

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۱۰۵۰ فوق ریزدانه: بررسی متغیرهای هندسه پین، دمای اتمسفر جوشکاری و سرعت‌های جوشکاری بر خواص مکانیکی

مقاله پژوهشی

مرتضی حسینی^{۱*}، حبیب دانش منش^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

۲- استادیار، هسته پژوهشی فناوری نانو، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

۳- استاد، بخش مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

* m.hosseini@hormozgan.ac.ir; hosseini281@gmail.com

چکیده

به کارگیری آلومینیوم فوق ریزدانه و یا نانو ساختار به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا بسیار مورد توجه می‌باشد. یکی از چالش‌های اصلی این حوزه جوشکاری این مواد جهت تولید سازه‌های مهندسی می‌باشد. با توجه به پتانسیل بالای روش جوشکاری حالت جامد اصطکاکی اغتشاشی در اتصال مواد فلزی نانو ساختار، در این تحقیق با استفاده از تجهیزات و تکنیک‌های مختلف مانند میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی، آزمایش ریز سختی و آزمایش کشش تک‌محوره نحوه اثر برخی از متغیرهای اصلی این روش جوشکاری بر خواص مکانیکی اتصال ورق‌های آلومینیومی ۱۰۵۰ فوق ریزدانه تولید شده توسط تکنیک اتصال نورد تجمعی مورد مطالعه قرار گرفته است. متغیرهای مورد مطالعه شامل سرعت‌های جوشکاری، هندسه پین ابزار جوشکاری و دمای اتمسفر جوشکاری بوده است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده افزایش ریز سختی جوش با کاهش سرعت چرخشی یا افزایش سرعت انتقالی ابزار به دلیل حرارت کمتر ورودی به منطقه جوش می‌باشد. بررسی تأثیر هندسه پین نشان‌دهنده کم تأثیر بودن این متغیر بر خواص کششی اتصال می‌باشد. تنها در مورد ابزار با پین رزوه خورده بهبود مختصری در خواص کششی ایجاد شده است. انجام جوشکاری به شکل زیر آبی به نسبت جوشکاری در هوا می‌تواند سبب بهبود استحکام اتصال شود اما استفاده از آبی با دمای بسیار پایین (۱ درجه سانتی‌گراد) در مقایسه با نمونه جوشکاری شده در آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با ایجاد برخی عیوب جوشکاری مانند حفرات و کانال داخلی تأثیری معکوس داشته و خواص کششی اتصال ایجاد شده را به شدت تنزل می‌دهد.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴

کلید واژگان:

آلومینیوم فوق ریزدانه
۱۰۵۰

دمای محیط جوشکاری

اصطکاکی اغتشاشی

هندسه ابزار جوشکاری

کشش تک‌محوره

ریز سختی

Friction Stir Welding of Ultrafine-Grained Al 1050: Investigation of Pin Geometry, Welding Atmosphere Temperature and Welding Speeds on the Mechanical Properties

Morteza Hosseini^{1,2*}, Habib Danesh Manesh³

1- Assistance professor, Department of mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

2- Assistance professor, Nanotechnology Research Center, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

3- Professor, Department of Materials Science and Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.

* m.hosseini@hormozgan.ac.ir; hosseini281@gmail.com

Article Information

Original Research Paper

DOR:

20.1001.1.24233226.1401.16.2.5.4

Keywords:

Ultrafine Grained Al 1050

Friction Stir Welding Atmosphere

Temperature

Welding Tool Geometry

Uniaxial Tensile Test

Microhardness

Abstract

The application of ultrafine-grained or nanostructured aluminum is very interesting owing to its high strength to weight ratio. Welding of these materials is one of the main challenges. Regarding the potential of the solid-state friction stir welding in joining of nanostructured materials, in the current research different equipment and techniques like optical and scanning and transmitted electron microscopes, Vickers microhardness, and uniaxial tensile tests were employed to study the effect of major welding parameters on the bonding quality of friction stir welded ultrafine-grained Al 1050 alloy produced via accumulative roll-bonding (ARB) method. The studied parameters were rotation and traveling speeds, pin geometry as well as welding atmosphere temperature. The results show the microhardness enhancement of the weld zone by decreasing the rotation speed or increment of traveling speed due to lower heat generation within the stir zone. Investigation of the pin geometry depicts an insignificant impact of this variable on the weld tensile properties. Only in the case of a threaded pin, a slight enhancement in the tensile properties was achieved. Submerge or underwater welding could improve joint strength. However, the application of extremely cold water with respect to 25° C water shows a reverse effect and leads to severe weld quality degradation owing to defects formation (like internal channels and surface discontinuity).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Morteza Hosseini, Habib Danesh Manesh, Friction Stir Welding of Ultrafine-Grained Al 1050: Investigation of Pin Geometry, Welding Atmosphere Temperature and Welding Speeds on the Mechanical Properties, New Process in Material Engineering, 2022, 16(2), 51-63.

۱- مقدمه

امروزه استفاده از فلزات و آلیاژهای با خواص ویژه در صنایع مختلف گسترش یافته است. در این راستا آلومینیوم در شکل خالص تجاری و یا آلیاژی یکی از معروفترین و پرکاربردترین فلزها می باشد که به دلیل چگالی نسبتاً پائین و همین طور برخی دیگر از خواص مطلوب فیزیکی - شیمیایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. توجه به چگالی پائین این فلز باعث شده تحقیقات زیادی بر روی آن انجام شود. بیشتر تحقیقات در این راستا است که با افزایش استحکام، سختی، چقرمگی و سایر خصوصیات مکانیکی بتوان در کاربردهای ویژه ای از آن بهره برد [۱-۳]. روش های متفاوتی برای ارتقاء خواص مکانیکی آلومینیوم پیشنهاد شده است. یکی از رایجترین این روش ها ایجاد نانو ساختار یا دانه های فوق ریز با مجموعه روش های تغییر شکل پلاستیک شدید می باشد [۱-۲]. در این روش ها با اعمال کرنش های بالا در چندین مرحله، می توان اندازه دانه فلز مورد نظر را به ابعاد متوسط کمتر از یک میکرومتر (فوق ریزدانه) و یا حتی کمتر از ۱۰۰ نانومتر (نانو ساختار) رساند [۱].

فرآیند اتصال نورد تجمعی یکی از روش های تغییر شکل پلاستیک شدید می باشد [۴-۵]. این روش در مورد ورق ها استفاده می شود. خواص مکانیکی حاصل از پردازش مواد فلزی با این روش بسیار ویژه می باشند. به عنوان مثال استحکام ورق آلومینیومی خالص تجاری پس از ۶ مرحله از فرآیند اتصال نورد تجمعی به اندازه فولاد کم کربن می باشد [۶]. یکی از کاربردهایی که برای محصولات تولید شده با این روش می توان متصور شد، صنایع حمل و نقل می باشد [۳]. به دلیل برخی محدودیت ها در این فرآیند و سایر روش های تغییر شکل پلاستیک شدید مانند محدودیت در ظرفیت و میزان نیرو و عدم امکان تولید برخی اشکال هندسی، در بسیاری از موارد نمی توان بدون بهره گیری از روش های جوشکاری و اتصال، وسیله یا قطعه ای از این مواد ریزساختار را تولید نمود [۶]. از جهت دیگر بهره گیری از روش های جوشکاری ذوبی به دلیل ایجاد دانه های درشت در منطقه جوش و مناطق مجاور، موجب از بین رفتن

دانه های فوق ریز و به طبع آن از بین رفتن امکان دستیابی به خصوصیات مکانیکی مورد انتظار می گردد [۶]. بنابراین لزوم تحقیقات جامع در مورد روش های جوشکاری این دسته از مواد، ضروری است.

روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی که در سال ۱۹۹۱ و توسط موسسه TWI ابداع گردید، به دلیل مزایای بی شماری که به ویژه در مورد آلومینیوم و سایر فلزات سبک دارد، بسیار مورد توجه بوده است [۶-۷]. از جمله مزایای آن می توان به عدم ایجاد حفره در منطقه جوش در آلومینیوم به دلیل حالت جامد بودن فرآیند، سادگی فرآیند و عدم نیاز به گاز محافظ و آماده سازی سطحی خاص، مطابقت با معیارهای محیط زیستی و عدم ایجاد دود، غبار و تراوشات منطقه ذوب، قابلیت اتوماسیون بالا، اعوجاج بسیار کم در محل جوش، امکان جوش بین فلزات غیر همسان را نام برد [۸-۱۰]؛ اما یک مزیت بسیار مهم این روش جوشکاری ایجاد دانه هایی در ابعاد ریز (چند میکرونی) و یا فوق ریز در محل جوش و استحکام مکانیکی بالا در محل جوش می باشد [۸]. این مزیت اساسی باعث شده است تا توجه ویژه ای به این روش جوشکاری به ویژه در مورد جوشکاری مواد با دانه بندی فوق ریز و نانو ساختارها معطوف گردد. در این روش به طور خلاصه یک ابزار جوشکاری که دارای یک پین و یک شانه است در محل درز جوش به شکل تقریباً عمودی قرار گرفته و با حرکت دورانی در حالی که به سطح قطعه در آن محل نیرو وارد می کند، موجب گرمایش در محل درز در اثر اصطکاک شده و باعث خمیری شدن ماده در زیر سطح پین و شانه می شود. در این میان اغتشاش ایجاد شده در محل جوش موجب درهم آمیختن فلز خمیری در دو سر درز جوش شده و در نهایت باعث تشکیل پیوند بین دو سمت درز جوش می گردد [۸].

هرچند تحقیقات مختلفی در مورد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فلزات دارای دانه بندی فوق ریز صورت پذیرفته است اما مطالعات صورت گرفته در مورد جوشکاری زیرآبی این دسته از مواد فلزی بسیار محدود بوده است [۱۱-۱۳]. پیشتر نشان داده شد که استفاده از روش

۲- مواد و روش‌ها

ماده اولیه مورد استفاده در این تحقیق ورق آلومینیوم خالص تجاری ۱۰۵۰ آنیل شده به ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشد. جهت انجام فرآیند اتصال نورد تجمعی در ابتدا ورق در ابعاد ۶۰ در ۲۵ میلی‌متر مربع برش خورده و سپس با استفاده از استون تمام وجوه آن تحت چربی زدایی قرار گرفته است. سپس جهت از بین بردن لایه اکسیدی و ایجاد سختی سطحی یک سمت از هر ورق تحت فرآیند برس کاری با برس سیمی مدور قرار گرفته است. در ادامه دو سطح برس کاری شده روی هم قرار گرفته و سر و ته نمونه‌ها (جهت جلوگیری از لغزش دو ورق بر روی هم) با سیم مسی تثبیت شده‌اند. سپس جهت ایجاد پیوند، دولایه حاصل تحت نورد هم‌زمان با میزان کاهش سطح مقطع ۵۰ درصد قرار گرفته‌اند. این مرحله در واقع سیکل اول اتصال نورد تجمعی می‌باشد. در ادامه ورق حاصل در راستای طولی به دو قسمت مساوی تقسیم شده و بعد از آماده‌سازی سطحی مجدد (شامل چربی زدایی و برس کاری) و قرار گرفتن بر روی هم فرآیند نورد و جوش سرد نوردی با کاهش ضخامت ۵۰ درصد ادامه یافته است (سیکل دوم). فرآیند اتصال نوردی در دمای اتاق، به صورت خشک و با سرعت چرخشی (غلطک) برابر با ۲۰ دور بر دقیقه انجام شده است. جهت دستیابی به ورقی با ساختار فوق ریزدانه فرآیند اتصال نورد تجمعی مطابق رویه تشریح شده تا شش سیکل ادامه یافته است.

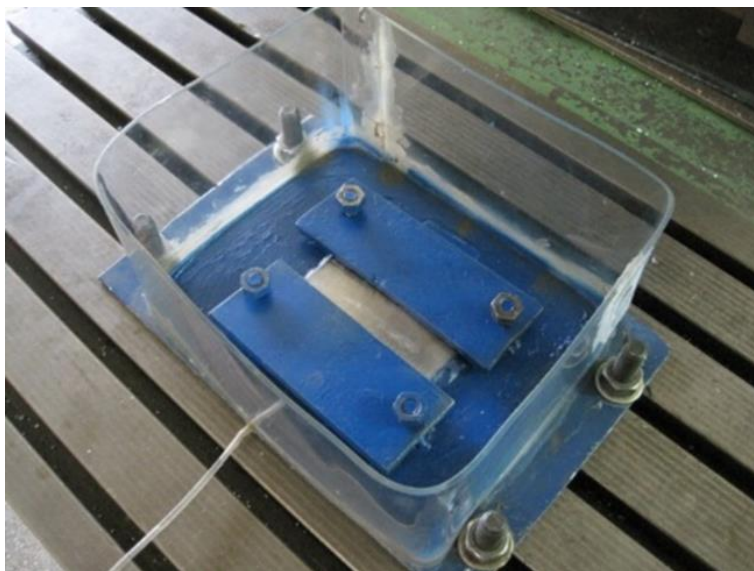
جهت انجام فرآیند جوشکاری، ورق‌های حاصل از سیکل ششم فرآیند اتصال نورد تجمعی به ابعاد ۷۰ در ۲۵ میلی‌متر مربع برش خورده‌اند. جهت انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از دستگاه فرز اونیورسال استفاده شده است. شکل (۱) قید و بند مورد استفاده برای تثبیت نمونه‌ها در فرآیند جوشکاری (تجهیز شده با مخزن نگهداری آب) را نمایش می‌دهد.

جهت بررسی تأثیر هندسه پین بر کیفیت اتصال از چهار نوع ابزار مختلف (شکل (۲)) استفاده شده است. تمامی ابزارها از فولاد SPK با سختی ویکرز ۷۲۸ تولید شده‌اند. قطر پین

