکیل بافت در لوله‌های زیرکونیمی، که از طریق فرایند پیلگر انجام می‌شود، به طور عمده‌ای بستگی به پارامتر نسبت کرنش‌ها (Q) دارد. نسبت تغییرات کرنش حقیقی ضخامت به شعاع را نشان می‌دهد. در مواردی که مقدار Q بزرگ‌تر از یک است کرنش شعاعی بزرگ‌تر از کرنش عرضی می‌شود؛ بنابراین مقدار تنش‌های فشاری در راستای شعاعی افزایش می‌یابد. اگر تغییر شکل از طریق لغزش صفحه‌ها انجام شود، قطب‌های (۰۰۰۲) آلیاژهای زیرکونیم در راستای کرنش‌های فشاری قرار می‌گیرد. زمانی که $Q < 1$ است، نیروهای فشاری بیشینه در راستای عرضی وارد و باعث قرارگیری قطب‌های پایه در راستای عرضی می‌شوند [۱۰، ۱۱]. در تولید غلاف زیرکونیم از طریق پیلگر معمولاً ضریب Q در لایه‌ی داخلی و خارجی متفاوت بوده و مقدار آن در لایه‌ی داخلی بیش‌تر از لایه‌ی خارجی است. بنابراین پیش‌بینی می‌شود میزان کرنش‌های فشاری در لایه‌ی داخلی بیش‌تر از لایه‌ی خارجی باشد. از این‌رو، میزان تجمع قطب‌های پایه‌ی هم‌راستا با راستای شعاعی در لایه‌ی داخلی بیش‌تر از لایه‌ی خارجی می‌شود. تفاوت در میزان قطب‌های پایه که در لایه‌ی داخلی با انحراف کم‌تری در راستای شعاعی قرار گرفته‌اند در شکل ۴ مشهود است.

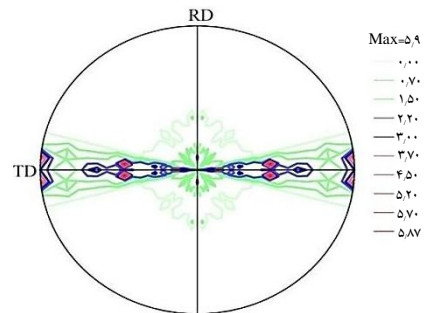
۲.۳ رابطه‌ی بافت بلوری و سمت گیری هیدرید

هیدروژن به مقدار ناچیزی در زیرکونیم حل می‌شود. میزان انحلال در دمای اتاق حدود 0.05 میلی‌گرم بر کیلوگرم است. در داخل رآکتور، هیدروژن اضافی ناشی از واکنش خوردگی به درون آلیاژ زیرکونیم نفوذ می‌کند و در بالاتر از حد انحلال‌پذیری به صورت فاز ترد هیدرید زیرکونیم رسوب می‌کند. اتصال هیدریدها به زیرکونیم در صفحه‌های رابط^(۲) اتفاق می‌افتد. صفحه‌های رابط برای هیدرید نوع γ در آلیاژ زیرکونیم- (۱٪) نیویم صفحه‌های γ (۰۰۱) \parallel α (۰۰۰۱) و در راستای γ [۱۱۰] \parallel α [۱۲۱۰] است و نهایتاً هیدریدها به موزات صفحه‌های (۰۰۰۱) یا با انحراف کم‌تر از 30° درجه قرار می‌گیرند (شکل ۵) [۱۲].

(الف)

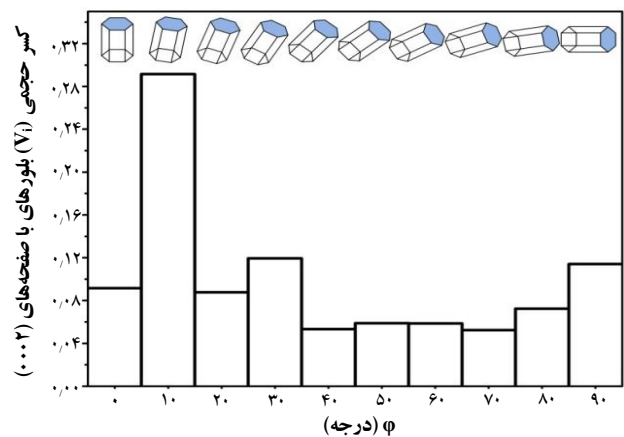


(ب)

