نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 2، پاییز و زمستان1397، صفحه 70-59

بررسی اثر تغییر جریان جوشکاری پرتو الکترونی بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ پیشرفته پایه نیوبیم (Nb-1%Zr)

علی حاجی تبار ، همام نفاخ موسوی *

گروه مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۷ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۱۸)

چکیده

در این پژوهش به بررسی اثر تغییر جریان جوشکاری پرتو الکترونی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ پیشرفته پایه نیوبیم (Nb-1%Zr) پرداخته شده است. ابتدا برای انجام آنالیز شیمیایی آلیاژ مورد نظر، از روش کوانتومتری و همچنین برای تعیین فازهای موجود در آلیاژ از روش آنالیز پراش پرتو ایکس(XRD) استفاده شد. برای انجام جوشکاری پرتو الکترونی، نمونه هایی با ضخامت ۳ میلیمتر تهیه شده و با اعمال ۴ جریان پرتو مختلف ۲۰، ۲۴، ۳۰ و ۳۵ میلی آمپر تحت جوشکاری قرار گرفتند. جهت بررسی خواص ماکروساختاری و میکروساختاری شامل دانه بندی مناطق مختلف جوش، هندسه و عمق نفوذ جوش و همچنین تأثیر گرمای ورودی بر ساختار جوش، از میکروسکوپ های استریو، نوری و الکترونی روبشی استفاده شد. اندازه‌گیری های دانه بندی و مناطق مختلف جوش نیز توسط نرم افزار image J محاسبه گردید. پروفیل سختی نیز برای همه نمونه‌های جوشکاری شده اندازه گیری شد. در نهایت خواص کششی جوش در دمای محیط اندازه گیری شد. نتایج این بررسی ها نشان می دهد که در نمونه با جریان جوشکاری ۳۰ میلی آمپر بهترین شرایط را از نظر عمق نفوذ و هندسه جوش نتیجه داده است. انجماد در جوشها از نوع سلولی بوده و دندریت های بین سلولی در ناحیه مرکزی جوش در اثر ریزجدایش های ایجاد شده در بین سلول ها ایجاد شده است. در منطقه متاثر از حرارت(HAZ) در جوش‌ها به دلیل ایجاد تبلور مجدد، رشد دانه شدیدی اتفاق می افتد. به دلیل هدایت حرارتی بالای نایوبیوم، اندازه منطقه HAZ نسبتاً بزرگ است. بر اساس رابطه رزنتال، دمای تبلور مجدد این آلیاژ برابر با ۷۱۳°C محاسبه شد. با مقایسه میانگین اندازه دانه در خط مرکزی جوش و مقادیر سرعت جوشکاری در گرادیان دمایی (G×R) محاسبه شده در مرکز جوش، مشاهده می شود که با افزایش G×R اندازه دانه در خط مرکزی جوش کاهش می یابد. پروفیل سختی نشان می دهد که در همه نمونه ها سختی منطقه جوش و HAZ آلیاژ Nb-1Zr به طور قابل ملاحضه ای کمتر از فلز پایه است که ناشی از افزایش شدید اندازه دانه در این مناطق است. استحکام کششی جوش برای نمونه با جریان ۳۰میلی آمپر برابر با ۲۸۱ MPa بدست آمد که ۵۳٪ استحکام کششی فلز پایه است. این اتصال از ناحیه HAZ شکسته شد که علت آن ناشی از افزایش شدید اندازه دانه در این منطقه است.

کلمات کلیدی: جوشکاری پرتو الکترونی ، آلیاژ پیشرفته Nb-1Zr ، جریان جوشکاری ، ریزساختار، خواص مکانیکی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: h.naffakh-moosavy@modares.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-23]

Investigation of the influence of electron beam welding current change on the microstructure and mechanical properties of Nb-1Zr advanced alloy

A. Hajitabar, H. Naffakh-Moosavy*
Department of Materials Engineering, TarbiatModares University (TMU).

(Received 16 April 2018 ; Accepted 10 October 2018)

Abstract
The effect of electron beam welding current changes on the microstructure and mechanical properties of the Nb-based alloy has been investigated. The electron beam welding was applied with 4 different currents of 20, 24, 30 and 35 mA on 3mm thick plates. The aspects including different welding regions, geometry and depth of welding penetration, as well as the effect of heat input on the weldability are investigated. The mechanical properties including tensile and microhardness values of the weld was also measured. The results show that in a sample with a 30 mA welding current, the optimum conditions for the depth of penetration, weldability and the geometry of the weld are obtained. The welds showed a cellular structure, and intercellular dendrites in the central region of the weld have been caused due to microsegregations created between the cells. In the heat affected zone(HAZ), severe recrystallization and grain growth has occurred. Because of the high thermal conductivity of niobium, the HAZ size is relatively large. Based on the 3D Rosenthal's equation, the recrystallization temperature of alloy was calculated as 713 °C. It is observed that as G × R increases, the grain size in the central line of the weld decreases. The hardness profile shows that the hardness of the weld zone and the HAZ is significantly less than that of the base metal due to elimination of work hardening effect. The tensile strength of the weld for a sample with a current of 30 mA was 281MPa, which is 53% of the tensile strength of the base metal and the weld was broken from the HAZ.

Keywords: Electron beam welding; Advanced alloy Nb-1Zr; Welding current; Microstructure; Weldability; Mechanical properties.

1- مقدمه

نایوبیوم فلزی دیر گداز با دمای ذوب ۲۴۷۷ درجه سانتی گراد و دمای جوش ۴۷۴۱ درجه سانتی‌گراد است [۱]. این عنصر دارای نماد شیمیاییNb وعدد اتمی۴۱ است [۲]. نیوبیم و آلیاژهای آن، دارای خواص دمای بالای عالی از جمله نقطه ذوب بالا و خواص خزشی خوب هستند. این آلیاژها کار پذیری خوبی داشته‌و همچنین در میان فلزات دیرگداز، کمترین چگالی را دارا می‌باشند [۳-۶].

امروزه نیوبیم خالص و آلیاژ Nb–1Zr به طور گسترده در صنعت هسته‌ای و هوافضا برای کاربردهای دما بالا استفاده می‌شود [۷]. محصولات کارخانه نیوبیم در ساخت تجهیزات مقاوم در برابرخوردگی از جمله: مخازن واکنش، ستون و کلاهک گرماساز، پوسته و لوله مبدل‌های حرارتی، دیافراگم‌ها و روزنه‌ها استفاده می‌شوند [۸]. همچنین نیوبیم با خلوص بالا، برای بسیاری از پروژه‌های شتاب‌دهنده با استفاده ازتکنولوژی ابررسانا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹].

