



تأثیر عامل‌های فرایندی بر ریزساختار و سختی جوش مقاومتی نقطه‌ای آلیاژ Zr-1%Nb

حمیدرضا ادیب‌زاده^۱، محسن اسدی اسدآباد*^۲، علیرضا اعلائی^۳

۱. دانشکده‌ی مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، صندوق پستی: ۵۱۷، نجف‌آباد - ایران

۲. شرکت سوخت رآکتورهای هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۹۵۷-۸۱۴۶۵، اصفهان - ایران

۳. پژوهشکده‌ی مواد، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۹-۸۱۴۶۵، اصفهان - ایران

چکیده: تأثیر پارامترهای فرایندی شامل جریان جوش و نیروی الکتروود بر ریزساختار جوش مقاومتی نقطه‌ای ورق آلیاژ Zr-1%Nb به ضخامت ۰/۳ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی ریزسختی مقطع دکمه‌ی جوش در راستای قطر دکمه‌ی جوش، اندازه‌گیری سختی برحسب ویکرز بر روی فلز پایه، منطقه‌ی حرارت دیده و دکمه‌ی جوش برای نمونه‌هایی که با پارامترهای مختلف جوشکاری شده بودند، انجام شد. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که افزایش جریان سبب درشت‌تر شدن دانه‌ها می‌شود. از جمله‌ی مشاهده‌های مهم در این مطالعه بزرگ شدن اندازه‌ی دانه در اثر افزایش نیروی الکتروود در زمان جوشکاری یکسان بود. در تصویرهای وابسته به فلزنگاری مشاهده شد که در اثر اعمال نیروی الکتروود بیش‌تر، دانه‌ها به صورت طولی در راستای جریان حرارت تغییر شکل می‌دهند. اندازه‌گیری سختی منطقه‌های جوش و فلز پایه نیز نشان داد که دکمه‌ی جوش بیش‌ترین میزان سختی را دارد و این میزان در منطقه‌ی حرارت دیده و فلز پایه به ترتیب، کاهش می‌یابد. این تفاوت به دلیل تغییرهای فازی β و $\alpha+\beta$ است. تغییر حالت از فاز β به α به وسیله‌ی فرایند نفوذ توده‌ای و تشکیل ساختار ویدمن‌اشتن α ، که بر اثر آهسته سرد شدن به وجود خواهد آمد، انجام می‌پذیرد. ساختار موردنظر سخت‌تر و دارای استحکام بیش‌تری از ریزساختار α هم‌محور فلز پایه است.

کلیدواژه‌ها: جوش مقاومتی نقطه‌ای، آلیاژ زیرکونیومی، Zr-1%Nb، ریزساختار

Effect of process parameters on microstructure and microhardness of resistance spot welding in Zr-1%Nb alloy

H.R. Adibzadeh^{1,2}, M. Asadi Asadabad*³, A.R. Alaei¹

1. Department of Materials Engineering, Islamic Azad University, Najafabad Branch, P.O.Box: 517, Najafabad - Iran

2. Nuclear Reactors Fuel Company, P.O.Box: 81465-1957, Esfahan - Iran

3. Materials Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 81465-1589, Esfahan - Iran

Abstract: In this study, the effects of process parameters including weld current and electrode force on the microstructure of resistance spot welding on Zr-1%Nb alloy sheets of 0.3mm thickness were investigated. In the microhardness investigation of the weld nugget cross section, the Vickers hardness measurement was performed in the direction of the weld nugget diameter on a base metal, HAZ, and weld nugget for the welded specimens with different parameters. Applying more electrode force in the same welding time yielded the grain growth which was found to be an important observation in this study. In the metallographic images, it was observed that the grains were deformed to be longer in the heat flow direction when more electrode force was applied. The hardness measurement of the weld zones and base metal showed that, the weld nugget had a maximum amount of hardness where it decreased in HAZ and subsequently in the base metal. This difference is due to transformation of the $\alpha+\beta$ and β phases. Transformation from β to α phase, which was carried out by a massive diffusion process and formation of the Widmanstätten α structure was achieved by slow cooling. The mentioned structure was found to be harder and stronger than the equiaxed α microstructure of the weld metal.

Keywords: Resistance spot welding, Zr-1%Nb alloy, Microstructure

*email: asadimohsen@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۹/۹



۱. مقدمه

الکتریکی در کسری از ثانیه باعث افزایش دما و در نتیجه موجب تولید یک دکمه‌ی مذاب در زیر الکتروود می‌شود. مادامی که جریان از فلز عبور می‌کند، دکمه‌ی مذاب رشد می‌کند و با قطع جریان، دکمه‌ی مذاب منجمد می‌شود، که اصطلاحاً به آن دکمه‌ی جوش گفته می‌شود. برطبق قانون ژول ($Q=I^2Rt$)، که در آن $Q(J)$ گرمای تولید شده، $I(A)$ جریان، $R(\Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1} \text{ X}^{-1})$ مقاومت الکتریکی نمونه، $t(s)$ زمان است، افزایش جریان و زمان عبور آن و افزایش مقاومت فلز، باعث بالا رفتن گرمای ورودی و در نتیجه بزرگ شدن اندازه‌ی دکمه‌ی جوش می‌شود؛ لذا اندازه‌ی دکمه‌ی جوش بستگی به جنس فلز، جریان الکتریکی و زمان عبور آن و هم‌چنین هندسه‌ی الکتروود دارد که به این مرحله زمان جوشکاری^(۱) گویند. در مرحله‌ی آخر که به آن زمان درنگ^(۳) گفته می‌شود، جریان قطع می‌شود اما اعمال فشار ادامه پیدا می‌کند [۴، ۵، ۶].