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در مورد آلومینیوم خالص تجاری فوق ریزدانه منجر به افت کمتر استحکام و ریز سختی محل اتصال به نسبت فلز پایه خواهد شد [۱۱]. دلیل این پدیده حفظ نسبی ساختارهای فوق ریزدانه با چگالی نابجایی بالا در محل اتصال در اثر نرخ تبرید بالا در جوشکاری زیرآبی می‌باشد. ایجاد منطقه متأثر از گرمای (HAZ) باریک‌تر در روش جوشکاری زیرآبی از دیگر نتایج این تحقیق می‌باشد. در بررسی‌های مشابه مزیت استفاده از تکنیک زیرآبی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم فوق ریزدانه سری ۲ و ۶ نیز مورد تأیید قرار گرفته است [۱۲]- [۱۳]. وانگ و همکارانش^۱ نشان دادند که انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیرآبی برای اتصال آلیاژ آلومینیوم ۲۰۱۷ فوق ریزدانه تولید شده به روش ECAP منجر به یک جوش سالم می‌گردد [۱۲]. آن‌ها نشان دادند هرچند که اندازه دانه در محل جوش به نسبت فلز پایه بزرگ‌تر است اما نرخ تبرید بالا در این روش منجر به حفظ ساختارهای فوق ریزدانه گردیده است. لیو و همکارانش^۲ نتایج حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب و در اتمسفر هوا برای آلومینیوم ۶۰۶۱ فوق ریزدانه را مقایسه کردند [۱۳]. آن‌ها نشان دادند جوشکاری در زیر آب می‌تواند به‌طور مؤثری از بزرگ شدن اندازه دانه پس از تبلور مجدد و کاهش چگالی نابجایی ممانعت کرده و نرخ رسوب‌گذاری در آلیاژ را بکاهد. در نتیجه در نمونه جوشکاری شده در زیر آب بازدهی جوش ۷۳ درصد حاصل شده است در حالی که در نمونه اتصال یافته در هوا این عدد حدود ۴۵ درصد می‌باشد. در تحقیقات بالا تنها تأثیر پارامتر نوع محیط در کیفیت جوش حالت جامد اصطکاکی اغتشاشی مورد ارزیابی قرار گرفته است اما پارامترهای دیگری مانند دمای سیال آب، هندسه ابزار یا سرعت چرخش و پیشروی بر کیفیت اتصال ورق‌های فوق ریزدانه فلزی مورد بررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق سعی شده است تا پارامترهای مذکور بر خواص مکانیکی محل اتصال مورد بررسی قرار بگیرند.

بوده‌اند. در این بخش از تحقیق سرعت چرخشی ابزار ۶۳۰ دور بر دقیقه و سرعت انتقالی ابزار ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه (گام چرخشی ۰/۰۸ میلی‌متر در هر دور) در اتمسفر مرسوم (هوا) انتخاب شده‌اند.

ابزار با هندسه استوانه‌ای ۳ میلی‌متر و ارتفاع همه پین‌ها ۱/۶۵ میلی‌متر بوده است. همچنین سطح مقطع تمام پین‌های مورد استفاده آن‌ها یکسان می‌باشد. قطر شانه و زاویه کج شدگی در تمام آزمایش‌ها به ترتیب ۹ میلی‌متر و ۳ درجه



شکل (۱): قید و بند مورد استفاده جهت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

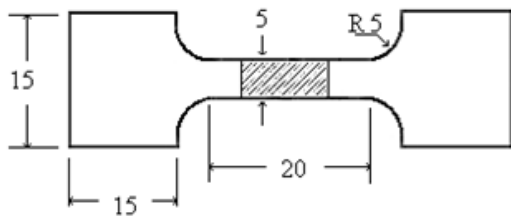


شکل (۲): اشکال مختلف از پین‌های مورد استفاده در این تحقیق. پین (الف) استوانه‌ای ساده، (ب) استوانه‌ای رزوه خورده، (پ) مخروط ناقص و (ت) مکعبی

شده است تا از سه محدوده متفاوت از سرعت‌های مرسوم جوشکاری (کند، متوسط و تند) بهره‌گیری شود تا تفاوت‌های احتمالی در خواص حاصل به‌وضوح عیان گردد. سرعت چرخشی ۱۰۰ دور بر دقیقه و سرعت انتقالی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه سرعت‌های نسبتاً پایین، سرعت چرخشی

برای بررسی پارامتر سرعت‌های جوشکاری بر خواص مکانیکی منطقه جوش، فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در محیط هوا با پین استوانه‌ای ساده و در سرعت‌های چرخشی و انتقالی و گام چرخشی مختلف، مطابق با جدول (۱)، انجام شده است. در این راستا سعی

متوسط حاصل گزارش شده است. آزمایش کشش قطعات در دمای محیط با نرخ کشش ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه توسط دستگاه کشش اینسرون انجام شده است. شکل (۳) ابعاد نمونه کششی و منطقه جوش (ناحیه هاشور خورده) را نشان می‌دهد. ابعاد نمونه استفاده شده یک پنجم استاندارد JIS - No.5 در نظر گرفته شده است [۱۵]. جهت قابل مقایسه بودن نتایج تمامی نمونه‌های کشش تولید شده دارای ابعاد کاملاً یکسان بوده‌اند. شایان‌ذکر است که جهت جلوگیری از تأثیر تغییرات سطح مقطع محل جوش و همچنین اجتناب از ایجاد محل‌های تمرکز تنش، سطوح نمونه تحت سمباده کاری سطحی قرار گرفته است.



شکل (۳): ابعاد نمونه‌های کششی مورد استفاده در تحقیق حاضر (برحسب میلی‌متر)

۳- نتایج و بحث

شکل (۴) مقادیر ریز سختی منطقه جوش در نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهند. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش سرعت انتقالی یا کاهش سرعت چرخشی مقدار متوسط ریز سختی در منطقه جوش افزایش یافته است. به‌طور کلی کاهش سرعت انتقالی و افزایش سرعت چرخشی سبب افزایش میزان کرنش در ماده واقع در زیر ابزار جوشکاری می‌گردد اما به‌طور هم‌زمان میزان حرارت تولید شده و در نتیجه دمای حاصل در محل مذکور را نیز افزایش می‌دهد [۹-۸]. این دو پدیده تأثیر معکوس بر خواص مکانیکی محل اتصال خواهند داشت، بدین‌صورت که افزایش دما، تبلور مجدد و مکانیزم‌های تاب‌کاری را تسریع نموده و در نتیجه موجب کاهش در ریزسختی محل جوش می‌گردد، اما افزایش کرنش می‌تواند باعث ریزتر شدن دانه‌ها، افزایش میزان دانسیته نابجایی‌ها و در نتیجه طبق رابطه هال-پچ، افزایش ریزسختی محل جوش

۲۵۰ دور بر دقیقه و سرعت انتقالی ۱۲۵ میلی‌متر بر دقیقه سرعت‌های متوسط و سرعت چرخشی ۶۳۰ دور بر دقیقه و سرعت انتقالی ۱۳۵ میلی‌متر بر دقیقه سرعت‌های نسبتاً بالا در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی محسوب می‌شوند.

جدول (۱): مقدار و نسبت سرعت‌های چرخشی و انتقالی

مورد استفاده در تحقیق حاضر						
ردیف	انجام آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵
سرعت چرخشی (rpm)	۶۳۰	۶۳۰	۶۳۰	۶۳۰	۲۵۰	۱۰۰
سرعت انتقالی (mm/min)	۳۱۵	۱۲۵	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
گام چرخشی (mm/r)	۰/۵	۰/۲	۰/۲	۰/۸	۰/۲	۰/۵

برای بررسی تأثیر دمای آب در جوشکاری زیرآبی از آب خالص با دمای ۲۵ و ۱ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. جهت مقایسه، یک نمونه نیز با شرایط یکسان و در محیط هوا تحت جوشکاری قرار گرفته است. در این بخش از سرعت چرخشی ۶۳۰ دور بر دقیقه و سرعت انتقالی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه بهره‌گیری شده است.

