



بررسی تحولات تنش باقی‌مانده و تشکیل فاز مخرب هیدرید در مراحل تولید آلیاژ Zr-1%Nb

سیداکبر میراسماعیلی هفدانی^۱، محسن اسدی اسدآباد^{۲*}، غلامحسین برهانی^۱

۱. دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، صندوق پستی: ۸۳۱۴۵-۱۱۵، اصفهان- ایران

۲. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران- ایران

*Email: msasadi@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۵/۲۴

چکیده

آلیاژ Zr-1%Nb متداول‌ترین آلیاژ جهت استفاده به عنوان غلاف سوخت هسته‌ای در راکتورهای روسی است. در فرایند تولید غلاف سوخت هسته‌ای، عملیات نورد سرد پیلگر و هم‌راستاسازی نهایی منجر به ایجاد تنش‌های باقی‌مانده و تغییر در توزیع این تنش‌ها در داخل غلاف سوخت می‌گردد. تنش‌های باقی‌مانده بر افزایش کسر هیدریدی در غلاف‌های سوخت هسته‌ای که در شرایط کاری با جذب هیدروژن آب، تشکیل می‌شوند و اثرات تخریبی دارند، مؤثر شناخته شده‌اند. در این تحقیق تنش‌های باقی‌مانده ایجاد شده در مراحل مختلف ساخت غلاف سوخت شامل نمونه‌های قبل از عملیات آنیل، بعد از آنیل و بعد از هم‌راستاسازی، با استفاده از روش‌های تفرق‌سنجی اشعه ایکس (XRD) و شیارزنی اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، میزان کسر هیدرید در نمونه‌های مختلف ارزیابی شد. تأثیر عملیات آنیل بر جهت‌گیری هیدریدها، در آنیل در دماهای ۵۰۰، ۵۴۰ و ۵۸۰°C به مدت زمان ۴ ساعت انجام شد.

کلیدواژه‌ها: آلیاژ Zr-1%Nb، تنش باقی‌مانده، هیدرید، XRD

Investigation of residual stress changes and formation of hydride phase in production stages of Zr-1%Nb alloy

S.A. Miresmaeili Hafdani¹, M. Asadi Asadabad^{2*}, Gh.H. Borhani¹

1. Department of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology, P.O.Box: 83145-115, Isfahan – Iran

2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

Research Article

Received 1.5.2021, Accepted 15.8.2021

Abstract

Zr-1%Nb alloy is the most common alloy used as nuclear fuel cladding in Russian reactors. In producing a nuclear fuel cladding, the cold rolling (pilger) and the final straightening lead to the creation of residual stresses and a change in the distribution of these stresses within the fuel cladding. The residual stresses are known to be effective in increasing the hydride fraction in nuclear fuel pods formed under working conditions by hydrogen adsorption of water and have destructive effects. In this study, the residual stresses created in different stages of fuel cladding fabrication, including samples before annealing, post-annealing, and straightening, were measured using X-ray diffraction and splitting. In addition, the amount of hydride fraction in different samples was evaluated. The effect of annealing on the orientation of hydrides was performed in annealing at 500, 540, and 580 °C for 4 hours.

Keywords: Zr-1%Nb Alloy, Residual stress, Hydride, XRD



۱. مقدمه

آلیاژهای زیرکونیم به دلیل قابلیت جذب نوترون کم، مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی مطلوب، از چندین دهه قبل (۱۹۶۰) در صنایع هسته‌ای به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. آلیاژ $Zr-1\%Nb$ از سری آلیاژهای زیرکونیم بوده که به‌عنوان جایگزین پوشش یا غلاف سوخت، معرفی شده است [۱، ۲]. این آلیاژها توسط فرایندهایی شامل ذوب (چندین مرتبه)، کارگرم، آنیل میانی، کارسرد، آنیل تبلور مجدد و هم‌راستاسازی جهت تبدیل آلیاژ به غلاف مورد استفاده قرار می‌گیرد. عموماً فرایند هم‌راستاسازی این لوله‌ها، تنش‌های باقی‌مانده را در داخل این قطعات ایجاد می‌کند. حضور تنش‌های باقی‌مانده بسته به ماهیت و میزان این تنش‌ها (فشاری یا کششی) می‌تواند تأثیر مفید یا مخرب را روی خواص مواد ایجاد کند. پس از قرار گرفتن غلاف سوخت در شرایط کاری، هیدروژن موجود در محیط توسط این لوله‌ها جذب شده و با توجه به دیگرام فازی دوتایی زیرکونیم-هیدروژن، حد حلالیت هیدروژن با کاهش دما، کاهش یافته و سپس مقدار اضافی هیدروژن حل شده، به‌عنوان فاز هیدرید زیرکونیم (رسوبات هیدریدی) در زمینه رسوب می‌کند. چنانچه رسوبات تشکیل شده دارای جهت‌گیری مطلوبی نباشند، باعث شکست ترد^۱ این آلیاژ در شرایط کاری خواهد شد [۲]. رسوبات هیدرید، در موقعیت‌هایی که تنش‌های باقی‌مانده با ماهیت کششی وجود دارند به صورت شعاعی رسوب کرده و این نوع جهت‌گیری عملاً موجب ایجاد ترک در داخل لوله شده است. کاهش تنش‌های باقی‌مانده می‌تواند بهبود کارایی غلاف سوخت در شرایط کاری را به‌همراه داشته باشد [۴، ۵].