جوش مقاومتی نقطه‌ای یک فرایند گرمایی، متالورژیکی و مکانیکی است که نتیجه‌ی آن یک ناحیه‌ی مذاب به نام دکمه‌ی ذوبی است که پس از انجماد به این ناحیه دکمه‌ی جوش اطلاق می‌شود. اطراف دکمه‌ی جوش منطقه‌ی حرارت دیده است که نوع و اندازه‌ی ریزساختار آن به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر گرمای ورودی است.

در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای زیرکنیم، آماده‌سازی سطح برای جلوگیری از آلوده شدن جوش حایز اهمیت است، اما به دلیل نرخ گرمایش بالا و انجام جوشکاری در کسری از ثانیه احتمال آلوده شدن جوش به اکسیژن و نیتروژن کم است. به علاوه سطح فلزی که حین جوشکاری در تماس با اتمسفر است دارای درجه‌ی حرارت نسبتاً پایینی است و ناحیه‌ی ذوبی در زیر سطح قرار دارد که احتمال آلودگی آن کم است ولی بررسی‌ها نشان می‌دهد جوش‌هایی که در مجاورت اتمسفر خنثی انجام شده‌اند از کیفیت بالاتری برخوردارند [۱، ۶].

۲. بخش تجربی

در این مطالعه نمونه‌هایی از ورق به ابعاد تقریبی $100 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ از جنس آلیاژ Zr-1\%Nb تهیه شدند. ورق‌ها قبل از جوشکاری به منظور از بین بردن لایه‌ی اکسیدی با ترکیب ۱۰٪ وزنی HF با خلوص ۷۰٪، ۶۰٪ وزنی

زیرکنیم و آلیاژهای آن در صنایع شیمیایی، صنایع هسته‌ای، ابررساناها و ... کاربرد دارند. به دلیل تشکیل لایه‌ی اکسیدی مقاوم، زیرکنیم و آلیاژهای آن در محیط اسیدهای آلی و معدنی و قلبیایی مقاوم‌اند و مقاومت در برابر خوردگی از مهم‌ترین ویژگی آن‌ها است. کاربرد زیرکنیم در صنعت هسته‌ای به دلیل سطح مقطع جذب نوترونی پایین آن است. هم‌چنین رسانایی گرمایی بالا، شکل‌پذیری، استحکام مکانیکی بالا و حداقل رفتار خزشی در درجه حرارت‌های بالا، از ویژگی‌های این آلیاژ است. در این آلیاژ اکسیژن و نیتروژن قابل حل‌اند که هر دو موجب بالا رفتن استحکام کششی و پایین آمدن انعطاف‌پذیری آن می‌شوند. زیرکنیم خالص تجارتي تابکاری شده دارای استحکام کششی حدود ۶۰ ksi، مقاومت تسلیم کششی ۴۰ ksi و درصد ازدیاد طول ۱۸٪ است.

جوشکاری زیرکنیم و آلیاژهای آن به سادگی انجام‌پذیر است. پایین بودن ضریب انبساط گرمایی موجب پیچیدگی کم آن حین جوشکاری می‌شود. به علاوه به دلیل ضریب کشسانی پایین، پس از جوشکاری، تنش‌های باقی‌مانده‌ی کم‌تری در این آلیاژ به وجود می‌آید. متداول‌ترین روش جوشکاری آلیاژهای زیرکنیم، جوش آرگون یا تیگ (TIG)، پلاسما، جوشکاری پرتوالکترونی، جوشکاری لیزر و جوش مقاومتی نقطه‌ای است. کیفیت جوش آلیاژهای Zr-Nb بستگی زیادی به جذب نیتروژن و اکسیژن دارد، لذا اتمسفر محافظه‌ی جوش باید به لحاظ اکسیژن، نیتروژن و رطوبت کنترل شود [۱، ۲].

جوش مقاومتی نقطه‌ای در اتصال‌های ورق‌های فلزی به کار می‌رود. این فرایند برای فولادهای کربنی ساده متداول است. علاوه بر آن جوش مقاومتی نقطه‌ای برای فولادهای کم-آلیاژ، فولادهای زنگ‌نزن، نیکل، آلومینیم، تیتانیم و مس تجارتي کاربرد دارد [۳]. در این مطالعه جوش مقاومتی نقطه‌ای برای ورق آلیاژ Zr-1\%Nb مورد بررسی قرار گرفته است.