پس از انجام فرآیندهای جوشکاری و جهت بررسی‌های بصری از میکروسکوپ نوری (Leica DM750)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (Cambridge S360) و الکترونی عبوری (JEM-2100F) استفاده شده است. پیش از بررسی سطح مقطع جوش توسط میکروسکوپ نوری، نمونه‌ها در مقطع موردنظر برش خورده، مانده شده و تحت پالایش با کاغذ سمباده و سپس پارچه مخصوص قرار گرفته‌اند. جهت بررسی سطوح شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از دیتکتور SE با فاصله کاری ۹ میلی‌متر بهره‌گیری شده است. نمونه‌های بررسی شده با میکروسکوپ الکترونی عبوری از مرکز منطقه جوش و با پالایش مکانیکی و سپس برداشت یونی آرگون تهیه شده‌اند. برای بررسی خواص مکانیکی از آزمایش‌های ریز سختی یا ریز سختی ویکرز و کشش تک‌محوره استفاده شده است. آزمایش میکروسختی ویکرز تحت نیروی ۲۵ گرم-نیرو در زمان ۱۵ ثانیه و نرخ اعمال نیروی ۲ گرم بر ثانیه و طبق استاندارد ASTM کد E92-17 انجام شده است [۱۴]. آزمایش ریزسختی در شش نقطه انجام و سپس مقدار

خواهد شد. چنانچه پیشتر بیان شد با کاهش سرعت انتقالی (در سرعت چرخشی ثابت) و افزایش سرعت چرخشی (در سرعت انتقالی ثابت) ابزار جوشکاری و یا به عبارت دیگر کاهش میزان گام چرخشی و افزایش میزان حرارت ورودی، ریزسختی مرکز جوش کاهش می‌یابد. این بدان معناست که اثر افزایش حرارت به دلیل کاهش گام چرخشی بر اثر افزایش کرنش غالب شده است. در واقع به دلیل بالا ماندن دما در محل جوش و سرد شدن تدریجی آن پس از عبور ابزار جوشکاری، پدیده تبلور مجدد و رشد دانه باعث کاهش در سختی می‌گردد. حال هر چه که این دما بالاتر باشد، این پدیده شدیدتر اتفاق می‌افتد. نتایج مشابهی نیز در تحقیقات پیشین گزارش شده است [۸]. شکل (۵) تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از منطقه جوش نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت انتقالی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و گام چرخشی ۰/۲ و ۰/۵ میلی‌متر بر دور را نشان می‌دهد. تشکیل دانه‌های هم‌محور بزرگ‌تر با اندازه متوسط حدود ۱ میکرون پس از پدیده تبلور مجدد در نمونه جوشکاری شده با گام چرخشی ۰/۲ (مطابق مطالب عنوان شده در بالا) در مقایسه با نمونه جوش خورده در گام چرخشی ۰/۵ (متوسط اندازه دانه حدود ۷۰۰ نانومتر) کاملاً مشهود است. همچنین، هر چند در هر دو نمونه میزان نابجایی کمی دیده می‌شود (به دلیل وقوع تبلور مجدد) اما حضور نابجایی بیشتری در نمونه جوشکاری شده با گام چرخشی بالاتر قابل مشاهده است. اندازه دانه کوچک‌تر به همراه چگالی نابجایی بیشتر سبب میزان بالاتر ریزسختی در نمونه جوشکاری شده با گام چرخشی بیشتر شده است.

بر اساس شکل (۴)، در گام‌های چرخشی ثابت با افزایش سرعت انتقالی (یا افزایش سرعت چرخشی) میزان ریزسختی در منطقه جوش کاهش می‌یابد. این پدیده را می‌توان توسط سرعت ورود حرارت به محل جوش توضیح داد. با علم به این نکته که پدیده انتقال حرارت یک فرآیند تابع زمان است، در یک فرآیند جوشکاری و یا هر پدیده مشابه دیگری، هر چه بتوان با نرخ بالاتری یک میزان حرارت معین را به یک محل از ماده وارد کرد (به‌ویژه فلزات دارای

ضریب رسانایی حرارتی بالا مانند آلومینیوم)، به دلیل فرصت کمتر در انتقال حرارت (به‌ویژه از طریق رسانش)، آن محل به دمای بیشینه بالاتری می‌رسد. یکی از مهم‌ترین متغیرها در پدیده‌های ترمومکانیکی، به دلیل نفوذی بودن ماهیت این پدیده‌ها، دمای بیشینه می‌باشد. این فاکتور به دلیل تأثیر "نمایی" در پدیده‌های نفوذی، بسیار مهم‌تر از زمان گرمایش عمل می‌کند. هر چند که در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی میزان کل حرارت ورودی عمدتاً متناسب است با گام چرخشی [۸] (به طوری که در گام چرخشی ثابت میزان کل حرارت ورودی تقریباً ثابت است)، در شرایطی که میزان سرعت چرخشی (یا سرعت انتقالی) ابزار بالاتر باشد، به دلیل اعمال حرارت در زمان کوتاه‌تر در یک مکان مشخص و نبود فرصت کافی برای اتلاف حرارت از محل موردنظر، افزایش دمای آن محل بیشتر است [۸]. در حالت معکوس (زمانی که میزان سرعت چرخشی یا سرعت انتقالی ابزار پایین‌تر باشد)، حرارت ایجاد شده به دلیل ضریب رسانش حرارتی بالای آلومینیوم به سایر مناطق فلز پایه، قید و بند و میز کار منتقل شده و تلف می‌شود و در نتیجه دمای بیشینه کمتری حاصل می‌گردد؛ اما در عوض به دلیل سرعت انتقالی کمتر ابزار، هر منطقه در زمان طولانی‌تری تحت تأثیر حرارت تولید شده در همان محل یا مناطق مجاور آن در اثر جوشکاری قرار می‌گیرد. در مقایسه همان‌طور که ذکر شد اثر دمای بیشینه بسیار مهم‌تر از اثر زمان اعمال حرارت می‌باشد، بنابراین دمای بالاتر ایجاد شده در سرعت چرخشی بالاتر می‌تواند باعث تسریع تبلور مجدد و در ادامه افزایش رشد دانه و در نتیجه ریزسختی نهایی کمتری در محل جوش گردد.

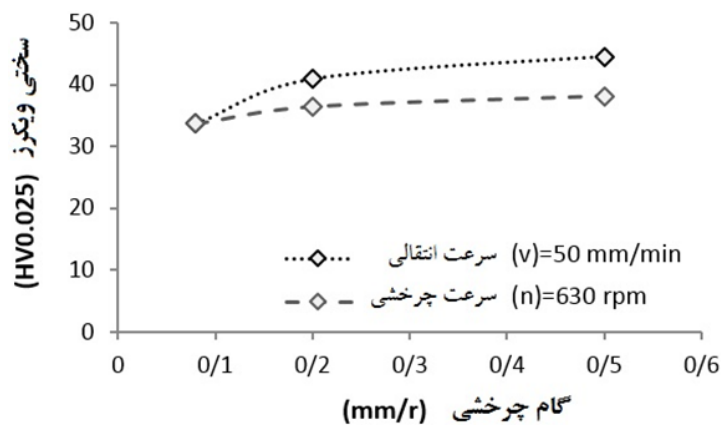
شکل (۶) تأثیر هندسه پین ابزار جوشکاری بر خواص کششی اتصال در نمونه‌های جوش خورده را نشان می‌دهد. در شکل مقادیر متوسط استحکام کششی، استحکام تسلیم و درصد کشیدگی شکست نشان داده شده است. با توجه به شکل فوق با تغییر در هندسه پین ابزار در خواص مکانیکی فوق تغییر محسوسی ملاحظه نمی‌شود. تنها در نمونه‌ای که

هرچند که این افزایش نیز به دلیل اثر غالب شانه چندان قابل توجه نمی‌باشد.