نرخ خزش نیوبیم با افزودن مقدار ۱درصد عنصر زیرکونیم، بسیار پایین می‌آید و خواص دمای بالای بسیار خوبی پیدا می‌کند [۱]. آلیاژ Nb-1Zr در لامپ‌های بخار سدیم و یا برای بررسی فلزات قلیایی مذاب در راکتورهای هسته‌ای استفاده می‌شود. زیرا دارای خاصیت جذب نوترون کم، مقاومت در برابر خوردگی بالا و مقاومت خوب در برابرآسیب‌های تشعشعی است [۱۰ و ۱۱]. همچنین آلیاژ نیوبیم – زیرکونیم کاملاً ریز دانه، به عنوان یک ماده زیست پزشکی جدید مورد توجه می‌باشد[۱۲]. آلیاژهای نیوبیم می‌توانند توسط فرایندهای ذوبی قوسی تنگستن – گاز، پرتو الکترونی‌و پرتو لیزری به

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-23]

خوبی جوشکاری شوند [۱۳].

با توجه به تقاضای روز افزون برای سرعت بالا و اعوجاج کم در جوشکاری، جوش پرتو الکترونی به یک روش مفید در اتصال قطعات مهندسی تبدیل شده است [۱۴].

مزایای اصلی این روش جوشکاری، نسبت عمق به عرض زیاد، عاری بودن از عیوب، منطقه متاثر از حرارت[1](HAZ) کوچک و بازدهی بالا است [۱۵]. همچنین این روش، برخلاف روش‌های جوشکاری دیگر، درجه خلوص فلز را در مناطق ذوب و HAZ حفظ می کند [۱۶]. کاربردهای اصلی این فرآیند جوشکاری با راندمان بالا عبارت است از: صنایع خودرو، هسته‌ای، مهندسی برق، هوافضا و صنایع مهندسی مکانیک [۱۷].

بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی جوشکاری پرتو الکترونی بر روی فلزات دیرگداز توسط بادکین انجام شد. او جوش‌پذیری این فلزات را در شرایط مختلف جوشکاری بررسی کرد و وابستگی ضخامت ترکیبات بین فلزی ایجاد شده را بر استحکام جوش مورد مطالعه قرار داد[۱۸].

همچنین بادکینمدل فیزیکی – ریاضی فرایند جوشکاری پرتو الکترونی را برای جوشکاری فلزات دیرگداز به فولاد را توسعه داد [۱۹].

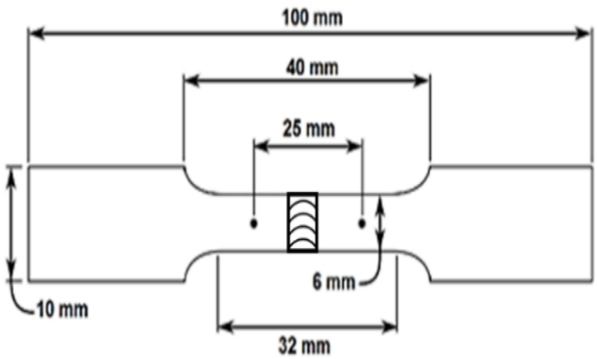
دیمویانوف و کانیوکوف به خواص ابررسانایی جوشکاری پرتو الکترونی نایوبیوم فوق خالص پرداختند [۱۶]. آنها دریافتند که خواص ابررسانایی نمونه های جوش داده کاهش یافته است که این کاهش ناشی از افزایش غلظت عناصر ناخالصی در ناحیه ذوب می باشد. همچنین ترکمنی و همکاران نیز به بررسی خواص جوشکاری لیزری بر روی نایوبیوم خالص با دو حالت کانداکشن و کی هول و همچنین اتصال غیر همجنس نایوبیوم به آلیاژ Ti-6Al-4V پرداختند [۲۰].

با بررسی مراجع موجود در این زمینه، ملاحضه می شود که تاکنون تحقیقات محدودی در زمینه جوشکاری آلیاژهای نیوبیم موجود است. به خصوص در زمینه جوشکاری آلیاژ Nb-1Zr با توجه به کاربردهای مهم آن در صنایع پیشرفته‌ای همچون هوافضا، هسته ای و نظامی، تاکنون تعداد بسیار محدودی مقاله و گزارش های تحقیقاتی منتشر شده است. در این پژوهش سعی بر آن شده است که به بررسی اثر تغییر جریان جوشکاری پرتو الکترونی بر خواص ریزساختاری آلیاژ Nb-1Zr پرداخته شود.

2- مواد و روش تحقیق

2-1- فلز پایه

در این پژوهش از ورق سه میلیمتری آلیاژ پیشرفته نیوبیم (Nb-1Zr) استفاده شده است. برای به دست آوردن ترکیب شیمیایی دقیق آلیاژ مورد نظر، روش اسپکترومتری نشری (کوانتومتری) مورد استفاده قرار گرفت که نتایج آن در جدول(۱) آورده شده است.همچنین برای تعیین فازهای موجود در این آلیاژ از روش آنالیز پراش پرتو ایکس[2](XRD) استفاده شد که نمودار آن در شکل(۱) آورده شده است. برای انجام این آنالیز از دستگاه XRD مدل X'Pert MPD ساخت شرکت Philips استفاده شده است.



شکل۱– ابعاد نمونه کشش بر اساس استانداردASTM.E8/E8M

به منظور بررسی خواص کششی آلیاژ Nb-1Zr، در ابتدا نمونه‌های ورقه‌ای شکل، بر اساس استاندارد ASTM.E8/E8M، توسط وایرکات با لبه هایی کاملاً صاف بریده شده و سپس توسط دستگاه کشش ۵۰ تنی و تک محوری مدل SANTAM، با نرخ کرنش S^{-1} ۰/۰۰۱ در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد مورد کشش قرار گرفتند. همچنین سختی این دو آلیاژ نیز با روش سختی سنجی ویکرز اندازه گیری شد.

1 - Heat affected zone

2 - X-Ray diffraction

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-23]

جدول۱- ترکیب شیمیایی دقیق آلیاژ Nb-1Zr

Element	H	Ni	N	O	C	Fe	Hf	Mo	Ta	W	Zr	Nb
Wt%	0.001	0.002	0.006	0.002	0.008	0.04	0.05	0.14	0.5	0.6	0.8	98.5

و برای انجام عملیات جوشکاری، در محلول استون برای مدت زمان معینی نگهداری شدند. در این تحقیق از دستگاه جوشکاری پرتو الکترونی با حداکثرولتاژ kv ۸۵، حداکثر توان kw ۲۰ و سطح خلاء 6×10^{-4}mbar استفاده شده است. نمونه‌ها پس از تمیز کاری، در محفظه خلاء دستگاه قرار داده شدند و سپس خلاء 10^{-4}mbar اعمال گردید.

در این تحقیق جوشکاری در چهار جریان پرتو مختلف ۲۰، ۲۴، ۳۰ و ۳۵ میلی آمپر مطابق با جدول(۲) بر روی کوپن‌های مذکور انجام شد. سایر پارامترها از جمله ولتاژ، جریان فیلامان، جریان فوکوس، سرعت جوشکاری و جریان فوکوس روی سطح، ثابت در نظر گرفته شدند. تمرکز پرتو الکترونی به دلیل ضخامت کم نمونه‌ها، در بالای سطح قطعه در نظر گرفته شد. در نمونه‌های با ضخامت بالا، تمرکز پرتو الکترونی در داخل قطعه اعمال می‌شود.