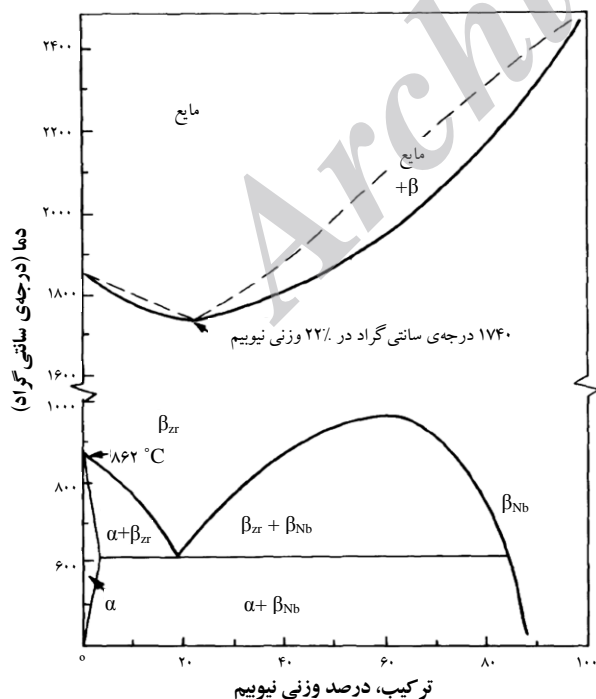
در فرایند جوش مقاومتی نقطه‌ای سه مرحله وجود دارد. در مرحله‌ی اول قبل از اعمال جریان الکتریکی، به وسیله‌ی الکتروودهای مسی، قطعه‌ی کار به طور موضعی فشرده شده و در اثر این فشرده‌گی شکستگی لایه‌ی اکسیدی به وجود می‌آید که به این مرحله زمان فشرده‌گی^(۱) گویند. در مرحله‌ی بعد، عبور جریان

۳. نتایج و بحث

۱.۳ بررسی ریزساختار جوش مقاومتی نقطه‌ای آلیاژ Zr-۱٪Nb

دمای تغییر فاز زیرکینیم $870 \pm 5^\circ\text{C}$ است. تغییر حالت فاز تحت تأثیر اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن است. با افزایش انحلال‌پذیری اکسیژن، دمای ذوب افزایش می‌یابد به طوری که در ۵/۵ درصد وزنی اکسیژن، دمای ذوب 1975°C است. فاز (غیرآلیاژی) آلفا زیرکینیم در دمای پایین تشکیل می‌شود و ساختار بلوری آن شش گوشه‌ی فشرده (HCP) است و در دمای $870 \pm 5^\circ\text{C}$ به فاز بتا با ساختمان بلوری مکعب مرکز پُر (BCC) تغییر حالت می‌دهد. در آلیاژهای Zr-Nb، نیویوم موجب بهبود خواص مکانیکی، بهبود خواص مقاومت در برابر خوردگی و بالا رفتن مقاومت در برابر صدمات پرتویی می‌شود.

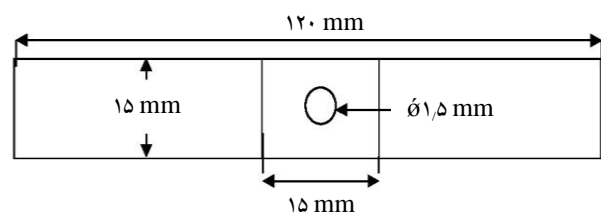
شکل ۲ نمودار فازی آلیاژ Zr-Nb را نشان می‌دهد. این نمودار تأثیر مقدار نیویوم بر روی پایداری فاز مکعبی مرکز پُر (BCC) β_{Zr} را نشان می‌دهد. حداکثر انحلال‌پذیری نیویوم در زیرکینیم α در درجه حرارت یونکتیوید (حدود 615°C) است. در ناحیه‌ی با دمای بالا، α و یا پرلیت به وجود می‌آید. تشکیل α ، واکنش اولیه‌ای از فاز β غنی شده است که سرانجام به α اضافی و نیویوم β تغییر حالت می‌دهد. در آلیاژ Zr-۱٪Nb در دمای 710°C تا 850°C β روی مرز دانه‌های α هسته‌گذاری می‌کند به نحوی که به داخل دانه‌ها رشد می‌یابد [۱، ۲، ۷].



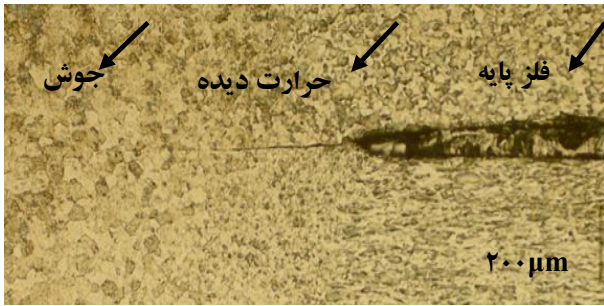
شکل ۲. نمودار فازی آلیاژ Zr-Nb [۶].