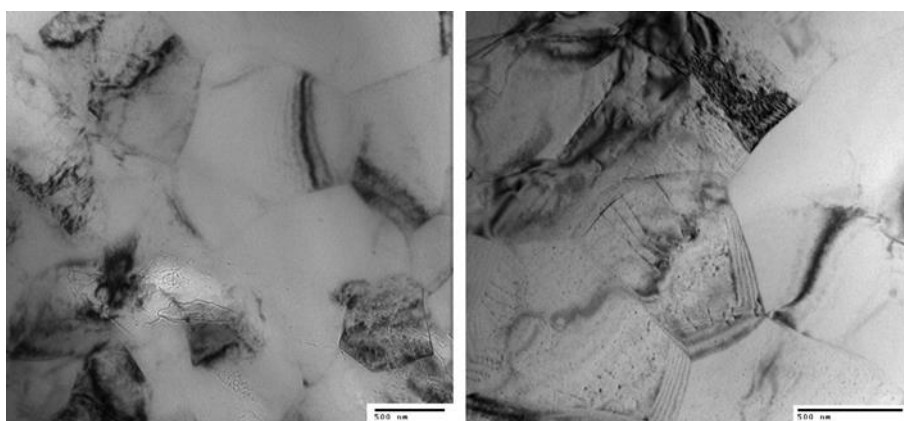
در ادامه تحقیق تأثیر دمای محیط در جوشکاری زیرآبی بر ساختار و خواص کششی منطقه جوش موردبررسی قرار گرفته است. تصویر (۷) سطح فوقانی ناحیه جوش ایجاد شده در آب ۱ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد به همراه نمونه جوشکاری شده در هوا را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییر محیط جوشکاری از هوا به آب و کاهش دمای محیط و یا به عبارت دیگر افزایش نرخ تبرید سطح جوش خشن‌تر می‌گردد. به‌طورکلی انجام فرآیند جوشکاری به شکل زیرآبی موجب افزایش نرخ تبرید و دمای بیشینه در ماده خمیری ایجاد شده در زیر ابزار جوشکاری می‌گردد [۱۶]، این افزایش سرعت در تبرید و هم‌زمان بیشینه دمایی کمتر می‌تواند باعث شود که دست کم بخشی از ماده قرار گرفته در زیر ابزار به اندازه کافی (یا طی زمان کافی) حالت پلاستیسته پیدا نکرده و عملاً در تماس با شانه یا پین ابزار به دلیل استحکام و ریز سختی بالاتر در حین اعمال کرنش بالا در انسجام ماده نقصان ایجاد شود. این که چنین وضعیتی تا چه حد می‌تواند سطحی بوده یا به عمق ماده نفوذ کرده در ادامه موردبحث قرار خواهد گرفت. شکل (۸) مقطع نمونه‌های جوش خورده در زیر آب در دو دمای مختلف را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه جوش خورده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد یک جوش عاری از عیب ایجاد شده است. این در حالی است که در آب با دمای ۱ درجه سانتی‌گراد علاوه بر سطح بسیار منفصل و خشن، عمق جوش نیز دارای عدم پیوستگی می‌باشد. عیب فوق در واقع عیب تشکیل کانال در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی محسوب می‌شود که به دلیل گرمای ناکافی در حین فرآیند جوشکاری ایجاد می‌شود [۱۷].

اتصال با استفاده از پین استوانه‌ای رزوه خورده انجام شده است، حدود ۷ درصد افزایش در تنش کششی و تنش تسلیم و حدود ۱۱ درصد افزایش در کشیدگی نسبی مشاهده می‌گردد. دلیل نتایج فوق را می‌توان چنین بیان نمود که به‌طورکلی از آن جهت که سهم شانه ابزار در اعمال حرارت لازم جهت انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، به دلیل سطح تماس، نیروی اعمالی بر سطح تماس و سرعت مماسی بیشتر، به نسبت پین بیشتر است [۸-۹]، بنابراین شکل هندسی پین، در شرایطی که مساحت سطح مقطع پین ثابت است، تأثیر زیادی در استحکام کششی نهایی، تنش تسلیم و درصد کشیدگی نسبی ندارد. از طرف دیگر در تحقیق حاضر نسبت سطح شانه به ضخامت ورق نسبتاً زیاد می‌باشد (۹ به ۲) و آلومینیوم نیز فلزی با رسانش حرارتی زیاد می‌باشد، بنابراین حرارت تولید شده در سطح شانه، دمای کل حجم ماده واقع در زیر ابزار را بالا برده و در واقع اثر حرارت دهی سطح پین را تحت تأثیر قرار داده و کم‌رنگ می‌نماید. در حقیقت در این شرایط بیشتر شانه و هندسه آن می‌تواند تعیین‌کننده باشد. به عبارت دیگر احتمالاً هندسه پین زمانی می‌تواند اثر خود را نشان دهد که ورق دارای ضخامت بیشتری بوده و یا قطر شانه ابزار کوچک‌تر باشد.

اما در مورد پین استوانه‌ای رزوه خورده، به دلیل اینکه در این حالت ماده قرار گرفته در مجاورت پین (مواد قرار گرفته در دو طرف درز جوش) امکان کمتری برای لغزش بر روی پین دارند (به دلیل وجود شکل مارپیچی در جداره پین) و همچنین این مواد علاوه بر حرکت چرخشی به دور جداره پین در امتداد بالا و پائین نیز حرکت می‌کنند، در نتیجه اختلاط بیشتری صورت گرفته و کرنش بیشتری نیز بر روی این مواد اعمال می‌گردد و موجب ریزتر شدن دانه‌ها در این محل و افزایش استحکام اتصال می‌گردد [۸-۹]،



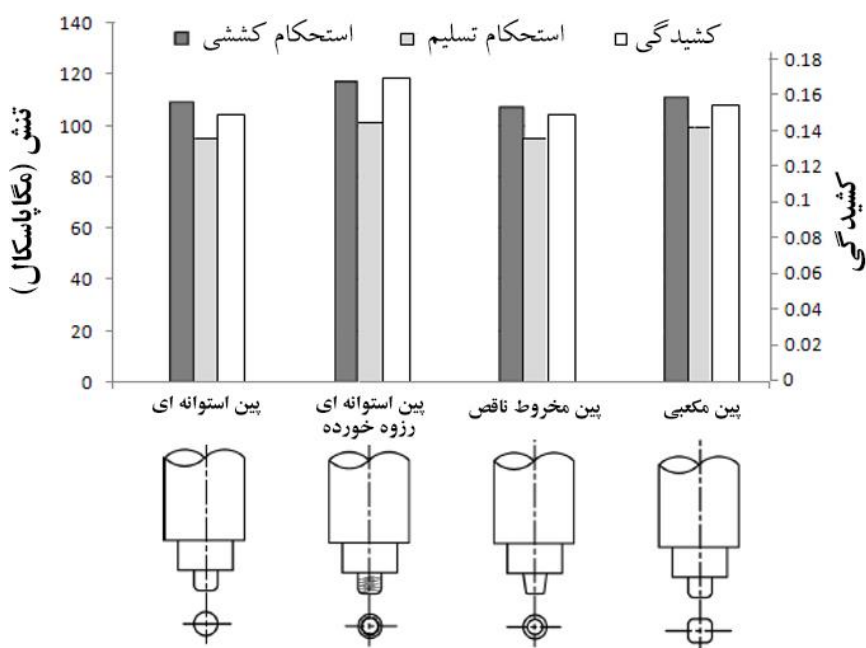
شکل (۴): تأثیر سرعت انتقالی و چرخشی و گام چرخشی بر ریزسختی جوش در نمونه‌های جوشکاری شده در هوا