سینگ و همکاران در سال ۱۹۹۷ [۶]، ارزیابی تنش‌های باقی‌مانده اتصالات نورد در رآکتورهای آب سنگین تحت فشار ساخت هند را روی آلیاژهای $Zr-2\%Nb$ و زیرکالوی ۲ مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری تنش‌های باقی‌مانده با استفاده از روش سوراخ‌کاری انجام شد. تغییرات کرنش با استفاده از کرنش‌سنج روتز، با چسباندن در سطح داخلی و خارجی لوله ارزیابی و تنش‌های باقی‌مانده با استفاده از چسباندن کرنش‌سنج و سپس شیپارزنی و سوراخ‌کاری لوله بررسی شدند. تنش‌های کششی در حین فرایند نورد به دلیل وجود تمرکز تنش در نیروهای وارد شده از طرف غلتک نورد ایجاد شده است. توزیع تنش‌های باقی‌مانده در ضخامت لوله، ۱۲ الی ۱۵ درصد متغیر ذکر شد. حداکثر میزان تنش کششی در قسمت نورد شده، ۵۱۷

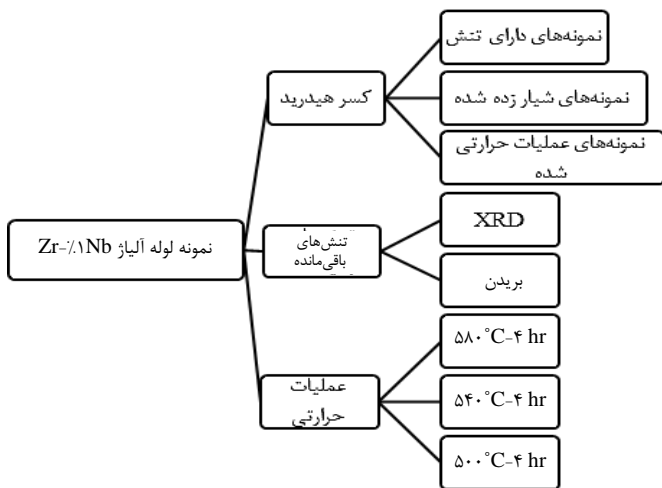
و ۶۲۱ مگاپاسکال به دست آمد. متغیر بودن میزان تنش در ضخامت بیان‌گر عدم قرارگیری لوله، تحت بار پیچشی است، این مورد به دلیل محوری و محیطی بودن تنش‌های اصلی بود [۶]. کاپور^۲ و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۲، تنش‌های باقی‌مانده در لوله‌های از جنس آلیاژ $Zr-2\%Nb$ را مورد بررسی قرار دادند. لوله‌های مورد آزمون هم در شرایط دارای تنش (پیلگر شده) و هم در شرایط بدون تنش بررسی شده‌اند. از روش XRD (با تابش $Ti-K\alpha$) و استفاده از نمودار $d-\sin^2(\Psi)$ تنش‌های باقی‌مانده در قطعات محاسبه شده‌اند. صفحه (۱۰۳) با زاویه پراش $139/82$ درجه، برای بررسی تنش‌های باقی‌مانده، انتخاب شده است. پنج زاویه سای در بین زاویه‌های ± 45 انتخاب گردیده است. اندازه‌گیری تنش‌های باقی‌مانده در آلیاژ $Zr-2\%Nb$ نیاز به شناخت کاملی از بافت دارد. بیش‌ترین میزان تنش دارای ماهیت فشاری، در جهت نورد (RD) در نمونه‌های پیلگر شده با میزان ۱۵۵- مگاپاسکال مشاهده شده است.

الگوی پیچیده‌ای از توزیع تنش‌های باقی‌مانده در دیواره لوله آلیاژ $Zr-1\%Nb$ گزارش شده است. لایه سطحی پوشش، به دلیل برداشتن لایه سطحی غلاف با حکاکی، سطح غلاف تنش‌های باقی‌مانده کششی و فشاری را به نمایش گذاشته است و از میزان ۱۴۰ مگاپاسکال، به صورت قابل توجهی کاهش یافته است. توزیع مشاهده شده تنش‌های باقی‌مانده در غلاف زیرکونیمی به دلیل اثر ترکیبی از عملیات‌های مکانیکی در آخرین مرحله تولید مانند صاف کردن و پرداخت نهایی ذکر شده است. مشاهده شده است که عملیات هم‌راستاسازی تمایل به ایجاد تنش‌های کششی در نزدیکی سطح و عملیات پرداخت نهایی تمایل به ایجاد تنش‌های فشاری قابل توجهی روی سطح خارجی غلاف دارد. توزیع تنش‌های باقی‌مانده در غلاف سوخت به دلیل عملیات حکاکی نهایی است که به اندازه کافی بی‌نظم و عمیق بوده است [۸].