2-2- آزمایش‌های متالوگرافی

برای مطالعه و بررسی اثر جریان بر ریزساختار و دانه بندی مناطق مختلف جوش و تغییرات هندسه جوش، قطعات جوشکاری شده از مقطع عرضی به صورتی که دارای کلیه مناطق جوش باشد، برش داده شدند. نمونه ها ابتدا مانت گرم و سپس از سطح مقطع عرضی سنباده زنی و با نمد پولیش و محلول Al_2O_3 پولیش‌کاری شدند. نمونه ها به وسیله محلولی محتوی $HF+3H_2SO_4+1HNO_3+5H_2O_4$، پس از مشخص کردن زمان بهینه ۴۵ ثانیه اچ گردیدند. نمونه‌ها در ابتدا برای بررسی هندسه و عمق نفوذ جوش، توسط میکروسکوپ‌استریو مدل SZX2-ILLBساخت‌شرکت OLYMPUS بررسی شدند و برای بررسی‌های کامل تر، توسط میکروسکوپ نوری مدل BX51M ساخت شرکت OLYMPUS و میکروسکوپ الکترونی روبشی ساخت شرکت Philips مدل XL30 مورد تحلیل قرار گرفتند و اثر تغییر جریان جوشکاری بر هندسه جوش و توزیع دانه بندی در مناطق مختلف جوش بررسی شد.

2-3- آزمایش‌های مکانیکی

به منظور بررسی و مقایسه خواص کششی جوش پرتوالکترونی آلیاژ Nb-1Zr با فلز پایه، نمونه های جوشکاری شده، بر اساس استاندارد ASTM.E8/E8M که شماتیک نمونه‌ها در شکل(۱) مشاهده می‌شود، توسط وایرکات با لبه‌هایی کاملاً صاف بریده شدند و سپس توسط دستگاه کشش ۱۵ تنی و تک محوری مدل MTS فرانسه، با نرخ کرنش S^{-1} ۰/۰۰۱ در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد مورد کشش قرار گرفتند. همچنین میکروسختی مناطق مختلف جوش توسط دستگاه Buehler LTD برای تمام نمونه‌های جوشکاری شده اندازه گیری شد و با یکدیگر مقایسه گردید.

3- نتایج و بحث

3-1- فلز پایه

با توجه به آنالیز کوانتومتری، مشاهده می‌شود که همه عناصر آلیاژی موجود در این ماده کمتر از یک درصد است و با مراجعه به نمودار XRD این آلیاژ در شکل(۲)، مشاهده می‌شود که این ماده به طور کلی تک فازی است.

با توجه به انحراف کم پیک‌های این نمودار به سمت راست و افزایش زاویه 2θ نسبت به نیوبیم خالص، طبق رابطه براگ (رابطه ۱)، با افزایش زاویه براگ، مقدار فاصله بین صفحات و در نتیجه پارامتر شبکه کاهش پیدا کرده است. پس عناصر آلیاژی موجود در این ماده به صورت محلول جامد جانشینی و

جدول۲- پارامترهای جوشکاری پرتو الکترونی برای هر نمونه.

شماره نمونه	جریان پرتو	ولتاژ	سرعت جوشکاری
N1	20 mA	85KV	10 mm/s
N2	24 mA	85KV	10 mm/s
N3	30 mA	85KV	10 mm/s
N4	35Ma	85KV	10 mm/s

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-23]

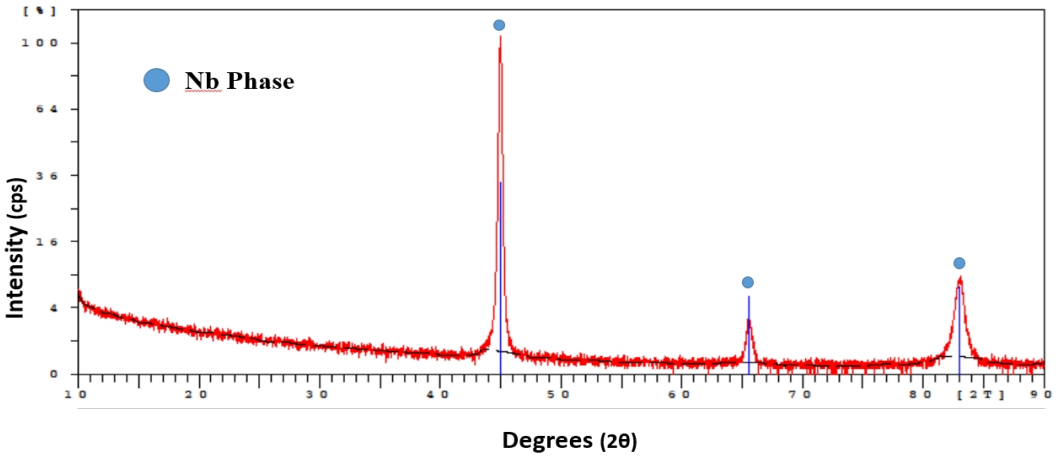
یا بین نشینی (با توجه به نوع عنصر آلیاژی) در فاز نیوبیم حل شده و سبب کاهش اندازه پارامتر شبکه شده اند.

$$\lambda=2d\sin(\theta) \quad (1)$$

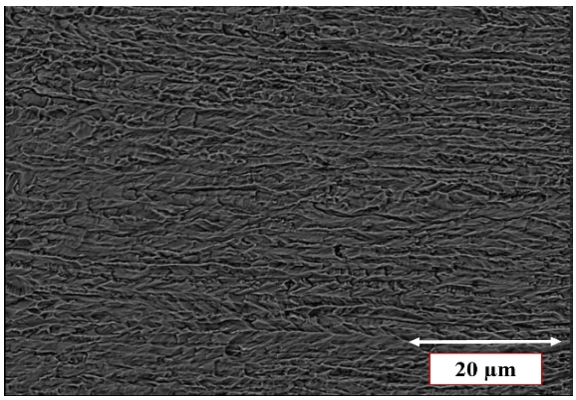
در این رابطه λ طول موج پرتو ایکس، d فاصله بین صفحات اتمی و θ زاویه تابش پرتو هستند. ریزساختار ورق آلیاژ Nb-1Zr در شکل(۳) آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، ریزساختار این آلیاژ دارای دانه‌های کشیده در جهت نورد است. استحکام کششی این آلیاژ برابر با ۵۲۶/۵۲ مگاپاسکال و میانگین سختی این آلیاژ برابر با ۱۶۷ ویکرز اندازه گیری شد.این نتایج نشان می‌دهند که نایوبیوم با توجه به این که یک فلز دیرگداز است، اما مقدار سختی و استحکام کششی نسبتا پایینی دارد که نشان‌دهنده شکل پذیری خوب این آلیاژ در دمای محیط است. اگرچه استحکام کششی آلیاژ Nb-1Zr نسبتا پایین بود، اما این آلیاژ استحکام خود را در دماهای بالا به خوبی حفظ می‌کند.