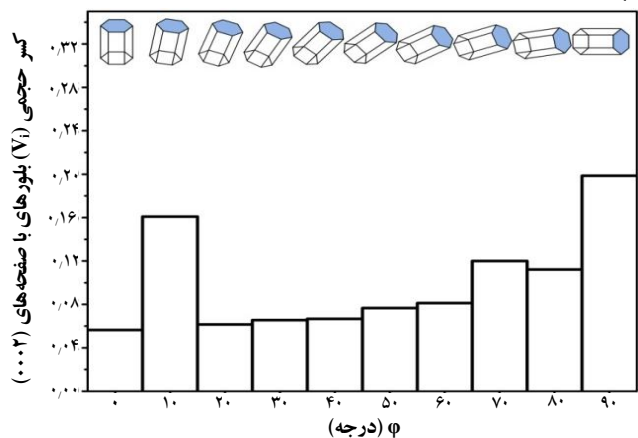


شکل ۳. تصویرهای قطبی صفحه‌های پایه‌ی (۰۰۰۲) لایه‌ی داخلی (الف)، و لایه‌ی خارجی (ب).

(الف)



(ب)



شکل ۴. کسر حجمی دانه‌های شامل صفحه‌ی (۰۰۰۲) نسبت به انحراف آن‌ها از راستای شعاعی در لایه‌ی داخلی (الف) در لایه‌ی خارجی (ب).

۴. نتیجه گیری

تصویرهای قطبی صفحه‌های (۰۰۰۲) غلاف زیرکونیم - (۱٪) نیویم از طریق پراش پرتو ایکس و تلفیق روش‌های عبور و بازتاب به دست آمد. این تصویرها نشان داد که قطب‌های (۰۰۰۲) در راستای عرضی کشیده شده‌اند. مقایسه‌ی تصویرهای قطبی (۰۰۰۲) لایه‌ی داخلی و خارجی، وجود شیب بافت بلوری را نشان داد. تجمع صفحه‌های (۰۰۰۲) در لایه‌ی داخلی، دارای انحراف ۱۰ درجه نسبت به راستای شعاعی و در لایه‌ی خارجی در زوایای ۱۰ و ۹۰ درجه بود. بین کسر حجمی دانه‌های شامل صفحه‌های (۰۰۰۲) نسبت به راستای شعاعی و کسر مؤثر دانه‌ها با کسر هیدرید رابطه‌ی معکوس وجود داشت. در لایه‌ی داخلی مقدار $V_{r(\varphi_{00-20})}$ و f_r به ترتیب، برابر با ۰/۵۳ و ۰/۵۷ و مقدار کسر هیدرید برابر با ۰/۲۵ بود. در لایه‌ی خارجی $V_{r(\varphi_{00-20})}$ و f_r دارای مقدارهای ۰/۴۱ و ۰/۳۳ و کسر هیدرید دارای مقدار ۰/۶۱ بود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از زحمت‌های مهندس احسان لرکی که تصویرهای میکروسکوپی ریزساختار و هیدریدها را تهیه نمودند قدردانی می‌نماید.

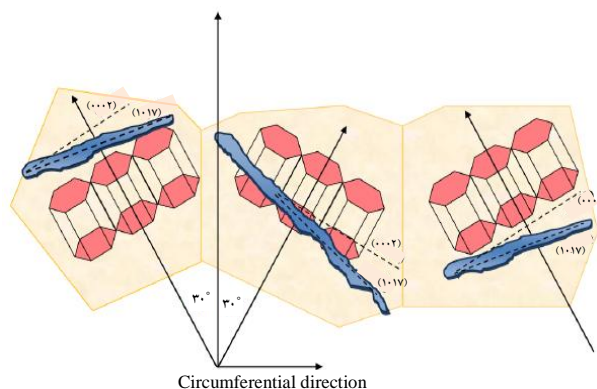
پی‌نوشت‌ها

۱. Kearns

۲. Habit Planes

جدول ۱. ضریب کرنز (f_r)، کسر حجمی دانه‌های با انحراف ۳۰ درجه

نسبت به راستای شعاعی ($V_{r(\varphi_{00-20})}$) و کسر هیدرید (F)			
F	$V_{r(\varphi_{00-20})}$	f_r	
۰/۲۵	۰/۵۳	۰/۵۷	لایه‌ی داخلی
۰/۶۱	۰/۳۳	۰/۴۱	لایه‌ی خارجی



شکل ۵. تصویر طرح‌وار تشکیل هیدریدها روی صفحه‌های رابط در آلیاژهای زیرکونیم.