ارزیابی تنش‌های باقی‌مانده در لوله ساخته شده از جنس آلیاژ $Zr-1\%Nb$ با قطرهای خارجی $14/8$ و $9/5$ میلی‌متر صورت گرفت [۹]. روش‌های XRD (تابش Cu) و آلتراسونیک جهت ارزیابی مقایسه‌ای ماکرو تنش‌های باقی‌مانده استفاده شد. تنش‌های باقی‌مانده در طول جداره لوله‌ی آلیاژ $Zr-1\%Nb-0.1\%Sn-0.5\%Fe$ ، از ۴۰۰ تا ۹۰۰ MPa، در امتداد ضخامت متغیر بوده است [۹].

1. Fracture Brittleness





شکل ۱. خلاصه‌ای از روندنمای تحقیق.

در این مقاله، بررسی تنش‌های باقی‌مانده با روش‌های متعددی شامل؛ XRD و شیپارزنی (مطابق استاندارد ASTM E ۱۹۲۸) صورت گرفت. در همه نمونه‌ها به‌منظور جلوگیری از ایجاد تنش‌های اضافی، نمونه‌سازی با استفاده از دستگاه EDM مدل ۲۰۰ Robofil انجام شد. از دستگاه XRD مدل AW-XXXD M۳۰۰ با تابش Cu- α و زاویه‌های مختلف بین زاویه صفر تا ۴۵ درجه استفاده شد. تنش‌های باقی‌مانده با استفاده از روش $d\text{-sin}^2\Psi$ و بر اساس تغییر در پارامتر شبکه و مطابق رابطه ۱ اندازه‌گیری شدند [۱۲].

$$\sigma = \frac{E}{1+\nu} m \quad (1)$$

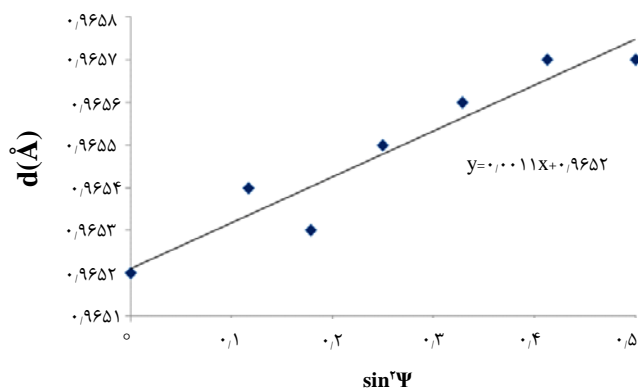
در رابطه ۱، E مدول یانگ، ν نسبت پواسن، m شیب نمودار $d\text{-sin}^2\Psi$ و σ تنش باقی‌مانده می‌باشد. بررسی تنش‌های باقی‌مانده روی صفحه (۱۰۵) زیرکونیم صورت گرفت. شیب نمودار $d\text{-sin}^2\Psi$ با ترسیم مقادیر فاصله بین صفحات کریستالی (d) در زاویه‌های سای مختلف، به‌دست آمد. در این روش، ماکروتشنس‌های موجود در سطح نمونه، اندازه‌گیری می‌شوند [۹]. به دلیل نسبت قطر به ضخامت زیاد (لوله‌های جداره نازک) آماده‌سازی نمونه‌ها برای روش شیپارزنی، مطابق با استاندارد مناسب برای لوله‌های جداره نازک، ASTM E ۱۹۲۸ صورت گرفت. بررسی تغییرات قطر نمونه‌ها در این روش براساس استاندارد ASTM E ۱۹۲۸ با استفاده از دستگاه CMM انجام شد. محاسبه تنش‌های باقی‌مانده براساس تغییرات قطر نمونه و با استفاده از رابطه ۲ انجام گرفت.

در سال ۲۰۰۸ [۱۰]، تنش‌های باقی‌مانده و بافت در لوله ساخته شده از جنس آلیاژ M۵ مورد بررسی قرار گرفت. تنش‌های باقی‌مانده با استفاده از روش XRD (تابش‌های Cr و Cu) اندازه‌گیری شده است. زاویه Ψ در محدوده 48° تا $45^\circ +$ با قطر سطح مقطع تابش 0.5 mm^2 استفاده شده است. تنش‌ها در صفحات $\{2133\}$ به میزان ۳۳۴ مگاپاسکال، $\{3030\}$ به میزان ۳۷۶ مگاپاسکال، $\{0004\}$ به میزان ۱۸۵ مگاپاسکال، $\{2022\}$ به میزان ۲۲۶ مگاپاسکال، $\{2025\}$ به میزان ۱۷۴ مگاپاسکال (همگی با ماهیت فشاری) و $\{1024\}$ به میزان ۱۸۹ مگاپاسکال گزارش شده است. مقادیر تنش‌های باقی‌مانده از یک صفحه به صفحه دیگر بسیار متفاوت بوده است. تنش‌های باقی‌مانده به خانواده صفحات مورد بررسی بستگی داشته است. به‌دلیل وجود کرنش‌های ناسازگار^۱ در سطح نمونه، تنش‌های باقی‌مانده از صفحه‌ای به صفحه‌ی دیگر متفاوت ذکر شده است. با توجه به تفاوت در روش ساخت شرکت‌های مختلف تولیدکننده غلاف، نیاز به بررسی تنش‌های باقی‌مانده و کاهش میزان کسر هیدرید احساس می‌شود که این تنش‌ها با استفاده از روش‌های مختلف اندازه‌گیری شدند. در تحقیق قبلی [۱۱] تنش‌های باقی‌مانده در نمونه ورق نورد شده آلیاژ Zr-1Nb مورد بررسی قرار گرفت و کسر هیدرید نیز در نمونه‌های لوله بدون شیار بررسی شد. در این مقاله سعی شده است تا تأثیر آزادسازی تنش‌های باقی‌مانده بر میزان و توزیع کسر هیدرید شعاعی در امتداد ضخامت نمونه مورد بررسی قرار گیرد و هم‌چنین تنش‌های باقی‌مانده در این نمونه‌ها اندازه‌گیری شود که این موضوع در تحقیقات گذشته بررسی نشده است.