3-2- بررسی های مقطع جوش

در شکل(۴)، تصاویر ماکروساختار مناطق جوش، HAZ و فلز پایه را برای نمونه‌های مختلف مشاهده می کنیم. در همه نمونه‌ها مشاهده می‌شود که رشد دانه در مرز ذوب به صورت اپیتکسیال است و هیچ مرز مشخصی بین فلز مذاب و فلز پایه وجود ندارد. علت این پدیده، عدم استفاده از فلز پرکننده و یکسان بودن ترکیب شیمیایی و فازهای فلز جوش و پایه است. همچنین در تصاویر جوش همه نمونه‌ها، رشد دانه‌های انجمادی در منطقه جوش در جهت عمود بر مرز ذوب است. زیرا بیشترین گرادیان حرارتی و درنتیجه بیشترین خروج گرمای جوش در این حالت وجود دارد. چون جهت رشد دانه‌های فلز جوش به صورت عمود بر خط ذوب است، پس ساختار انجمادی فلز جوش به صورت دانه‌های ستونی تشکیل می‌شود. در خط مرکزی جوش نیز به دلیل انتقال حرارت در همه جهات، دانه‌های هم محور را مشاهده می‌کنیم.

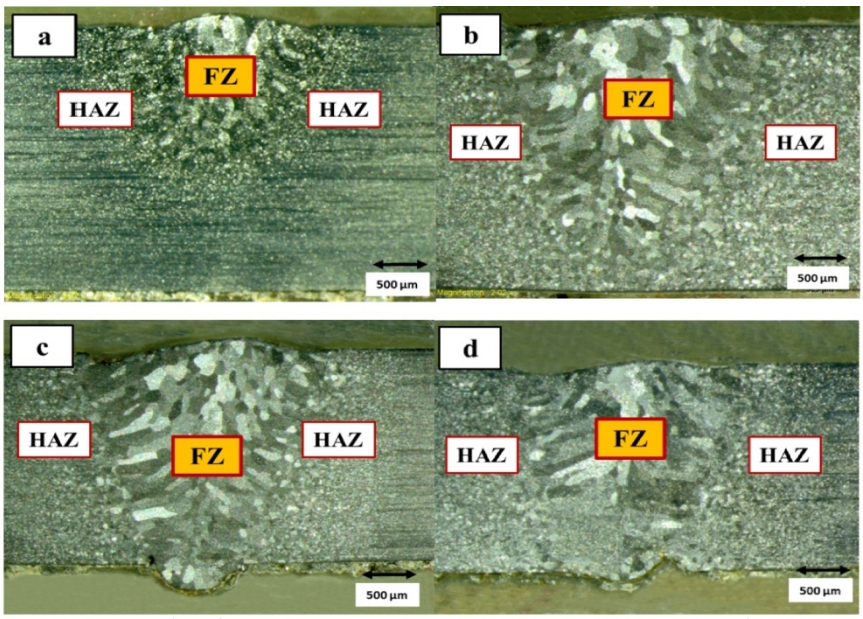


شکل۲- نمودار آنالیز XRD آلیاژ Nb-1Zr.



شکل۳- تصویر میکروسکوپی از آلیاژ Nb-1Zr .

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-23]

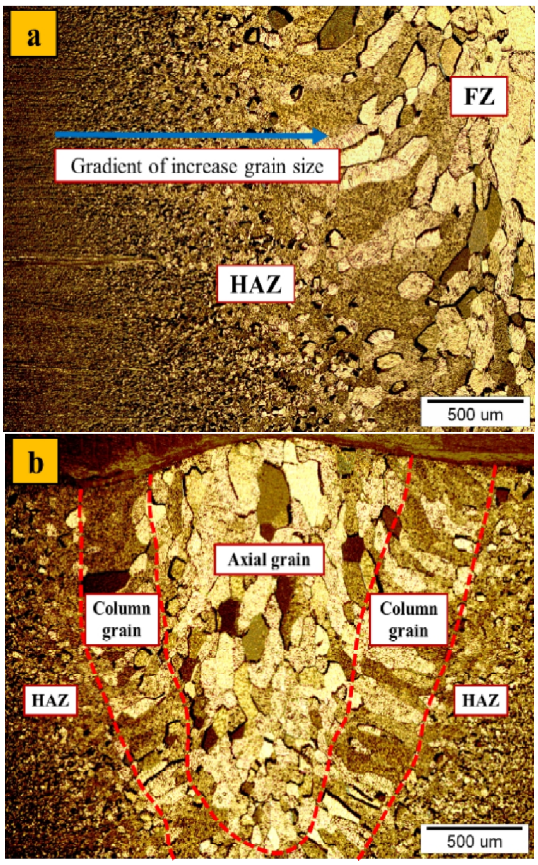


شکل ۴- تصویر ماکرو اچ از مناطق جوش، HAZ و فلز پایه توسط میکروسکوپ استریو

الف) نمونه N1 با جریان ۲۰mA ب) نمونه N2 با جریان ۲۴ mA ج) نمونه N3 با جریان ۳۰ mA د) نمونه N4 با جریان ۳۵mA

در شکل(۴) برای همه نمونه‌ها در HAZ رشد دانه را مشاهده می‌کنیم. آلیاژ اولیه حالت نورد شده بوده است که در هنگام جوشکاری، دانه های HAZ دچار تبلور مجدد و رشد دانه شده‌اند. در HAZ هر چه از فلز پایه به سمت منطقه جوش می‌رویم دانه ها درشت تر می‌شوند. این گرادیان رشد دانه از فلز پایه تا فلز مذاب را به خوبی می توان در شکل(۵-الف) مشاهده کرد. در مناطق نزدیک مرز ذوب به علت بالاتر بودن دمای HAZ، فرصت کافی برای ادغام دانه‌ها از طریق رشد دانه و حرکت مرز دانه ها مهیا است و بدین ترتیب منطقه دانه درشت در نزدیک مرز ذوب تشکیل می‌گردد.

در مناطق دورتر از مرز ذوب، به علت وجود دمای بیشینه پایین‌تر، شرایط برای رشد و حرکت مرزدانه ها به راحتی امکان‌پذیر نبوده و بدین ترتیب منطقه دانه ریزتری تشکیل می‌شود. در شکل(۵-ب) نیز مناطق مختلف تشکیل دانه های ستونی و دانه‌های هم محور را به خوبی می‌توان مشاهده کرد. در مرز بین منطقه ذوب و فلز پایه، به دلیل انتقال حرارت جهت‌دار، دانه‌ها به صورت ستونی رشد می‌کنند. اما در مرکز جوش به دلیل انتقال حرارت در تمام جهت، دانه‌های هم محور تشکیل می‌شود. همان طور که در تصاویر ماکروساختاری شکل‌های(۴و ۵) مشاهده می‌شود، دانه‌های مجاور در مناطق



شکل ۵-ساختار ماکروسکوپی مناطق جوشکاری پرتو الکترونی نمونه N2 توسط میکروسکوپ نوری.