سمت‌گیری صفحه‌های پایه در زیرکونیم رابطه‌ی مستقیمی با سمت‌گیری هیدریدها دارد. هر اندازه میزان تجمع صفحه‌های پایه در نزدیکی مرکز تصویر قطبی بیشتر باشد، میزان هیدریدهایی که در راستای محیطی قرار می‌گیرند به همان اندازه بیش‌تر است، و هر قدر تجمع قطب در انتهای تصویر قطبی بیش‌تر باشد میزان هیدریدهای شعاعی به همان اندازه افزایش می‌یابد [۱۳]. مقایسه‌ی تصویرهای قطبی شکل ۳ الف و ب نشان می‌دهد که تجمع قطب‌های پایه در لایه‌ی داخلی در انحراف کمی نسبت به راستای شعاعی است در حالی که تجمع قطب‌های پایه در لایه‌ی خارجی در انحراف‌های بالا نسبت به راستای شعاعی نیز مشاهده می‌شود. بنابراین پیش‌بینی می‌شود میزان هیدریدها با راستای شعاعی در لایه‌ی خارجی بیش‌تر از لایه‌ی داخلی باشد که این مطلب در شکل ۲ به طور محسوسی قابل مشاهده است. با توجه به آن چه که گفته شد، پیش‌بینی می‌شود $V_{r(\varphi_{00-20})}$ و f_r که هر دو پارامتر معیاری از مقدار قطب‌های (۰۰۰۲) در راستای شعاعی هستند، رابطه‌ی معکوس با کسر هیدرید داشته باشند به طوری که هر چه مقدارهای $V_{r(\varphi_{00-20})}$ و f_r بیش‌تر باشد مقدار F بیش‌تر کاهش می‌یابد؛ این مطلب در جدول ۱ برای لایه‌ی داخلی و خارجی قابل مشاهده است.



مرجع ها

1. R. Guillen, C. Cossu, M. Francois, E. Girard, Texture and residual-stresses analysis in Zircaloy-4 cylindrical samples, *Journal of Nuclear Materials*, 255 (1998) 174–179.
2. E. Tenkhoff, A review of texture and texture formation in Zircaloy tubing, STP754, Philadelphia (1980) 5-24.
3. V.M. Allen, Evolution of texture in Zirconium alloy tubing during processing, *Material Science Forum*, 495-497 (2005) 675-680.
4. Katsumi Unei, Kazuhiro Nogita, Shinji Ishimoto, Keizo Ogata, Crystallography of Zirconium Hydrides in Recrystallized Zircaloy-2 fuel cladding by electron backscatter diffraction, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 41 (2008) 731–740.
5. Yong Choi, Crystallographic texture development and its effect on corrosion behavior of pilgered Zirconium alloy tubes, *Materials transactions*, 51 (2010) 652-658.
6. B.D. Cullity, *Elements of X-ray diffraction*, second edition (1998).
7. American Society for Test Method (ASTM), E81-96 (2001).
8. J.J. Kearns, Effect of texture, grain size and cold work on the precipitation of oriented hydrides in Zircaloy tubing and plate, *Journal of Nuclear Materials*, 20 (1966) 241-261.
9. K. Vaibhaw, Texture and hydride orientation relationship of Zircaloy-4 fuel clad tube during fabrication for pressurized heavy water reactors, *Journal of Nuclear Materials*, 322 (2007) 195–203.
10. T. Kakuma, Texture control of Zircaloy tubing during tube reduction, STP754, Philadelphia (1980) 26.
11. K. Linga Murty, Indrajit Charit, Texture development and anisotropic deformation of Zircalloys, *Progress in Nuclear Energy*, 48 (2006) 325–359.
12. S. Neogy, D. Srivastava, R. Tewari, R.N. Singh, G.K. Dey, S. Banerjee, Microstructural study of hydride formation in Zr-1Nb alloy, *Journal of Nuclear Materials*, 322 (2003) 195–203. EURACHEM/CITAC Guide CG4.
13. C.E. Ells, Hydride Precipitates in Zirconium alloys, *Journal of Nuclear Materials*, 28 (1968) 129-151.