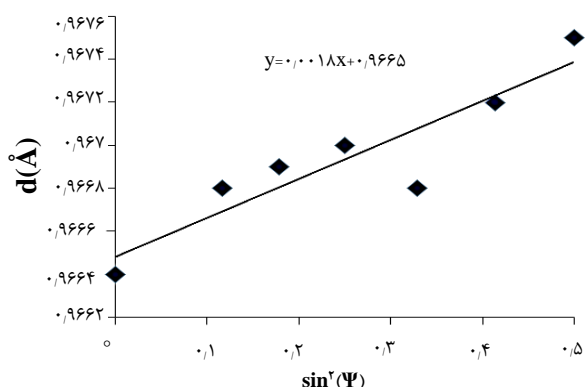
۲. مواد و روش آزمون

در این تحقیق لوله ساخته شده از جنس آلیاژ Zr-1Nb با قطر خارجی ۹ میلی‌متر و ضخامت 0.686 میلی‌متر به‌منظور بررسی تنش‌های باقی‌مانده و کسر هیدرید مورد استفاده قرار گرفت. سه نمونه با شرایط مختلف شامل قبل از آنیل (BA)، بعد از آنیل (AA)، بعد از هم‌راستاسازی (AS) و روسی (R) تهیه شد. روندنمای نمونه‌سازی و انجام این تحقیق به‌صورت خلاصه در نمودار شکل ۱ بیان شده است.





شکل ۳. نمودار $d\text{-sin}^2\Psi$ برای نمونه AA.



شکل ۴. نمودار $d\text{-sin}^2\Psi$ برای نمونه AS.

با توجه به شکل ۲ و در نظر گرفتن تاریخچه ساخت نمونه (انجام عملیات پیلگر)، بدیهی است تنش‌های باقی‌مانده موجود در نمونه، دارای ماهیت کششی باشند. به دلیل شیب مثبت نمودار $d\text{-sin}^2\Psi$ (شکل ۲)، ماهیت تنش‌های باقی‌مانده موجود در نمونه BA کششی مشخص شد. از این‌رو، تنش‌های باقی‌مانده در این نمونه، دارای مقدار 121 ± 20 مگاپاسکال با ماهیت کششی اندازه‌گیری شد. هرچه غیریکنواختی کرنش اعمالی (ناشی از عملیات پیلگر) بیش‌تر باشد، میزان تنش‌های باقی‌مانده و همچنین میزان کسر هیدرید بیش‌تر خواهد شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش‌های باقی‌مانده و کسر هیدرید در این نمونه، دلالت بر غیریکنواختی توزیع کرنش در عملیات پیلگر دارد. دلیل این موضوع تمرکز تنش در غلته‌های نورد ذکر شده است [۱۳]. هم‌چنین غیریکنواختی توزیع کرنش بعد از هر مرحله پیلگر نیز موجب ایجاد و افزایش تنش‌های باقی‌مانده شده است [۱۴، ۱۵]. انتظار می‌رود انجام عملیات آنیل، کاهش چشمگیر تنش‌های باقی‌مانده را به‌همراه داشته باشد.

همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است، شیب نمودار $d\text{-sin}^2\Psi$ ، مقدار زیادی نسبت به نمونه کد BA (شکل ۲)

$$\sigma = \frac{Et}{1+\nu^2} \left(\frac{D_f - D_0}{D_f D_0} \right) \quad (2)$$

در رابطه ۲، σ تنش باقی‌مانده، E مدول یانگ، ν نسبت پواسن، t ضخامت لوله، D_0 قطر اولیه لوله قبل از برش و D_f قطر نهایی لوله بعد از برش می‌باشد. مطابق استاندارد، اگر D_f پس از ایجاد شیار بیش از D_0 باشد، سطح نمونه دارای تنش‌های باقی‌مانده با ماهیت کششی است و اگر D_f پس از ایجاد شیار کم‌تر از D_0 باشد، سطح لوله دارای تنش‌های باقی‌مانده فشاری است. براساس این استاندارد، توزیع تنش‌های باقی‌مانده و مقدار این تنش‌ها در کل ضخامت، مشخص می‌شود.

به‌منظور بررسی میزان کسر هیدرید، نمونه‌های مورد نظر در شرایط بدون شیار و دارای شیار، در ابتدا مطابق استاندارد ASTM B۸۱۱ هیدروژن‌دهی شدند و پس از آن میزان کسر هیدرید شعاعی اندازه‌گیری شد.