الف) دانه بندی مناطق مختلف جوش

ب) دانه های ستونی و هم محور در جوش

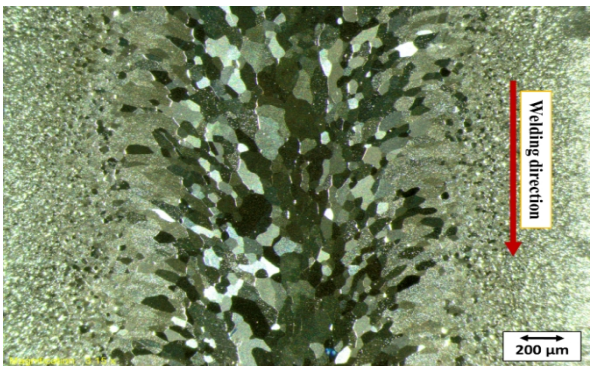
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-23]

جوش و HAZ دارای رنگ های متفاوتی هستند که این تغییر رنگ ها در دانه‌ها ناشی از جهت‌گیری‌های متفاوت هر دانه نسبت به دانه دیگر است. این جهت گیری‌های متفاوت، در واکنش با محلول اچ، میزان خوردگی متفاوتی ایجاد می‌کنند که با توجه به میزان خوردگی، رنگ های گوناگونی در این مناطق ایجاد شده است.

در شکل(۶) دانه‌بندی روی جوش پرتو الکترونی آلیاژ Nb-1Zr را نشان می‌دهد. در این تصویر می‌توان به خوبی کشیده شدن دانه‌ها را در جهت جوشکاری مشاهده کرد. به طور کلی سرعت جوشکاری و گرمای ورودی بیشترین تأثیر را بر نوع ریزساختار و ظرافت آن دارند. در این پژوهش، هر چهار نمونه با سرعت ثابتی جوشکاری شدند. اما جریان جوشکاری برای هرکدام متفاوت می‌باشد. با توجه به رابطه ۲، جریان جوشکاری تأثیر مستقیم بر گرمای ورودی می گذارد [۲۱].

$$E=\eta \times VI/S \qquad (۲)$$

در این رابطه E گرمای ورودی،V ولتاژ جوشکاری، I جریان پرتو، S سرعت جوشکاری وη مقداری ثابت است.مقدار η برای جوشکاری پرتو الکترونی برابر با ۰/۹ است.



شکل۶- تصویر دانه بندی روی جوش پرتو الکترونی آلیاژNb-1Zr

عرض جوش و عمق نفوذ جوش برای هر نمونه توسط نرم‌افزار imageJ اندازه گیری شد که در جدول(۳) مشاهده می‌شود. با توجه به جدول(۳) در می‌یابیم که نمونه های N1 و N2 به علت جریان جوشکاری کمتر (گرمای ورودی کمتر) نفوذ کامل نداشته‌اند و تنها نمونه های N3 و N4 به طور کامل نفوذ کرده‌اند. نسبت عمق به عرض نمونه N3 بیش از نمونه N4 است. پس گرمای ورودی نمونه N3 نسبت به نمونه های دیگر بهینه تر است.

شکل(۷) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مرکز جوش آلیاژ نایوبیوم را نشان می‌دهد. در این تصویر به خوبی می توان انجماد سلولی را در درون دانه های این آلیاژ به صورت حفره‌های دایره‌ای شکل مشاهده کرد. نکته قابل توجه در این تصویر، مشاهده دندریت‌های بین سلولی در ریزساختار است که می‌تواند در اثر ریز جدایش‌های ایجاد شده در بین سلول‌های انجمادی ایجاد شده باشد. اندازه منطقه HAZ برای همه نمونه‌ها توسط نرم افزار image J اندازه گیری شد که میانگین اندازه HAZ برای هر نمونه در شکل(۸) آورده شده است. به دلیل هدایت حرارتی بالای آلیاژ Nb-1Zr اندازه منطقه HAZ به طور قابل توجهی بزرگ است [۲۲]. همان طور که در شکل(۸) مشاهده می‌شود، با افزایش گرمای ورودی جوشکاری در نمونه ها، اندازه منطقه HAZ نیز افزایش می‌یابد. براساس رابطه رزنتال در سه بعد، می توان دمای تبلور مجدد این آلیاژ را در حالت جوشکاری پرتو الکترونی به دست آورد. روابط رزنتال از پرکاربردترین و ساده ترین روابط انتقال حرارت می باشد. در عین حال این معادلات از دقت مناسبی نیز برخوردار است. معادله رزنتال در سه بعد در رابطه ۳ آورده شده است [۲۱].

$$\frac{2\pi(T-T_{\circ})Kr}{Q} = \exp\left[\frac{-V(R-x)}{2\alpha}\right] \qquad (۳)$$

در این رابطهT°دمای اولیه فلزات پایه،Tدما، Qگرمای ورودی (Q=ηVI)، k هدایت حرارتی فلز پایه، α نفوذ پذیری

جدول۳- مشخصات هندسی نمونه های جوشکاری شده آلیاژهای Nb-1Zr

شماره نمونه	جریان (mA)	گرمای ورودی (KJ/m)	عرض جوش (mm)	عمق جوش (mm)	نسبت عمق به عرض
N1	۲۰	۱۵۳	۱/۵	۱/۷	۱/۱۳
N2	۲۴	۱۸۳/۶	۲/۵	۲/۴	۰/۹۶
N3	۳۰	۲۲۹/۵	۲/۸	۳/۶	۱/۲۹
N4	۳۵	۲۶۷/۷۵	۲/۹	۳/۱	۱/۰۷

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-23]

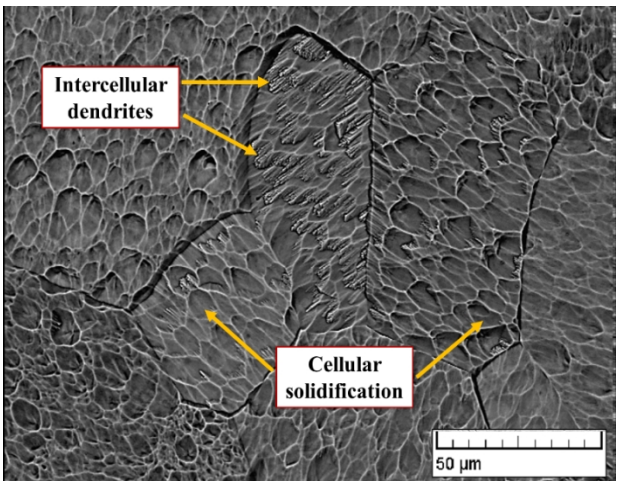
حرارتی فلز پایه، R فاصله شعاعی از مرکز جوش و V سرعت جوشکاری هستند. با حل معادله رزنتال براساس خواص حرارتی مورد نیاز برای آلیاژ Nb-1Zrکه در جدول(۴) آورده شده است، مقدار دمای تبلور مجدد این آلیاژ به دست می آید. دمای تبلور مجدد این آلیاژ در شرایط جوشکاری پرتو الکترونی برابر با ^{o}C ۷۱۳ محاسبه شده است.