HNO_3 با خلوص ۶۵٪ و ۳۰٪ آب مقطر در دمای $50 \pm 2^\circ\text{C}$ اسیدشویی شدند. ورق‌ها با مشخصات ابعادی شکل ۱ به صورت لب به لب روی هم قرار گرفته و جوشکاری نقطه‌ای آن‌ها به وسیله‌ی دستگاه جوش نقطه‌ای با قدرت اسمی ۴۰ kVA، که دارای قابلیت تنظیم جریان و زمان و هم‌چنین مجهز به سامانه‌ی بادی تنظیم نیروی الکتروود بود، به انجام رسید. یک الکتروود مخروطی با سر کرومی شکل به شعاع ۱/۵ میلی‌متر از جنس مس-زیرکینیم-بریلیم مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش ۱۱ نمونه‌ی جوش برای بررسی ریزساختاری و اندازه‌گیری ریزسختی تهیه شد. در انجام جوش نقطه‌ای، نیروهای الکتروود ۲۰۰، ۲۲۵، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ نیوتن، زمان‌های ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ چرخه و جریان‌های ۱/۰، ۱/۳، ۱/۵، ۲/۰ و ۲/۵ آمپر انتخاب شد. سپس با دستگاه برش از وسط دکمه‌ی جوش و در امتداد ضخامت ورق، برش کاری نمونه‌ها انجام شد. ابتدا با سمباده‌ی ۱۰۰۰ و سپس با سمباده‌ی ۲۴۰۰، سمباده‌زنی سطح برش داده شده انجام شد. عملیات پولیش الکتریکی به وسیله‌ی دستگاه استروئرز لکتروپل^(۴) صورت گرفت. مخلوط متانول (۱ سهم) و بوتوکسی اتانول (۲ سهم) به همراه پرکلریک اسید ۶۰٪ به عنوان محلول الکتروولیت دستگاه پولیش الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت. ساختار نمونه‌های اچ شده با اعمال ولتاژ ۳۰ V در دمای 30°C و در زمان ۳۰ ثانیه به دست آمد. مشاهده‌های میکروسکوپی نیز با میکروسکوپ نوری المپیوس مدل جی. ایکس ۷۱، که دارای امکانات تعیین اندازه‌ی دانه و اندازه‌ی دکمه جوش است، انجام پذیرفت.

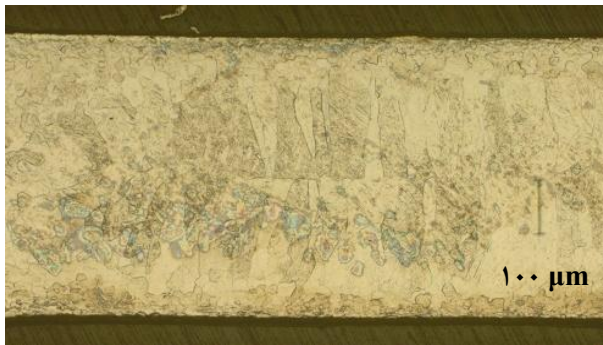
آزمون ریزسختی به وسیله‌ی دستگاه شیمادزو به روش ویکرز^(۵) و براساس استاندارد ASTM E ۹۲-۰۳ انجام شد. نمونه‌های تهیه شده، در محل مخصوص دستگاه قرار گرفتند و برای تعیین سختی منطقه‌ی جوش، منطقه‌ی حرارت دیده و فلز پایه، اندازه‌گیری ریزسختی، تحت نیروی ۵ نیوتن و در مدت زمان ۱۳ ثانیه در راستای قطر بزرگ‌تر دکمه‌ی جوش انجام شد.



شکل ۱. طرح اتصال نمونه‌های جوش نقطه‌ای.



شکل ۳. سطح مقطع جوش مقاومتی نقطه‌ای آلیاژ $Zr-1\%Nb$ ، جریان ۵٫۷ کیلوآمپر، زمان ۲ چرخه و نیروی الکتروود ۲ bar، از راست به چپ: منطقه‌ی فلز پایه، منطقه‌ی حرارت دیده و دکمه‌ی جوش.



شکل ۴. ریزساختار دکمه‌ی جوش آلیاژ $Zr-1\%Nb$ ، جریان ۱٫۳ کیلوآمپر، زمان ۳ چرخه و نیروی الکتروود ۳۰۰ نیوتن.

شکل‌های ۴ و ۵ با بزرگ‌نمایی $\times 100$ ، ریزساختار دکمه‌ی جوش را برای جریان‌های ۱٫۳ و ۲٫۵ کیلوآمپر، زمان ۳ چرخه و نیروی الکتروود ۳۰۰ نیوتن نشان می‌دهد. درشت شدن اندازه‌ی دانه از ۳۰ (شکل ۴) به $36 \mu m$ (شکل ۵) با افزایش جریان به وجود آمده است.