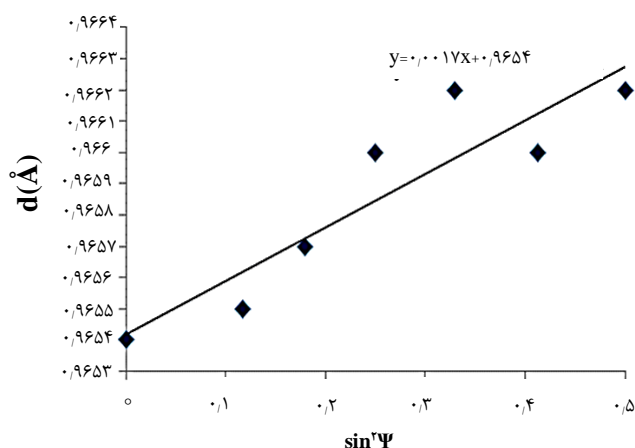
۳. نتایج و بحث

۳.۱ بررسی تنش‌های باقی‌مانده

۳.۱.۱ روش XRD

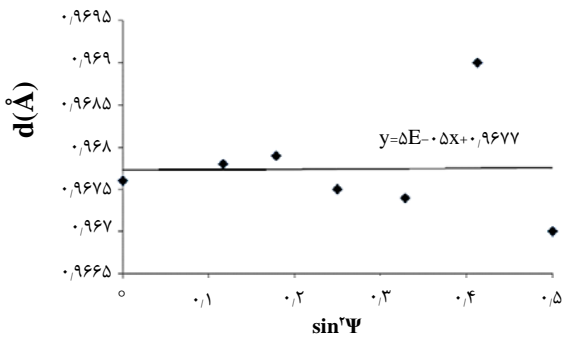
الف) لوله‌های بدون شیار

بررسی تنش‌های باقی‌مانده با استفاده از روش XRD روی سه لوله با شرایط مختلف تولید شامل BA، AA و AS و نمونه شیار زده شده (در شرایط AS) انجام شد. نتایج اندازه‌گیری تنش‌های باقی‌مانده در نمونه‌های کد BA، AA و AS مطابق شکل‌های ۲ تا ۴ می‌باشد.

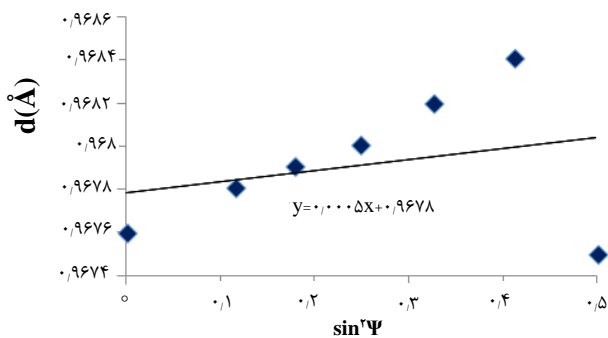


شکل ۲. نمودار $d\text{-sin}^2\Psi$ برای نمونه BA.





شکل ۶. نمودار $d-\sin^2\Psi$ برای نمونه AA-Cut.



شکل ۷. نمودار $d-\sin^2\Psi$ برای نمونه AS-Cut.

همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است، با ایجاد شیار در نمونه، شیب نمودار به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد که باعث کاهش تنش‌های باقی‌مانده در نمونه شده است. تنش‌های باقی‌مانده پس از ایجاد شیار در نمونه، 78 ± 20 مگاپاسکال با ماهیت کششی محاسبه شدند. ذکر شده است که ایجاد شیار در نمونه‌های لوله، باعث تغییر در توزیع تنش‌های باقی‌مانده می‌شود و تغییر تنش‌های باقی‌مانده در نمونه BA-Cut ناشی از تغییر در توزیع تنش‌های باقی‌مانده پس از ایجاد شیار است [۱۷]. مشاهده شد که با ایجاد شیار، مقدار زیادی از تنش‌های نوع ۱ آزاد شده است و تنش‌های نوع ۲ و ۳ در نمونه باقی می‌مانند.

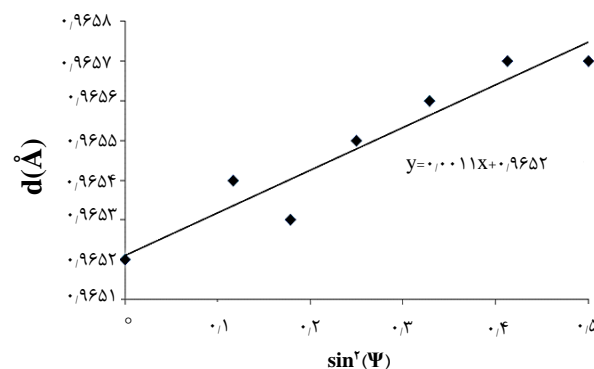
مطابق شکل ۶، شیب منحنی $d-\sin^2\Psi$ نسبت به نمودار شکل ۵ پس از ایجاد شیار، کاهش بیشتری داشته است. دلیل کاهش بیشتر شیب منحنی نمودار شکل ۶، کاهش تنش‌های باقی‌مانده با استفاده از انجام عملیات آنیل و شیارزنی (روش مکانیکی) می‌باشد. عملیات آنیل تبلور مجدد چه در نمونه‌های بدون شیار و چه در نمونه‌های شیار زده شده، منجر به کاهش تنش‌های باقی‌مانده شده است. تنش‌های باقی‌مانده در نمونه AA، به میزان $3/5 \pm 20$ مگاپاسکال با ماهیت کششی محاسبه شدند.