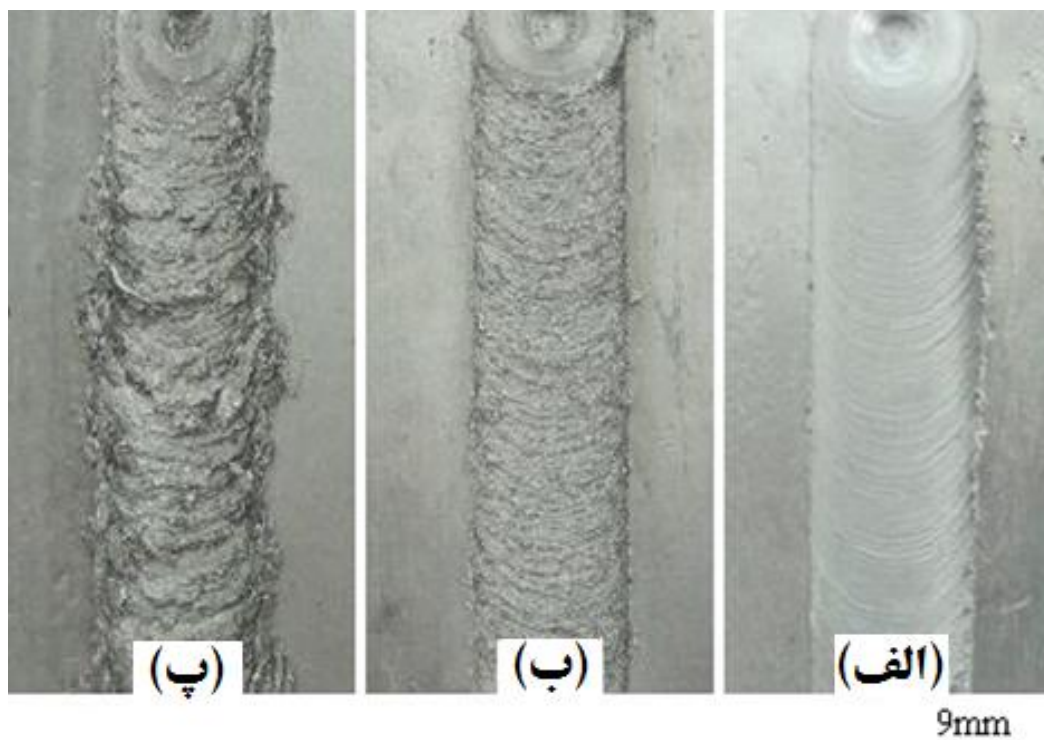
(ب)

(الف)

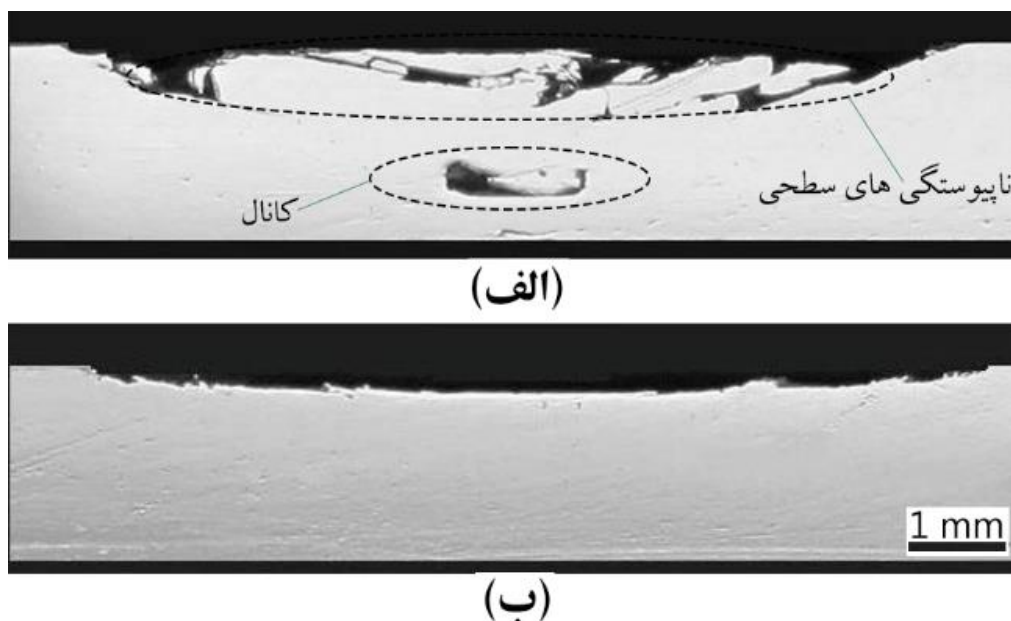
شکل (۵): تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نمونه‌های جوشکاری شده در هوا در سرعت انتقالی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و گام چرخشی (الف) ۰/۵ و (ب) ۰/۲ میلی‌متر بر هر دور



شکل (۶): تأثیر هندسه پین ابزار جوشکاری بر استحکام کششی نهایی، استحکام تسلیم و درصد کشیدگی نسبی



شکل (۷): تصاویر سطح فوقانی جوش ایجاد شده توسط بین استوانه‌ای در شرایط محیطی و دمایی متفاوت شامل (الف) هوا، (ب) آب در دمای ۲۵ و (پ) ۱ درجه سانتی‌گراد در چرخشی ۶۳۰ دور بر دقیقه و سرعت انتقالی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه



شکل (۸): تصویر مقطع جوش در نمونه جوشکاری زیر آبی توسط بین استوانه‌ای تحت سرعت چرخشی ۶۳۰ دور بر دقیقه و سرعت انتقالی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه با دمای محیطی (الف) ۱ و (ب) ۲۵ درجه سانتی‌گراد

استحکام کششی مربوط به نمونه اتصال نوردی شده و کمترین مربوط به نمونه جوشکاری شده در آب ۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. روند تغییرات استحکام در نمونه اتصال نوردی شده، جوشکاری شده در آب ۲۵ درجه و

شکل (۹) نمودار تنش- کرنش مهندسی آلومینیوم خالص در شرایط آئیل و در شرایط اتصال نورد تجمعی شده (جهت TD) و ورق‌های جوش خورده در شرایط مختلف محیطی- دمایی را نشان می‌دهد. چنانچه مشخص است بیشترین

جوشکاری شده در هوا با روند تغییرات اندازه دانه (طبق رابطه هال-پچ) قابل توجیه بوده و بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱]. در این راستا شکل (۱۰) تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از ریزساختار فلز پایه (اتصال نوردی شده) و محل جوش در نمونه‌های جوشکاری شده در آب و هوای ۲۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. وجود دانه‌های هم‌محور در نمونه‌های جوشکاری شده که نشانی از وقوع تبلور مجدد است قابل تشخیص است. مقایسه اندازه دانه‌ها در سه تصویر نشان‌دهنده رشد بیشتر دانه در نمونه جوشکاری شده در هوا به دلیل زمان طولانی‌تر تبلور مجدد و دمای بالاتر ایجاد شده در این شرایط است. دمای پیک کمتر در مدت‌زمان کوتاه‌تر در محل جوش نمونه‌های جوشکاری شده در شرایط زیرآبی بیشتر توسط وحید و همکارانش به اثبات رسیده است [۱۶].

دلیل کمینه بودن استحکام و کشیدگی در نمونه جوش خورده در زیر آب با دمای ۱ درجه سانتی‌گراد را می‌توان وجود عیب کانال در عمق جوش (مطابق شکل (۸)) دانست که منجر به کاهش سطح مقطع مؤثر ماده و همچنین ایجاد تمرکز تنش می‌گردد. چنانچه مشاهده می‌شود این مسئله سبب شده است که نمونه در محدوده الاستیک دچار گسیختگی گردد؛ بنابراین با اینکه انجام جوشکاری در زیر آب می‌تواند نقش مهمی در جلوگیری از افت استحکام در اتصال آلومینیوم با ساختار فوق ریز بازی کند اما استفاده از آب با دمای بسیار پایین نه تنها شرایط را بهبود نداده بلکه می‌تواند سبب افت شدید استحکام کششی گردد.