با توجه به نمودار شکل(۹)، میانگین اندازه دانه در خط مرکزی جوش برای همه نمونه‌ها توسط نرم افزار image J اندازه‌گیری شد. بر این اساس، برای هر نمونه، یازده دانه در منطقه مرکزی جوش توسط نرم افزار image J بر اساس روش میانگین اندازه دو قطر هر دانه، اندازه گیری شد و سپس میانگین اندازه دانه‌های هر نمونه محاسبه گردید. شکل(۹) میانگین اندازه دانه نمونه‌های مختلف را به همراه گرمای ورودی اعمالی برای هر کدام از نمونه ها را به صورت نمودار نشان داده است. با توجه به این شکل مشاهده می شود که با افزایش گرمای ورودی در نمونه های جوشکاری شده، میانگین اندازه دانه در خط مرکزی جوش افزایش می‌یابد.

با توجه به رابطه رزنتال در سه بعد، مقدار شیب دمایی G در خط مرکزی جوش از رابطه ۴ بدست می آید[۲۱].

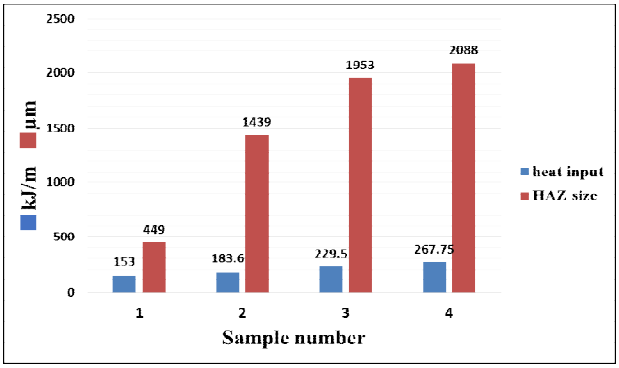
$$G = \frac{2\pi k(T_L - T_0)^2}{Q} \qquad (۴)$$

در این رابطهG گرادیان حرارتی،T_Lدمای ذوب، T_0 دمای اولیه فلز پایه، Q گرمای ورودی(Q=ηVI) و k هدایت حرارتی



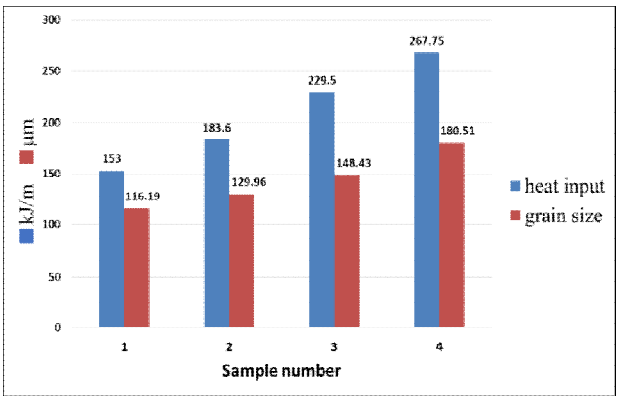
شکل۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مرکز جوش آلیاژ Nb-1Zr .

می باشد.



شکل۸- مقایسه میانگین اندازه منطقه HAZ و گرمای ورودی اعمالی برای نمونه های جوشکاری

مقدار شیب دمایی در خط مرکزی جوش برای همه نمونه های جوشکاری شده محاسبه شد که در جدول(۵) نشان داده شده است. در خط مرکزی جوش نرخ رشد R برابر با سرعت جوشکاری V است که برای همه نمونه های جوشکاری، مقدار آن mm/s ۱۰ می‌باشد. به طور کلی مقدار G×R تعیین کننده ظرافت و اندازه ساختار جوشکاری هستند. به طوری که هر چه مقدار G×R بیشتر باشد، ساختار ظریف تر و دانه ریزتر است. همان طور که در جدول(۵) مشاهده می‌شود، نمونه N1 بیشترین مقدار G×R را دارد و نمونه N4 کمترین مقدار G×R را دارا است.



شکل۹- مقایسه میانگین اندازه دانه در خط مرکزی جوش و گرمای ورودی اعمالی برای نمونه های جوشکاری.

با مقایسه مقادیرG×R در خط مرکزی جوش در جدول(۵) و میانگین اندازه دانه در مرکز جوش در نمودار شکل(۹)،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-23]

جدول۴- پارامترها و خواص حرارتی آلیاژ Nb-1Zr [۲۳]

نام آلیاژ	دمای اولیه T_0(°C)	دمای ذوب T_L(°C)	هدایت حرارتی $k(\frac{J}{ms°C})$	نفوذ پذیری حرارتی $(\frac{mm^2}{s})\alpha$
Nb-1Zr	۲۵	۲۴۰۷	۴۱/۹	۱۸/۰۶

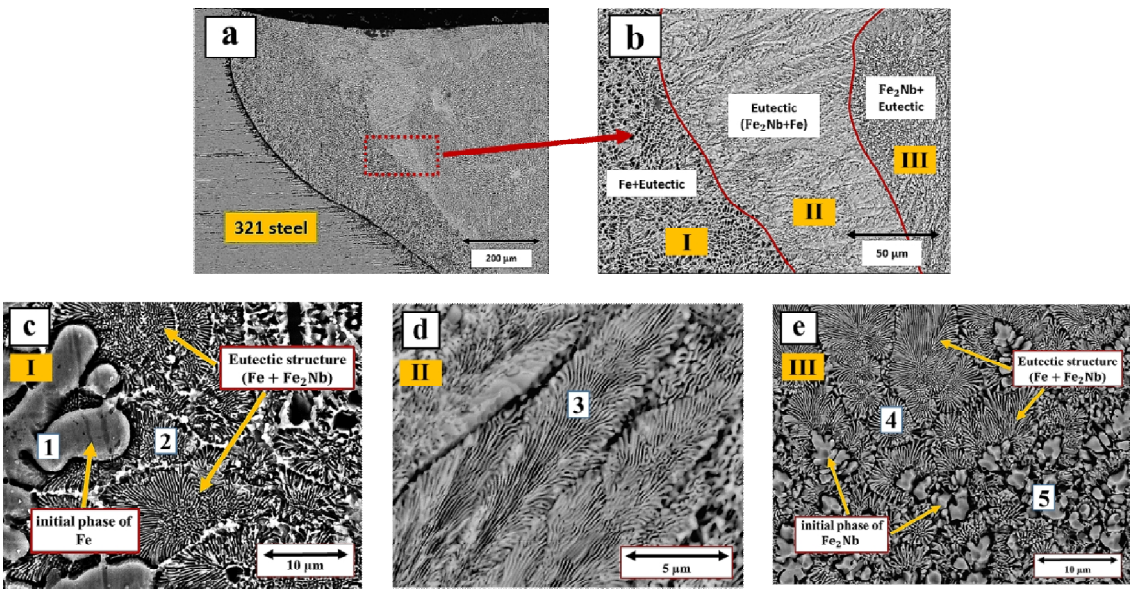
جدول۵- مقادیر محاسبه شده گرادیان دمایی G ، نرخ رشد R و G×R در خط مرکزی جوش برای نمونه های جوشکاری شده

نمونه	N1	N2	N3	N4
شیب دمایی G (℃/mm)	975.8	813.2	650.5	557.6
نرخ انجماد R (mm/s)	10	10	10	10
G×R (℃/s)	9758	8132	6505	5576

مشاهده می شود که نمونه N1 بیشترین مقدار G×R را داشت و همچنین کوچکترین اندازه دانه را در میان سایر نمونه ها دارد. نمونه N4 نیز با کمترین مقدار G×R بزرگترین اندازه دانه را در میان سایر نمونه های جوشکاری شده دارد. پس با توجه به نتایج، هرچه G×R در خط مرکزی جوش بیشتر شود، اندازه دانه در خط مرکزی جوش کاهش می‌یابد.