کاهش یافته است که مسلماً منجر به کاهش تنش‌های باقی‌مانده شده است. تنش‌های باقی‌مانده در این نمونه برابر 78 ± 20 مگاپاسکال با ماهیت کششی، اندازه‌گیری شد. مشاهده شد که عملیات آنیل در دمای 580°C و به مدت زمان ۴ ساعت، باعث کاهش چشمگیر تنش‌های باقی‌مانده شده است. پس از عملیات آنیل، عملیات هم‌راستاسازی لوله‌ها انجام می‌شود. از طرفی مشخص شده است که با افزایش مدت زمان آنیل به بیش از ۴ ساعت، تغییرات بافت کریستالی در این آلیاژ متوقف می‌شود [۱۶].

همان‌طور که از شکل ۴ مشاهده شد، توزیع تنش‌های باقی‌مانده در نمونه با کد AS، نسبت به نمونه با کد AA غیریکنواخت است. شیب نمودار $d-\sin^2\Psi$ نسبت به نمودار کد AA بیش‌تر شده است که ناشی از تغییر شکل سرد لوله‌ها (هم‌راستاسازی) می‌باشد. تنش‌های باقی‌مانده در این نمونه دارای میزان 128 ± 20 مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، افزایش تنش‌های باقی‌مانده با ماهیت کششی، باعث افزایش میزان کسر هیدرید می‌شود. انجام عملیات هم‌راستاسازی در دمای محیط و هم‌چنین توزیع کرنش غیریکنواخت منجر به این امر شده است. همان‌طور که ذکر شد احتمالاً به دلیل افزایش انرژی لازم برای تحرک نابه‌جایی‌ها در دمای محیط، تنش‌های باقی‌مانده دارای مقدار بیش‌تری می‌باشد.

(ب) لوله‌های شیارزده

به منظور بررسی میزان آزادسازی تنش با استفاده از ایجاد شیار و میزان تنش‌های باقی‌مانده در نمونه پس از ایجاد شیار، نمونه‌ها در سه شرایط تولیدی AA، AS و BA شیارزده شده و پس از آن آزمون XRD به منظور بررسی تنش‌های باقی‌مانده انجام شد. نتیجه این آزمون‌ها در شکل‌های ۵ الی ۷ آمده است.



شکل ۸. نمودار $d-\sin^2\Psi$ برای نمونه BA-Cut.

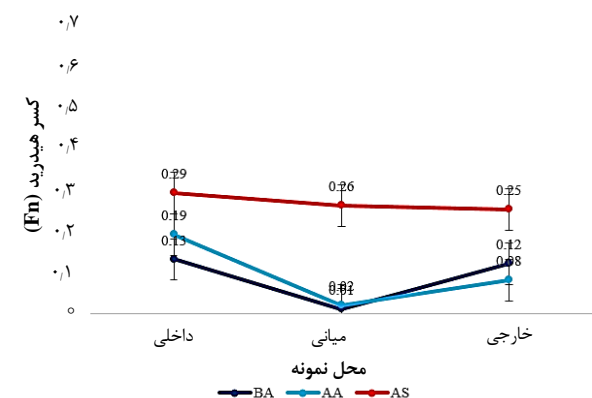


به‌منظور بررسی تأثیر آزادسازی تنش‌های باقی‌مانده بر جهت‌گیری هیدریدها، در لوله‌های شیار زده شده از جنس آلیاژ $Zr-1\%Nb$ ، مطابق استاندارد ASTM B۸۱۱ هیدروژن‌دهی شدند و سپس سپس میزان کسر هیدرید در این نمونه‌ها مطابق این استاندارد بررسی شد. نتایج کسر هیدرید تمامی نمونه‌ها بیان گر توزیع متنوع تنش‌های باقی‌مانده در سطح و داخل نمونه می‌باشد. تنش‌های باقی‌مانده در سطح داخلی نمونه دارای ماهیت فشاری و در سطح خارجی نمونه دارای ماهیت کششی هستند. نتایج بررسی کسر هیدرید در نمونه‌های شیارزنی شده مطابق شکل ۹ می‌باشد.

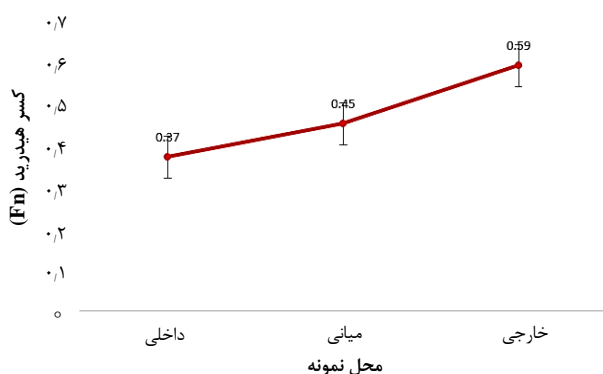
توزیع تنش‌های باقی‌مانده و کسر هیدرید در نمونه‌ها قبل از برش و پس از برش متفاوت خواهد بود [۱۷]. در طی برش نمونه‌ها، توزیع تنش‌های باقی‌مانده از حالت خطی خارج می‌شود. به همین صورت، توزیع کسر هیدرید پس از برش نیز مطابق شکل ۹، می‌شود.