کومورو [۹] بررسی مشابهی را در خصوص سطح مقطع جوش پلاک انتهایی غلاف سوخت، که از جنس زیرکالوی-۲ و به روش جوش آرگون (TIG) جوشکاری شده بود، انجام داده است. در بررسی سطح مقطع جوش نشان داده شده است که ناحیه‌ی جوش دارای ساختار ویدمن‌اشانتن و شامل صفحه‌های α است که به سرعت از ناحیه‌ی β سرد شده است. ساختار ناحیه‌ی حرارت دیده نیز دارای دانه‌های درشت‌تر در مجاورت جوش بوده و ساختار آن شبیه جوش است. وی هم‌چنین نشان داده است که افزایش نیتروژن و اکسیژن در ناحیه‌ی جوش موجب کاهش جقرمگی ناحیه‌ی جوش خواهد شد.

شکل ۳ سطح مقطع جوش مقاومتی نقطه‌ای آلیاژ زیرکیم را با بزرگ‌نمایی $\times 50$ نشان می‌دهد، که در آن منطقه‌ی جوش، منطقه‌ی حرارت دیده و فلز پایه قابل مشاهده‌اند. در این ناحیه‌ها اندازه و نوع ریزساختار تحت تأثیر گرمای ورودی است. ریزساختار فلز پایه شامل دانه‌های کشیده شده در راستای نور است و بعضاً در ساختار آن دانه‌های هم‌محور ریزی مشاهده می‌شود، که پس از شکل دادن و عملیات تابکاری مجدداً متبلور می‌شوند. ساختار فلز پایه شامل $Zr-\alpha$ و شبکه‌ی بین‌دانه‌ای از فاز نیوبیم است. درشت شدن اندازه‌ی دانه‌ها در ناحیه‌ی حرارت دیده نیز به دلیل افزایش جریان است. به دلیل شیب گرمایی در این ناحیه، دانه‌های منطقه‌ی حرارت دیده‌ی مجاور دکمه‌ی جوش بزرگ‌تر و هر چه به سمت فلز پایه نزدیک‌تر شود اندازه‌ی دانه‌ها کوچک‌تر خواهد شد. ساختار ناحیه‌ی حرارت دیده با سرد شدن از ناحیه‌ی $\alpha+\beta$ به وجود آمده است. تغییر ساختار از داخل منطقه‌ی حرارت دیده به طرف منطقه‌ی ذوبی است. ساختار منطقه‌ی حرارت دیده شامل $Zr-\alpha$ اولیه در زمینه‌ی فاز β تغییر حالت یافته (غیرمارتنیتی) است. منطقه‌ی جوش و منطقه‌ی حرارت دیده‌ی مجاور آن شامل زمینه‌ی α از نوع ویدمن‌اشانتن^(۶) با یک فاز مرزدانه‌ای ضخیم α ، با نام فاز α^* (نفوذ توده‌ای)^(۷) است [۸].

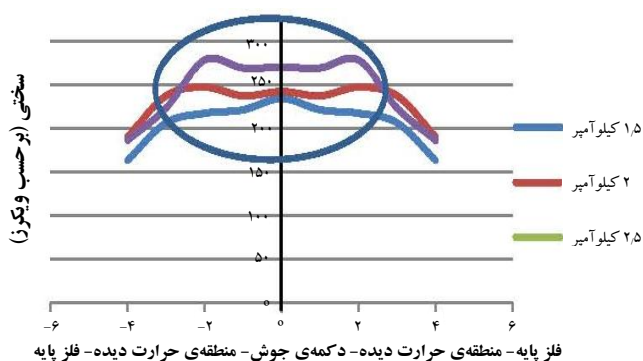
شکل ۴ ساختار ستونی منطقه‌ی دکمه‌ی جوش را با بزرگ‌نمایی $\times 100$ نشان می‌دهد. ساختار ناحیه‌ی جوش غالباً به صورت ستونی است، که آرایش آن‌ها در راستای جریان حرارت^(۸) است. این نوع ریزساختار به شدت تحت تأثیر جریان جوش است. ریزساختار ناحیه‌ی جوش تفاوت زیادی با ریزساختار فلز پایه دارد و این تفاوت به دلیل تغییر فاز β و $\alpha+\beta$ است. یک تفاوت عمده به دلیل حضور ساختار دانه-درشت β تغییر حالت یافته در مقایسه با ساختار دانه-ریز، در فلز پایه است. این درشتی دانه ناشی از افزایش سریع در اندازه‌ی دانه‌های β اولیه است که در اثر چرخه‌ی جوشکاری به وجود آمده است. حین سرد شدن، دانه‌های β به α تبدیل شده و اندازه‌ی دانه هم‌چنان درشت می‌ماند [۸].



شکل ۶. ریزساختار دکمه‌ی جوش آلیاژ Zr-1%Nb، جریان ۱٫۳ کیلوآمپر، زمان ۳ چرخه و نیروی الکتروود ۳۵۰ نیوتن.



شکل ۵. ریزساختار دکمه‌ی جوش آلیاژ Zr-1%Nb، جریان ۲٫۵ کیلوآمپر، زمان ۳ چرخه و نیروی الکتروود ۳۰۰ نیوتن.