شکل(۱۰-الف) تصویر منطقه جوش سمت فولاد ۳۲۱ را نشان می‌دهد. در شکل(۱۰-ب) که از بزرگنمایی منطقه مشخص‌شده از شکل(۱۰-الف) است، سه منطقه مختلف مشاهده می‌شود.

با توجه به دیاگرام فازی نایوبیوم-آهن و نتایج آنالیز XRD و همینطور ریزساختارهای موجود در شکل(۱۰)، می‌توان فازهای موجود در مناطق مختلف جوش را پیش بینی کرد. با توجه به شکل(۱۰-ج) که از ناحیه نزدیک به فلز پایه ۳۲۱ است، منطقه‌ای دو فازی مشاهده می‌شود که شامل یک فاز پری یوتکتیک غنی از آهن و یک فاز یوتکتیک شامل آهن و ترکیب بین فلزی Fe_2Nb است. درصد اتمی آهن و نایوبیوم با توجه به آنالیز EDS نقطه‌ای در این مناطق، در محدوده ۱ از دیاگرام فازی دوتایی Fe-Nb است.در منطقه دورتر از فلز پایه (منطقه میانی در شکل۱۰-ب) که در شکل(۱۰-د) مشاهده می‌شود، یک منطقه کاملا یوتکتیکی نایوبیوم و Fe_2Nb تشکیل شده است که تطابق درصد اتمی آهن و نایوبیوم در آنالیز EDS این منطقه، در محدوده ۲ از دیاگرام فازی قرار می‌گیرد. ساختار لایه لایه یوتکتیکی به خوبی در این تصویر قابل مشاهده است.



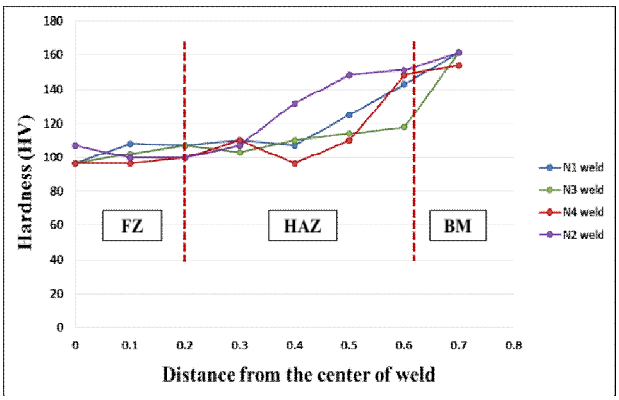
شکل ۱۰- تصویر ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی از اتصال غیر هم جنس Nb-1Zr به فولاد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-23]

منطقه دورتر از فلز پایه فولادی و سایر مناطق مرکزی جوش، شامل یک فاز پری یوتکتیک غنی از Fe_2Nb و یک فاز یوتکتیک نایوبیوم و Fe_2Nb است که ریزساختار این منطقه در شکل(۱۰–ه) مشاهده می‌شود. با توجه به درصد اتمی آهن و نایوبیوم در آنالیز EDS از این منطقه، در محدوده ۳ از دیاگرام Fe-Nb قرار می گیرد. دندریت های فاز اولیه Fe_2Nb در شکل(۱۰–ه) به خوبی قابل مشاهده است. ترکیبات یوتکتیکی تشکیل شده در شکل(۱۰–ج و۱۰–ه) در اثر جدایش های صورت گرفته در اثر تشکیل فازهای اولیه Fe و Fe_2Nb ایجاد می شوند. به دلیل سرعت بالای سرمایش در جوشکاری پرتو الکترونی، ساختارهای یوتکتیکی بسیار ظریفی در مناطق جوش تشکیل شده است. اندازه لایه های یوتکتیک توسط نرم افزار Image J اندازه گیری شد که میانگین فاصله لایه های یوتکتیکی برابر با ۰/۱۵ میکرومتر به دست آمده است. این تنوع ریزساختاری و فازی در هر ۴ حالت جریان جوشکاری مشاهده شده است.

3-3- خواص مکانیکی جوش

تغییرات سختی جوش توسط میکروسختی ویکرز با استفاده از بار ۲۰۰ گرم و مدت زمان ۱۵ ثانیه در نقاط مختلف سطح مقطع عرضی جوش برای همه نمونه های جوشکاری شده اندازه گیری شد. شکل(۱۱)پروفیل تغییرات سختی را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، مشاهده می‌شود که مقدار سختی منطقه جوش و HAZ آلیاژ Nb-1Zr به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از فلز پایه است. فلز پایه فلزی کارشده (نورد شده) با دانه‌بندی بسیار ریز و کشیده است. از فلز پایه به سمت منطقه HAZ و جوش، همان طور که در شکل(۵) مشاهده می‌شود، اندازه دانه با شیب تندی افزایش می یابد. این افزایش شدید اندازه دانه از فلز پایه به منطقه جوش که در اثر استحکام‌دهی ناشی از کارسختی و سپس تبلور مجدد ناشی از افزایش دما ایجاد می‌شود، باعث کاهش چشمگیر سختی از منطقه فلز پایه به منطقه HAZ و جوش شده است. به طوری که کمترین مقدار سختی در مرکز جوش و حدود ۹۸ ویکرز، بدست آمده است. آزمون کشش برای نمونه N3 در دمای محیط اندازه‌گیری شد. استحکام کششی این نمونه جوشکاری برابر با ۲۸۱ MPa به دست آمد که ۵۳٪ استحکام کششی فلز پایه (استحکام فلز پایه ۵۲۶/۵ MPa) می‌باشد. این اتصال از ناحیه HAZ شکسته شد.با توجه به تصاویر دانه بندی مناطق مختلف جوش، به طور کلی با رشد دانه از فلز پایه به سمت جوش، استحکام کششی کاهش می یابد. به دلیل رشد شدید دانه در منطقه HAZ استحکام این منطقه کاهش یافته است. همچنین با توجه به پروفیل سختی در شکل(۱۱)، مقدار سختی از فلز پایه به سمت جوش، با شیب نسبتا زیادی کاهش می یابد و سپس با شیب ملایمی ادامه می یابد. تغییر قابل ملاحضه شیب نمودار در منطقه HAZ که ناشی از افزایش شدید اندازه دانه در این منطقه است، سبب شکست از منطقه HAZ شده است.