۲.۳ بررسی کسر هیدرید

به‌منظور بررسی تأثیر تشکیل هیدرید بر تنش‌های باقی‌مانده، در ابتدا نمونه در شرایط AS هیدروژن‌دهی شد و میزان کسر هیدرید آن اندازه‌گیری شد. نتایج این اندازه‌گیری در شکل ۱۰ گزارش شده است.



شکل ۹. تأثیر آزادسازی تنش بر کسر هیدرید.



شکل ۱۰. میزان کسر هیدرید در امتداد ضخامت نمونه AS.

از شکل ۷ مشخص است که شیب نمودار $d \cdot \sin^2 \Psi$ پس از ایجاد شیار، افزایش داشته است. با افزایش میزان شیب نمودار، متعاقباً تنش‌های باقی‌مانده نیز، افزایش می‌یابند. تنش‌های باقی‌مانده در این نمونه به میزان 35 ± 20 مگاپاسکال با ماهیت کششی اندازه‌گیری شد. تنش‌های باقی‌مانده به دلیل ماهیت قفل‌بودن این تنش‌ها و همچنین انجام عملیات هم‌راستاسازی، پس از ایجاد شیار نیز در داخل قطعه باقی‌مانده‌اند. افزایش تنش‌های باقی‌مانده در این نمونه می‌تواند به دلیل تاریخچه ساخت این نمونه (عملیات هم‌راستاسازی) باشد و با توجه به این که این عملیات در دمای محیط انجام شده است، انرژی لازم جهت تحرک نابه‌جایی‌ها در این شرایط بیشتر شده و احتمال این موضوع را قوی‌تر می‌کند.

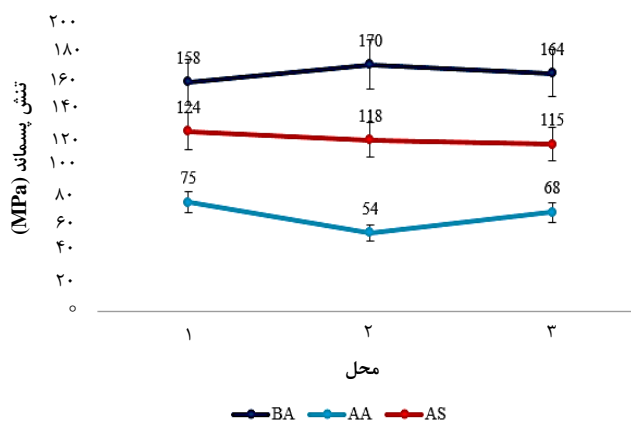
۲.۱.۳ روش شیارزنی

ابعاد نمونه قبل و پس از عملیات شیارزنی، در جدول ۱ گزارش شده است.

اندازه‌گیری تنش‌های باقی‌مانده در لوله‌های ساخته شده از جنس آلیاژ $Zr-1\%Nb$ در سه حالت تولیدی مختلف، مطابق استاندارد ASTM E۱۹۲۸ و با استفاده از داده‌های جدول ۱ انجام شد و نتایج آن به صورت خلاصه در شکل ۸ نشان داده شده است.

جدول ۱. مقدار D_f و D_0 برای نمونه‌های مورد بررسی

کد نمونه	D_0 (mm)	D_f (mm)
BA	۹,۱۸۸	۹,۳۵۰
AA	۹,۱۷۶	۹,۳۳۹
AS	۹,۱۷۷	۹,۲۹۶



شکل ۸. نتایج اندازه‌گیری تنش‌های باقی‌مانده با روش شیارزنی.