شکل ۷. تغییر ریزسختی در راستای دکمه‌ی جوش، منطقه‌ی حرارت دیده و فلز پایه برای جریان‌های ۱٫۵، ۲، و ۲٫۵ کیلوآمپر (زمان ۳ چرخه و نیروی الکتروود ۲۵۰ نیوتن).

شکل ۸ تغییر سختی در فلز پایه، منطقه‌ی حرارت دیده و در راستای دکمه‌ی جوش را برای نمونه‌هایی که در زمان‌های ۲، ۴، ۵ و ۶ چرخه، با جریان ۱٫۳ کیلوآمپر و نیروی الکتروود ۲۵۰ نیوتن جوشکاری شده‌اند، نشان می‌دهد. در ناحیه‌ی دکمه‌ی جوش تغییر زمان تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقدار سختی نداشته است. در منطقه‌ی حرارت دیده به ویژه برای زمان ۶ چرخه (که در آن منطقه حرارت دیده فرصت بیشتری برای تغییر ریزساختار داشته است) افزایش سختی در ناحیه‌ی حرارت دیده در مجاورت دکمه‌ی جوش مشهود است. این افزایش به دلیل ریزساختار ویدمن‌اشاتن در ناحیه‌ی حرارت دیده است که با نزدیک شدن به فلز پایه افت قابل ملاحظه‌ای در میزان سختی به وجود می‌آید.

شکل ۹ تغییر سختی در فلز پایه، منطقه‌ی حرارت دیده و در راستای دکمه‌ی جوش نمونه‌هایی را که با نیروی الکتروود ۲۰۰، ۲۲۵، ۳۰۰ و ۳۵۰ نیوتن، جریان ۱٫۳ کیلوآمپر و زمان ۳ چرخه جوشکاری شده‌اند، نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در دکمه‌ی جوش، تغییر نیروی الکتروود تأثیری بر میزان سختی نداشته است. افزایش میزان سختی در منطقه‌ی حرارت دیده نشان

از جمله‌ی مشاهده‌های مهم در این مطالعه بزرگ شدن اندازه‌ی دانه در اثر افزایش فشار است. رشد دانه‌ها در اثر اعمال نیروی بیش‌تر به دلیل بالا رفتن گرمای ورودی به قطعه‌ی کار است. ریزساختار شکل ۶ با بزرگ‌نمایی $100\times$ در اثر اعمال نیروی ۳۵۰ نیوتن در جریان ثابت ۱٫۳ کیلوآمپر و زمان ۳ چرخه است. در مقایسه با ریزساختار شکل ۴، با وجود آن که زمان جوشکاری و جریان در هر دو یکسان است با افزایش نیروی الکتروود از ۳۰۰ به ۳۵۰ نیوتن، اندازه‌ی دانه از ۳۶ به $56\ \mu\text{m}$ افزایش یافته است. اختلاف در رنگ دانه‌ها نیز به دلیل راستاهای بلوری متفاوت دانه‌های α است.

۲.۳ اندازه‌گیری سختی جوش مقاومتی نقطه‌ای آلیاژ Zr-1%Nb
در بررسی ریزسختی^(۹) جوش مقاومتی نقطه‌ای آلیاژ Zr-1%Nb، برای نمونه‌هایی که با پارامترهای مختلف جوشکاری شده بودند، میزان سختی برحسب ویکرز در محور مرکز مقطع دکمه‌ی جوش و در امتداد قطر دکمه‌ی جوش برای فلز پایه، منطقه‌ی حرارت دیده و دکمه‌ی جوش و برای هر منطقه حداقل در دو نقطه اندازه‌گیری شد.

شکل ۷ تغییر ریزسختی دکمه‌ی جوش در راستای آن، منطقه‌ی حرارت دیده و فلز پایه را برای نمونه‌هایی که با جریان‌های ۱٫۵، ۲ و ۲٫۵ کیلوآمپر و در زمان ۳ چرخه و با نیروی الکتروود ۲۵۰ نیوتن جوشکاری شده‌اند، نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش جریان، میزان سختی دکمه جوش افزایش یافته است. در مرز منطقه‌ی حرارت دیده با دکمه‌ی جوش یک افزایش سختی وجود دارد و با نزدیک شدن به فلز پایه از میزان سختی کاسته می‌شود. افزایش سختی در مرز دکمه‌ی جوش و منطقه‌ی حرارت دیده به دلیل تغییر ریزساختار در طول ناحیه‌ی حرارت دیده است. افزایش سختی به دلیل حضور زمینه‌ی ویدمن‌اشاتن است که فاز سخت‌تری نسبت به α است.