شکل۱۱– پروفیل سختی عرض حوضچه جوش برای همه نمونه های جوشکاری شده.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش،اثر تغییر جریان جوشکاری پرتو الکترونی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ پیشرفته Nb-1Zr مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی به صورت خلاصه آورده شده است:

– در همه نمونه‌های جوشکاری، رشد دانه در منطقه HAZ مشاهده شد که علت آن، نورد آلیاژ اولیه و کارسرد اعمالی بر آن می‌باشد که در هنگام جوشکاری، دچار تبلور مجدد و رشد دانه شده‌اند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-23]

– در همه نمونه‌ها، رشد دانه در مرز ذوب به صورت اپیتکسیال بود و هیچ مرز مشخصی بین فلز مذاب و فلز پایه وجود ندشت. علت این پدیده، عدم استفاده از فلز پر کننده و یکسان بودن ترکیب شیمیایی و فازهای فلز جوش و پایه است.

– نمونه با جریان جوشکاری ۳۰ میلی آمپر بهترین شرایط را از نظر عمق نفوذ و هندسه جوش نتیجه را داشت.

– انجماد در جوش‌ها از نوع سلولی بود و دندریت‌های بین سلولی در ناحیه مرکزی جوش در اثر ریزجدایش‌های ایجاد شده در بین سلول‌ها ایجاد شده است.

– بر اساس رابطه رزنتال در سه بعد، دمای تبلور مجدد این آلیاژ در حالت جوشکاری پرتو الکترونی برابر با^{o}C ۷۱۳ محاسبه شد.

– با مقایسه میانگین اندازه دانه در خط مرکزی جوش و مقادیر G×R محاسبه شده در مرکز جوش برای همه نمونه‌های جوشکاری شده، مشاهده شد که با افزایش G×R اندازه دانه در خط مرکزی جوش کاهش می یابد.

– پروفیل سختی مقطع عرضی جوش نشان می دهد که در همه نمونه ها سختی منطقه جوش و HAZ آلیاژ Nb-1Zr به طور قابل ملاحضه ای کمتر از فلز پایه باشد که می‌تواند ناشی از افزایش شدید اندازه دانه در این مناطق باشد.

– استحکام کششی جوش برای نمونه با جریان ۳۰ میلی آمپر اندازه گیری شد که برابر باMPa ۲۸۱ بدست آمد. این استحکام ۵۳٪ استحکام کششی فلز پایه بود.

– نمونه کشش از منطقه HAZ شکسته شد که علت آن ناشی از افزایش شدید اندازه دانه در این منطقه بود.

تقدیر و تشکر

در پایان از آقایان وحید بابایی، احمد رضا محمد و سید ابولفضل حسینی جهت کمک آنها تشکر می‌کنیم.

منابع

1- Mishra, Brajendra; “Review of Extraction, Processing, Properties & Applications of Reactive metals”, 2013, john Wiley & Sons.
2-Cardarelli, Francois;"material hand book",2008, Springer.
3-Alma Vazquez, S.K. Varma; “High-temperature oxidation behavior of Nb–Si–Cr alloys with Hf additions”, Alloys and Compounds 509, 2011, 7027-7033.
4- Linfen Su, LinaJia, JunfeiWeng, Zhen Hong, Chungen Zhou, Hu Zhang; “Improvement in the oxidation resistance of Nb–Ti–Si–Cr–Al–Hf alloyscontaining alloyed Ge and B”, Corrosion Science 88, 2014, 460-465.
5-Wenqing Wei, Hongwei Wang, ChunmingZou, Zhaojun Zhu, Zunjie Wei; “Microstructure and oxidation behavior of Nb-based multi-phase alloys”, Materials and Design 46, 2013, 1-7.
6- Maria D. Moricca and S.K. Varma; “the High-temperature oxidationcharacteristics of alloys from theNb-W-Cr system with c additions”, Refract. Met. 7, 2007, 66-69.
7-Wojcik, C.C. “High temperature niobium alloys”. AdvancedMaterials & Processes 12,1998, 27–30.
8-Campbell, F.C;“Elements of Metallurgy and Engineering Alloys”, 2008, ASM international.
9-X. Singer; E. Filimonova; D. Reschke; A. Rostovtsev; W. Singer; T. Tokareva, V. Zaharov; “Single-cell superconducting RF cavities from ultra-high-purity niobium”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2007, 518-520.
10-Niendorf T, Canadinc D, Maier HJ, Karaman I, Yapici GG. Microstructure-mechanical property relationships in ultrafine-grained NbZr. ActaMateriala 55. 2007; 6596–6605.
11-Rubitschek F, Niendorf T, Karaman I, Maier HJ. Corrosion fatigue behavior of a biocompatible ultrafine-grained niobium alloy in simulated body fluid. Mechanical Behavior of Biomedical Materials 5,2012,181–92.
12-F. Rubitschek; T. Niendorf; I. Karaman; H. J. Maier; “Surface hardening of biocompatible ultrafine-grained niobium-zirconium alloy by two-stage oxidation treatment”, Materials Science, 2013, 4549-4556.
13-Steve Lampman; “Weld Integrity and Performance (A Source Book Adapted from ASM International Handbooks)”, 1997, the Materials Information Society.
14-B.S. Yilbas; M. Sami; J. Nickel; “Introduction into the electron beam welding of austenitic 321-type stainless steel”, Materials Processing Technology, 1998, 13–20.
15-Wang Yajun; Fu Pengfei; Guan Yongjun; “Research on modeling of heat source for electron beam welding fusion-solidification zone”,Aeronautics, 2013, 217-223.
16-S. E. Demyanov; E.Yu.Kaniukov; “Superconducting properties of ultra-pure niobium welded joints”, Low Temperature Physics, 2015, 671-678.
17-M.St. We˛glowski; S. Błacha; A. Phillips; “Electron beam welding e Techniques and trends e Review”, Vacuum 130, 2016, 72-92.
18-Yu.V. Budkin, “Special features of the physical–chemical processes of interaction of refractory metals in electron beam welding”, Welding International, 2011, 309-312.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-23]

19-Yu. V. Budkin; V. A. Erofeev; "Physico–mathematical model of the process ofelectron beam welding refractory metal to steel", Welding International, 2011, 562-565.
20-M.J. Torkamany, F.MalekGhaini, R.Poursalehi, A.F.H.Kaplan; "Combination of laser keyhole and conduction welding: Dissimilar laser welding of niobium and Ti-6Al-4V", Optics and Lasers in Engineering 79, 2016, 9-15.
21-S. Edition, S. Kou, Welding metallurgy, John Wiley & Sons, 2003.
22-A.Hajitabar; H.Naffakh-Moosavy:" Electron beam welding of difficult-to-weld austenitic stainless steel/Nb-based alloy dissimilar joints without interlayer", Vacuum 146, 2017,170-178.
23- R. Nunes, ASM HandBook Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 1990.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-23]