3. N.A.P.K. Kumar, *Hydride formation in Zirconium alloys*, McGill University, Montreal, (2011).
4. D. Hardie, M.W. Shanahan, *The effect of residual stresses on hydride orientation in Zirconium-2.5% Niobium Alloy*, *J. Nucl. Mater.*, **50**, 40 (1974).
5. Hideo Maki, M. Ooyama, *Behavior of Zircaloy fuel cladding tubes*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **13**, 43 (1976).
6. R.K. Singh, et al, *Residual stresses in Indian pressurized heavy water reactor*, *SMiRT14, BLDW/16* (Lyon, France), 17-22 (1997).
7. K. Kapoor, et al, *X-ray measurement of near surface residual stress in textured cold-worked stress-relieved Zr-2.5%Nb pressure tube material*, *J. Nucl. Mater.*, **303**, 147 (2002).
8. Igor Matsegorin, et al, *Studies on the Stress-strain State of Spacer Grids and Claddings*, *Structural Mechanics in Reactor Technology*, *SMiRT*, 17, (Prague, Czech Republic), (2003).
9. L.B. Zuev, B.S. Semukhin, S.Yu. Zavodchikov, *Deformation localization and internal residual stresses in billets for Zr-Nb pipe rolling*, *Mater. Lett.*, **57**, 1015 (2002).
10. D. Gloaguen, et al, *Examination of residual stresses and texture in zirconium alloy cladding tubes after a large plastic deformation: Experimental and numerical study*, *J. Nucl. Mater.*, **374**, 138 (2008).
11. S.A. Miresmaeili Hafdani, et al, *The effect of residual stress on hydride fraction of Zr-1%Nb alloy*, *iMAT Conference*, (2020) (In Persian).
12. M.E. Fitzpatrick, et al, *Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction – Issue 2*, (Teddington, Middlesex, United Kingdom, 2008).
13. R.K. Singh, et al, *Residual stresses in Indian pressurized heavy water reactor*, *14th International conference on structure mechanics in reactor technology (SMiRT14)*, Lyon, France, 17-22 (1997).
14. N.A.P. Kiran Kumar, *EBSD studies on microstructure and crystallographic orientation of δ -hydrides in zircaloy-4, Zr-1Nb and Zr-2.5Nb*, *Mater. Sci. Eng. A*, **528**, 6366–6374 (2015).
15. D. Gloaguen, et al, *Examination of residual stresses and texture in zirconium alloy cladding tubes after a large plastic deformation: Experimental and numerical study*, *J. Nucl. Mater.*, **374**, 138-146 (2008).
16. S.V. Ivanova, et al, *Research of the texture and residual stress in E110 after surface modification and hydrogen exposure*, *J. Physics*, *13th International Conference on Films and Coatings*, 857 (2017).
17. H.K. Namburi, et al, *Study of the creep and hydride Re-Orientation behavior in E110 Fuel cladding at Dry storage conditions*, *Int. J. Contemp. Energy*, 4 (2018).
18. W. Qin, et al, *Intergranular δ -hydride nucleation and orientation in zirconium alloys*, *Acta Mater.*, **59**, 7010 (2011).

آزمون کسر هیدرید بیانگر این است که میزان کسر هیدرید از سطح داخل به سطح خارجی (در امتداد ضخامت) افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع از نتایج روش شیارزنی مشخص می‌شود که روی سطح خارجی نمونه، تنش‌های باقی‌مانده با ماهیت کششی و در سطح داخل، تنش‌های باقی‌مانده با ماهیت فشاری وجود دارند. همان‌طور که قبلاً بیان گردید، تنش‌های باقی‌مانده با ماهیت کششی، سعی در افزایش انرژی مرز دانه‌ها دارند و تشکیل هیدرید باعث کاهش انرژی مرز دانه می‌شود [۱۸]. هم‌چنین همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود با افزایش میزان تنش (در فرایندهای تولید) در داخل قطعات، میزان کسر هیدرید افزایش می‌یابد. افزایش کسر هیدرید در قطعات منجر به تقلیل خواص مکانیکی مانند نرمی می‌شود. نمونه AS با استفاده از دستگاه EDM شیار زده شد و تنش‌های باقی‌مانده پس از ایجاد شیار با استفاده از روش شیارزنی بررسی شدند. پس از بررسی میزان کسر هیدرید در این حالت، مشاهده شد که تقریباً ۵ مگاپاسکال تنش باقی‌مانده با ماهیت کششی در داخل نمونه وجود دارد. نتایج بیانگر این است که تمامی تنش‌های باقی‌مانده در نمونه آزاد نمی‌شوند (تنش‌های باقی‌مانده نوع ۲ و ۳) و فقط مقداری از آن‌ها آزاد می‌شوند (تنش‌های باقی‌مانده نوع ۱). این نتایج، داده‌های حاصل از روش XRD را تأیید کرده است [۱۷].

۴. نتیجه‌گیری

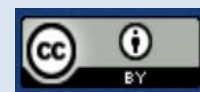
تنش‌های باقی‌مانده در نمونه‌های لوله با استفاده از روش‌های مختلف شامل XRD و شیارزنی بررسی شد. تنش‌های باقی‌مانده در نمونه‌های AA، BA، AS و بدون شیار، به ترتیب برابر، 121 ± 20 ، 78 ± 20 و 128 ± 20 می‌باشد. پس از ایجاد شیار تنش‌های باقی‌مانده در نمونه‌های AA، BA، AS به ترتیب به میزان ۵۵، ۹۵ و ۷۲ درصد کاهش داشته است. میزان کسر هیدرید در نمونه‌های AA، BA، AS بدون شیار به ترتیب برابر با ۰/۳۶، ۰/۳۳ و ۰/۵۹ است که پس از ایجاد شیار، توزیع و میزان کسر هیدرید به صورت چشمگیری کاهش یافته است.

مراجع

1. N. Mahmut, Cinbinz and D.A. Koss and A. T. Mutta, *The influence of stress state on the reorientation of hydrides in a zirconium alloys*, *J. Nucl. Mater.*, **477**, 157 (2016).
2. Yoon-Soo Lim, Hyun-Gil Kim, Yong-Hwan Jeong, *Recrystallization behavior of Zr-xNb alloys*, *Mater. Trans.*, **49**, 1702 (2008).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

سیداکبر میراسمعیلی هفدانی، محسن اسدی اسدآباد، غلامحسین برهانی (۱۴۰۱)، بررسی تحولات تنش باقی‌مانده و تشکیل فاز مخرب هیدرید در مراحل تولید آلیاژ Zr-1Nb، ۷۱-۶۵، DOI: 10.24200/nst.2022.1448

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1448.html