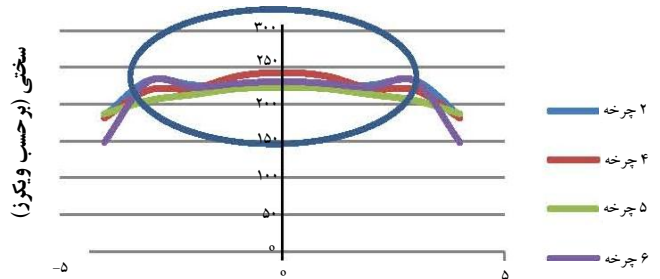
مطالعه‌های انجام شده توسط پریرا و همکاران [۳] بر روی آلیاژ آلومینیومی T6-۶۰۸۲ نشان داد هر چند که افزایش جریان و زمان موجب افزایش اندازه‌ی دکمه‌ی جوش و درشت شدن ریزساختار می‌شود، ولی این افزایش، موجب کاهش میزان سختی در منطقه‌ی دکمه‌ی جوش و حرارت دیده می‌شود. میزان سختی در دکمه‌ی جوش این آلیاژ کم‌ترین مقدار را دارد و این به دلیل حل شدن رسوب‌های مقاوم‌کننده در حالت ذوب است. این پدیده در این آلیاژ عکس پدیده‌ی افزایش سختی در دکمه‌ی جوش آلیاژ زیرکنیم است.

به لحاظ نظری، افزایش زمان، در شرایطی که سایر پارامترها ثابت باشند، به صورت خطی باعث افزایش گرمای ورودی و در نتیجه سبب درشت‌تر شدن ریزساختار می‌شود. مطالعه‌ها نشان می‌دهد که تأثیر افزایش زمان، بیش‌تر بر روی افزایش اندازه‌ی دکمه‌ی جوش است، که این افزایش سبب افزایش نیروی شکست نیز می‌شود [۱۰]. افزایش در جریان نیز منجر به افزایش در اندازه‌ی دکمه‌ی جوش می‌شود و مقاومت در برابر شکست را بهبود می‌بخشد. بویوسفی و همکاران [۱۱] نشان داده‌اند که در بین پارامترهای نیروی الکتروود، شدت جریان و زمان، نیروی الکتروود عامل کنترل رفتار مکانیکی اتصال جوش است. این مطالعه بر روی نمونه‌های ورق فولاد زنگ‌نزن با ضخامت یکسان انجام و پس از آزمون‌های ریزسختی و کششی-برشی نتیجه‌گیری شد که نتایج آزمون‌ها متأثر از پارامترهای فرایندی و به ویژه نیروی اعمال شده است.

۴. نتیجه‌گیری

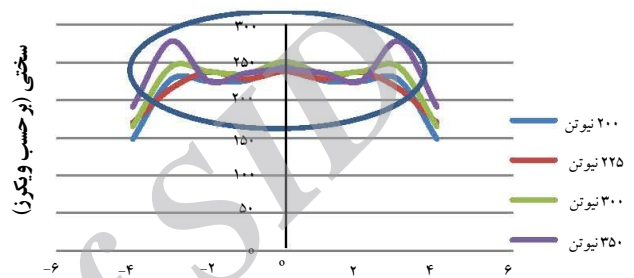
مطالعه‌ی جوش مقاومتی نقطه‌ای ورق آلیاژ Zr-۱٪Nb نتیجه‌های زیر را در پی داشت:

- ریزساختار ناحیه‌ی جوش در مقایسه با فلز پایه دارای دانه‌های درشت و ساختار ناحیه‌ی جوش نیز غالباً به صورت ستونی است که آرایش آن‌ها در جهت جریان حرارت است.
- با افزایش جریان از ۱٫۳ به ۲٫۵ کیلوآمپر، درشتی اندازه‌ی دانه از ۳۰ به ۳۶ μm افزایش می‌یابد. به علاوه درشت‌تر شدن اندازه‌ی دانه‌ها در ناحیه‌ی حرارت دیده نیز به دلیل افزایش جریان است. دانه‌های منطقه‌ی حرارت دیده‌ی



فلز پایه - منطقه‌ی حرارت دیده - دکمه‌ی جوش - منطقه‌ی حرارت دیده - فلز پایه

شکل ۸. تغییر ریزسختی در راستای دکمه‌ی جوش، منطقه‌ی حرارت دیده و فلز پایه برای زمان‌های ۲، ۴، ۵ و ۶ چرخه (جریان ۱٫۳ کیلوآمپر و نیروی الکتروود ۲۵۰ نیوتن).



فلز پایه - منطقه‌ی حرارت دیده - دکمه‌ی جوش - منطقه‌ی حرارت دیده - فلز پایه

شکل ۹. تغییر ریزسختی در راستای دکمه‌ی جوش، منطقه‌ی حرارت دیده و فلز پایه برای نیروهای ۲۰۰، ۲۲۵، ۳۰۰ و ۳۵۰ نیوتن (جریان ۱٫۳ کیلوآمپر و زمان ۳ چرخه).

می‌دهد که تأثیر نیروی الکتروود بر افزایش میزان سختی در ناحیه‌ی حرارت دیده بیش‌تر از سایر پارامترها بوده است. این افزایش نیز به دلیل تغییر ریزساختار ناحیه‌ی حرارت دیده است.