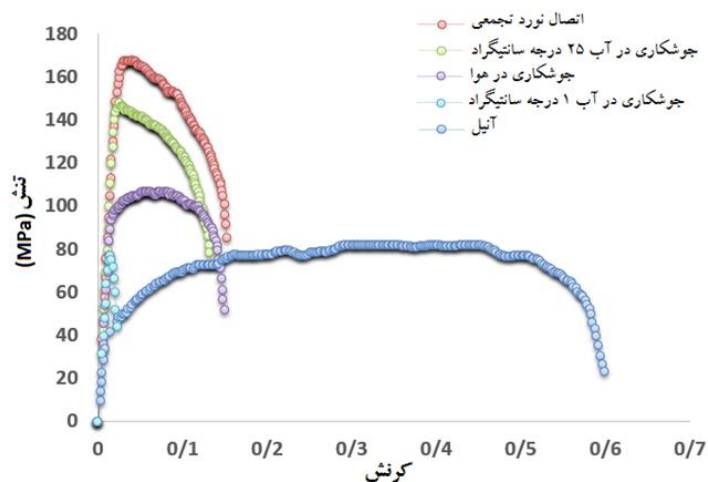
با توجه به بیشترین استحکام کششی در نمونه اتصال نوردی شده توقع می‌رود میزان کشیدگی آن کمترین باشد؛ اما این چنین نیست. پیش از تحلیل چنین رفتاری باید نگاهی به ریز سختی فلز پایه و منطقه جوش در نمونه‌های مورد آزمایش قرار گرفته داشت. متوسط ریز سختی و یکرز منطقه جوش در نمونه‌های جوش خورده در هوا، جوش خورده در آب ۲۵ درجه و فلز پایه (نمونه اتصال نوردی جمعی) به ترتیب ۳۲/۵، ۴۲/۵ و ۴۷ واحد می‌باشد. به نظر می‌رسد دلیل کشیدگی کمتر از حد انتظار در نمونه‌های جوشکاری شده به این علت است که برخلاف نمونه فلز پایه، در این نمونه‌ها

کشیدگی قبل از گلوئی عموماً در گرده جوش (طولی کمتر از ۱۰ میلی‌متر) متمرکز می‌گردد که به دلیل تفاوت ریز سختی منطقه جوش و فلز پایه است؛ اما خواص مکانیکی همگن در کل طول سنج در نمونه اتصال نوردی شده سبب شده تا قبل از وقوع گلوئی، کرنش ایجاد شده در کل طول سنج آن (۲۰ میلی‌متر) اتفاق افتاده و به همین دلیل به صورت نسبی کشیدگی شکست بالاتری را بروز دهد. تنها در نمونه جوشکاری شده در هوا به دلیل ریز سختی کم و در نتیجه انعطاف مناسب در محل جوش، کشیدگی کل به مقدار مربوط به نمونه اتصال نوردی جمعی شده نزدیک است. شایان‌ذکر است که چنین روندی در نمونه‌هایی که طول سنج در امتداد خط جوش بوده، دیده نشده است [۱۱].

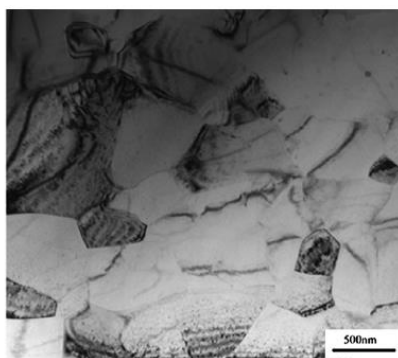
در ادامه برای بررسی بیشتر تصاویر سطح شکست نمونه‌های مختلف، در شکل (۱۱) ارائه شده است. سطح شکست نمونه اتصال نوردی جمعی (شکل (۱۱-الف)) عموماً شامل حفراتی است که نشانه شکست نرم محسوب می‌شوند. با این حال نشان‌هایی از شکست ترد به شکل رخ برگی نیز در تصویر قابل تشخیص است. چنین می‌توان نتیجه گرفت که نمونه به صورت کلی رفتار شکست نرم از خود نشان داده که دلیل آن انعطاف‌پذیری بالای فلز آلومینیوم خالص تجاری می‌باشد. حضور نواحی با ظاهر شکست ترد به دلیل وجود تنش‌های برشی شدید در مناطقی است که با سطح غلطک در تماس بوده و در ادامه فرآیند تولید به عمق ماده منتقل شده‌اند [۴]. شکل (۱۱-ب) سطح شکست نمونه جوش خورده در زیر آب ۲۵ درجه را نشان می‌دهد. در این نمونه کل سطح حاوی حفرات ناشی از شکست نرم می‌باشد. مقایسه این شکل با شکل ارائه شده در نمونه (۱۱-الف) و حضور بیشتر حفرات شکست نرم نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری بالاتر در محل شکست در نمونه جوش خورده می‌باشد و تأییدی است بر اینکه کشیدگی شکست کمتر در این نمونه به دلیل موضعی شدن کرنش در گرده جوش رخ داده است و نه انعطاف‌پذیری ذاتی کمتر آن. شکل (۱۱-پ) سطح شکست نمونه جوشکاری شده در هوا را نشان می‌دهد. در این شکل کل سطح با حفرات شکست نرم پوشیده شده و

نسبت نمونه جوشکاری شده در آب ۲۵ درجه نیز بیشتر باشد.

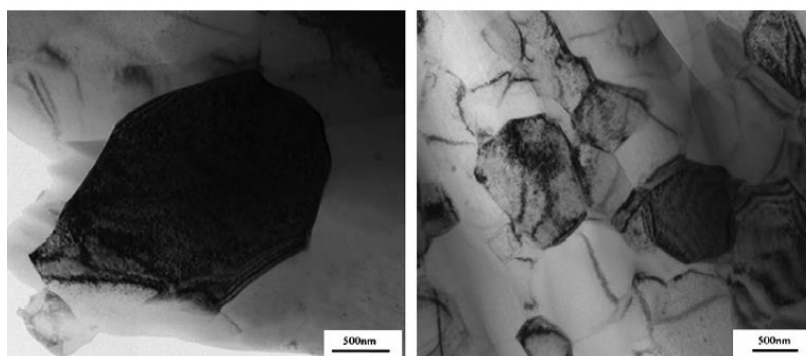
در مقایسه با شکل (۱۱-ب) دارای کشیدگی‌های فیبری شکل بیشتری است. این به دلیل ریز سختی کمتر و انعطاف‌پذیری بیشتر در محل شکست رخ داده است که باعث شده است تا میزان کرنش شکست در این نمونه به



شکل (۹): نمودار تنش-کرنش مهندسی نمونه آئیل، اتصال نوردی شده و جوشکاری شده توسط پین استوانه‌ای در شرایط مختلف دمایی-محیطی تحت سرعت چرخشی ۶۳۰ دور بر دقیقه و سرعت انتقالی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه



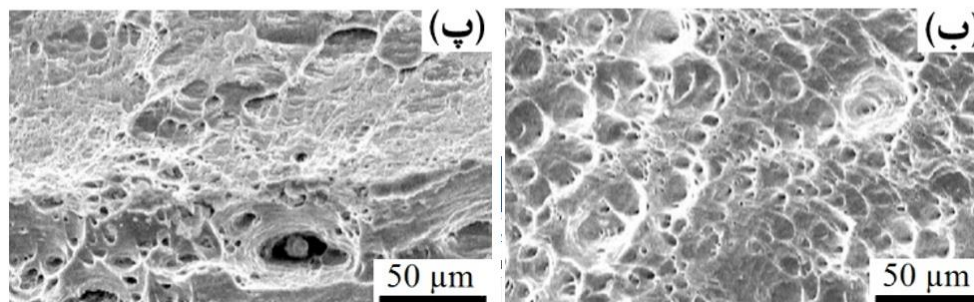
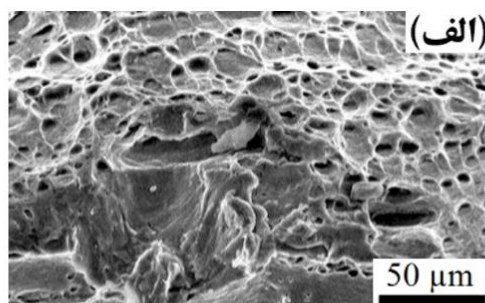
(الف)



(پ)

(ب)

شکل (۱۰): تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از ریزساختار نمونه (الف) اتصال نورد تجمعی شده و منطقه جوش نمونه‌های جوشکاری شده توسط پین استوانه‌ای در سرعت چرخشی ۶۳۰ دور بر دقیقه و سرعت انتقالی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه در (ب) محیط آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد و (پ) و هوا [۱۱]



شکل (۱۱): تصویر شکست نگاری از سطح نمونه‌های (الف) اتصال نورد جمعی و جوشکاری شده توسط پین استوانه‌ای در سرعت چرخشی ۶۳۰ دور بر دقیقه و سرعت انتقالی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه در محیط (ب) آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد و (پ) هوا

۴- نتیجه‌گیری

بررسی تأثیر سرعت‌های جوشکاری بر ریز سختی ناحیه جوش در نمونه‌های اتصال یافته توسط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های با ساختار فوق ریزدانه نشان‌دهنده افزایش ریز سختی با افزایش سرعت انتقالی یا کاهش سرعت چرخشی می‌باشد. با توجه به تحقیقات پیشین که به وضوح تأثیر سرعت‌های انتقالی و چرخشی در دمای منطقه جوش را بیان نموده‌اند می‌توان دلیل این پدیده را ایجاد حرارت کمتر در محل جوش و در نتیجه تبلور مجدد و رشد دانه کمتر دانست. همچنین مشخص شد در گام چرخشی ثابت نیز کمتر کردن سرعت انتقالی یا سرعت چرخشی می‌تواند به دلیل نرخ گرمایش پایین‌تر سبب پیک دمایی کمتر در محل جوش و افزایش ریز سختی شود. در بررسی تأثیر هندسه پین، نتایج حاصله نشان‌دهنده تأثیر ناچیز شکل پین بر خواص کششی اتصال در نمونه‌های آلومینیوم فوق ریزدانه اتصال یافته به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد. تنها در مورد پین رزوه خورده بهبود مختصری در خواص مکانیکی مشاهده گردیده است. تحقیق انجام شده نشان‌دهنده این واقعیت است که هرچند انجام فرآیند جوشکاری در زیر آب می‌تواند سبب افت

کمتر در خواص مکانیکی منطقه جوش به نسبت فلز پایه شود اما استفاده از آب با دمای بسیار پایین سبب تشکیل عیب کانال در عمق جوش و سطح بسیار خشن‌گرده جوش شده و خواص کششی را به شدت دچار تنزل خواهد کرد؛ بنابراین در استفاده از اتمسفر زیرآبی در جوشکاری آلومینیوم فوق ریزدانه باید از استفاده از سیال با دمای نزدیک به دمای انجماد آب اجتناب کرد.

۵- مراجع

[1] Y. Cao, S. Ni, X. Liao, M. Song & Y. Zhu, "Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation", Materials Science and Engineering: R: Reports, vol. 133, pp. 1-59, 2018.

[۲] م. حیدری وینی و س. دانشمند، "بررسی مقاومت به خوردگی کامپوزیت‌های Al-1060/Alumina ساخته‌شده به روش نورد جمعی"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، 10.30495/APME.2021.1929264.2052

[3] I. Topic, H. W. Hoppel & M. Goken, "Friction stir welding of accumulative roll-bonded commercial-purity aluminium AA1050 and aluminium alloy AA6016", Materials Science and Engineering A, vol. 503, no. 1-2, pp. 163-166, 2009.

[12] K. Wang, J. Wu, W. Wang, L. Zhou, Z. Lin, L. Kong, "Underwater friction stir welding of ultrafine grained 2017 aluminum alloy", Journal of Central South University, vol. 19, pp. 2081-2085, 2012.

[13] C. Y. Liu, B. Qu, P. Xue, Z. Y. Ma, K. Luo, M. Z. Ma & R. P. Liu, "Fabrication of large-bulk ultrafine grained 6061 aluminum alloy by rolling and low-heat-input friction stir welding", Journal of Materials Science & Technology, vol. 34, no. 1, pp. 112-118, 2018.

[14] F. Leoni, L. Sandness, Ø. Grong & F. Berto, "Mechanical behavior of gas metal arc AA6082-T6 weldments", Procedia Structural Integrity, vol. 18, pp. 449-456, 2019.

[15] S. Mansourzadeh, M. Hosseini, E. Salahinejad & A. H. Yaghtin, "Cu-(B₄C)_p metal matrix composites processed by accumulative roll-bonding" Progress in Natural Science: Materials International, vol. 26, no. 6, pp. 613-620, 2016.

[16] M. A. Wahid, P. Goel, Z. A. Khan, K. M. Agarwal & E. H. Khan, "Underwater Friction Stir Welding of AA6082-T6: Thermal Analysis", Advances in Engineering Materials, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore, pp 365-375, 2021.

[17] P. Podržaj, B. Jerman & D. Klobčar, "Welding defects at friction stir welding", Metallurgy, vol. 54, no. 2, pp. 387-389, 2015.

۶- پی نوشت

[1] Wang et al
[2] Liu et al

[4] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai & R. G. Hong, "Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process", Scripta Materialia, vol. 39, pp. 1221-1227, 1998.

[5] S. M. Ghalehbandi, M. Malaki & M. Gupta, "Accumulative Roll Bonding—A Review", Applied Science, vol. 9, no. 17, pp. 3627, 2019.

[6] Y. Sun, H. Fujii, Y. Takada, N. Tsuji, K. Nakata & K. Nogi, "Effect of initial grain size on the joint properties of friction stir welded aluminum", Materials Science and Engineering A, vol. 527, no. 1-2, pp. 317-321, 2009.

[7] S. Heidarzadeh, R. Mironov, G. Kaibyshev, A. Çam, A. Simar, F. Gerlich, A. Khodabakhshi, D. P. Mostafaei, J. D. Field, A. Robson, A. Deschamps & P. J. Withers, "Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution", vol. 117, 100752, 2021.

[8] R. S. Mishra & Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering R, vol. 50, pp. 1-78, 2005.

[۹] ا. ربیعی زاده، ا. افسری، ف. ارغوانی و ف. احمدی کیسی، "اتصال همجنس و غیر همجنس آلیاژهای آلومینیوم ۵۷۵۴ و ۶۰۶۳ به روش جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۰، شماره ۲، صفحه ۸۵-۹۵، تابستان ۱۳۹۵،

[10] M. J. Greitmann & P. Deimel, "Friction stir welding – innovative technology for joining aluminium components", Otto-Graf-Journal, vol. 16, pp. 185-192, 2005.

[11] M. Hosseini & H. Danesh Manesh, "Immersed friction stir welding of ultrafine grained accumulative roll-bonded Al alloy" Materials & Design, vol. 31, no. 10, pp. 4786-479, 2010.