در مطالعه‌ای که توسط کهرمان و همکاران [۴] بر روی ورق تیتانیم تجارتي خالص انجام شده است، افزایش نیروی الکتروود سبب افزایش مقدار و ابعاد دوقلوبی‌ها و منجر به کاهش و یا حذف حفره‌ها شده است. به لحاظ فرایندی در جوش مقاومتی نقطه‌ای، هنگامی که جریان قطع می‌شود اعمال فشار تا انجماد کامل دکمه‌ی ذوبی ادامه می‌یابد. در خلال این مدت، حین اعمال نیروی الکتروود، به دلیل سرد شدن سریع دکمه‌ی جوش که ناشی از قطع جریان الکتریکی است، کرنشی سختی^(۱۰) رخ می‌دهد. افزایش زمان اعمال جریان و نیروی الکتروود سبب افزایش سختی ناشی از تغییر شکل می‌شود که این افزایش باعث افزایش دوقلوبی‌ها در منطقه‌ی جوش می‌شود [۴، ۵]. با توجه به شباهت متالورژیکی این فلز با زیرکنیم این پدیده در این آلیاژ نیز قابل مطالعه است.



مرجع‌ها

- [1] B. Lustman, F. Kerz, The metallurgy of zirconium, National Nuclear Energy Series, Division 7 (4), Litrary Licencing, LLC (2013).
- [2] J.H. Schemel, ASTM Manual on Zirconium and Hafnium, ASTM Special Technical Publication, 639 (1978).
- [3] A.M. Pereira, J.M. Ferreira, A. Loureiro, J.D.M Costa, P.J. Bartolo, Effect of process parameters on the strength of resistance spot welds in 6082-T6 aluminium alloy, Material and Design, 31 (2010).
- [4] N. Kahraman, The influence of welding parameters on the joint strenght of resistance spot welded titanium sheets, Materials and Design, 28 (2007) 420-427.
- [5] Y. Kaya, N. Kahraman, The Effect of Electrode Force, Welding Current and Welding Time on The Resistance Spot Weldability of Pure Titanium, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 60 (2012) 127-134.
- [6] A. Strasser, F. Garzarolli, P. Rudling, Welding of Zirconium Alloys, Advanced Nuclear Technology International (2007).
- [7] G. Choudhuri, S. Chakraborty, D. Srivastava, G.K. Dey, Phase Field Modeling of Widmanstatten Plate Formation in Zr-2.5%Nb Material, Results in Physics, 3 (2013) 7-13.
- [8] G.F. Slattery, H.K. Richardson, P. Thomson, Microstructure of Weld Region in Seam-Welded Zirconium-2.5%wt Nb Tubing, Metallography, 12 (1979) 57-71.
- [9] K. Komuro, Welding of Zirconium Alloys, Welding International, 8(2) (2009) 141-148.
- [10] F. Hayat, The effect of the welding current on heat input, nugget geometry, and the mechanical and fractural properties of resistance spot welding on Mg/Al dissimilar materials, Materials and Design, 32 (2011) 2476-2487.
- [11] B. Bouyousfi, T. Sahraoui, S. Guessasma, K. Tahar Chaouch, Effect of Process Parameters on Physical Characteristics of Spot Weld Joints, Materials & Design, 28 (2007) 414-419.

مجاور دکمه‌ی جوش بزرگ‌تر و هر چه به سمت فلز پایه نزدیک‌تر می‌شود اندازه‌ی دانه‌ها کوچک‌تر می‌شود.

- برای زمان جوشکاری و جریان یکسان، با افزایش نیروی الکتروود از ۳۰۰ به ۳۵۰ نیوتن، اندازه‌ی دانه‌ها از ۳۶ به ۵۶ μm افزایش می‌یابد. ازدیاد طول دانه‌ها نیز به موازات جهت اعمال نیروی الکتروود به وجود می‌آید.

- اندازه‌گیری سختی با روش ویکرز نشان داد که با افزایش جریان، میزان سختی دکمه‌ی جوش افزایش می‌یابد. در مرز منطقه‌ی حرارت دیده با دکمه‌ی جوش یک افزایش سختی وجود دارد و با نزدیکی به سمت فلز پایه میزان سختی کاهش می‌یابد.

- در ناحیه‌ی دکمه‌ی جوش، تغییر پارامتر زمان تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تغییر میزان سختی ندارد. افزایش سختی در ناحیه‌ی حرارت دیده در مجاورت دکمه‌ی جوش نیز مشهود است. با نزدیک شدن به منطقه‌ی فلز پایه افت قابل ملاحظه‌ای در میزان سختی مشاهده شد.

- در دکمه‌ی جوش، تغییر نیروی الکتروود تأثیری بر میزان سختی ندارد. افزایش میزان سختی در منطقه‌ی حرارت دیده نشان داد که تأثیر نیروی الکتروود بر افزایش میزان سختی در ناحیه‌ی حرارت دیده از سایر پارامترها بیش‌تر بوده است.

پی‌نوشت‌ها

1. Squeeze time
2. Welding time
3. Holding time
4. Struers lectropol
5. Vickers
6. Widmanstatten
7. Massive diffusion
8. Heat flow
9. Microhardness
10. Strain hardening

Archive of SID



Archive of SID