

تأثیر سرعت دورانی ابزار جوشکاری اصطکاکی اختلاطی (FSW) قبل و بعد از عملیات حرارتی بر ریزساختار منطقه اتصال آلیاژ آلومینیوم 2024-T8*

سید محمدعلی بوترابی^(۳)

مسعود گودرزی^(۲)

محمدعلی صفرخانیان^(۱)

جوشکاری اصطکاکی اختلاطی به طور وسیعی برای آلیاژهای آلومینیوم به ویژه برای آن گروه از آلیاژهای آلومینیوم که روش‌های جوشکاری ذوبی برای آنها مناسب نمی‌باشد، مانند آلیاژ آلومینیوم 2024، کاربرد دارد. با وجود حذف عیوب محل اتصال در این روش جوشکاری، نرم شدن منطقه تحت تأثیر حرارت، می‌تواند یک مسئله غیرقابل پذیرش باشد. یکی از روش‌های برطرف کردن نرم شدن منطقه تحت تأثیر حرارت، عملیات حرارتی بعد از جوشکاری است؛ اما گزارش شده است که در حین عملیات انحلالی دانه‌های بسیار ریز در منطقه اتصال ناپایدار می‌باشند. در این تحقیق اثر سرعت دورانی ابزار بر ریزساختار منطقه اتصال آلیاژ 2024-T8 به ضخامت 5 mm، قبل و بعد از عملیات حرارتی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که خرد شدن ذرات بین فلزی در منطقه اتصال حین فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی اتفاق افتاده و با افزایش سرعت دورانی ابزار شدت خرد شدن ذرات بین فلزی و اندازه دانه‌های منطقه اتصال افزایش می‌یابد که منجر به پایداری دانه‌های منطقه اتصال حین عملیات حرارتی می‌شود.

آلیاژ آلومینیوم 2024، جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، رشد غیرعادی دانه‌ها

Effect of Rotational Speed of Friction Stir Welding Tool Before and After Post Weld Heat Treatment on Microstructure of Stir Zone of 2024-T8 Aluminum Alloy

M.A. Safarkhanian

M. Goodarzi

S.M.A. Boutorabi

Abstract

Friction stir welding (FSW) can be used to join aluminum alloys such as Al-2024 that are hard to weld by conventional fusion welding. Although this welding process can eliminate defects, the softening problem of heat-affected zone can be a non-acceptable problem. To recover the strength of joint, one option is fully post weld heat treatment of welded components. However, it has been reported that fine grains in the stir zone are not stable during solution treatment. In this study, a 2024-T8 aluminum alloy with 5 mm thickness is selected as the experimental material for FSW to reveal the effect of rotational speed of tool before and after post weld heat treatment on the microstructure of stir zone. It was found that the particles are broken up during friction stir welding, and the severity of the breaking up of particles and grain size in the stir zone increase with increasing rotational speed. Consequently stability of grains increases.

Key Words 2024 Aluminum Alloy, Friction Stir Welding, Abnormal Grain Growth.

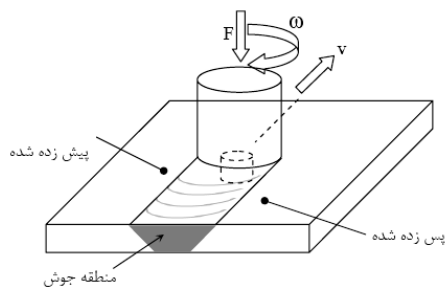
* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۸۸/۳/۵ و نسخه پایانی آن در تاریخ ۸۸/۷/۲۰ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی دکتری مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران

(۲) استادیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

(۳) استاد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

(Zone)، منطقه تحت تأثیر فرآیند ترمومکانیکی یا TMAZ (Thermo Mechanically Affected Zone) و منطقه متأثر از حرارت یا HAZ (Heat Affected Zone). به طور معمول فرآیند FSW بر روی آلیاژ 2024 در شرایط عملیات حرارتی شده T3 یا T6 انجام می‌شود. بنابراین به دلیل حرارت ایجاد شده در حین فرآیند FSW رسوبات استحکام دهنده در مناطق TMAZ و HAZ فرایپر (Overage) شده و در نتیجه، این مناطق پس از جوشکاری ضعیف می‌باشند. یکی از روش‌های بر طرف کردن این افت استحکام، عملیات حرارتی پس از جوشکاری یا (Post Weld Heat Treatment) PWHT است.



شکل ۱ شماتیک فرآیند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی

یکی از مشکلات روش PWHT رشد غیر عادی دانه‌ها یا (Abnormal Grain Growth) AGG در منطقه اتصال در حین عملیات انحلالی است [7,8]. در واقع دانه‌های بسیار ریز به وجود آمده در منطقه اتصال حین فرآیند FSW که ناشی از تبلور مجدد دینامیکی دانه‌ها می‌باشد، ناپایدار بوده و در حین عملیات انحلالی، تعدادی از دانه‌ها به ازای از بین رفتن دانه‌های کوچکتر، به صورت غیر عادی رشد می‌کنند. در اثر این پدیده اندازه دانه‌ها در حد چندین میلیمتر خواهد بود که در این صورت به نام پدیده AGG شناخته می‌شود. نیروی رانش ترمودینامیکی برای پدیده AGG کاهش انرژی مرز دانه می‌باشد [8].

در مرجع [9] نشان داده شده است که پدیده AGG در منطقه اتصال آلیاژ آلومینیم 7475 پس از حرارت دهی در دمای 470°C به مدت ۳۰ دقیقه اتفاق افتاده است. در مرجع [10] پایداری دانه‌های ریز منطقه

روش جوشکاری اصطکاکی اختلاطی یا (Friction Stir Welding) FSW در سال ۱۹۹۱، توسط مؤسسه جوشکاری انگلستان (TWI) به عنوان یک روش نوین جوشکاری در حالت جامد، به ثبت رسیده است [1]. این روش، در مدت زمان بسیار کوتاهی به طور چشمگیری مورد توجه قرار گرفت. جوشکاری FSW به طور وسیعی برای آلیاژهای آلومینیم، به ویژه برای آلیاژهایی که روش‌های جوشکاری ذوبی در مورد آنها مناسب نمی‌باشد، مانند آلیاژهای گروه ۲×××، که آلیاژهای استحکام بالای آلومینیم می‌باشند، کاربرد وسیعی دارد. آلیاژ 2024 که یکی از مهمترین آلیاژهای گروه ۲××× است، به طور وسیعی در سازه‌های هوا - فضا و صنایع دیگر استفاده می‌شود. به دلیل تشکیل مک، تخلخل و ترک گرم و همچنین، افت شدید خواص مکانیکی در منطقه اتصال این آلیاژ حین روش‌های جوشکاری ذوبی، آلیاژ 2024 به عنوان آلیاژی جوش ناپذیر شناخته می‌شود [2,4].

در شکل (۱) شماتیک روش FSW نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ابزار FSW شامل دو قسمت مهم می‌باشد: پین غیر مصرفی (Pin) و شانه ابزار (Shoulder) [4]. تماس شانه ابزار با سطح کار در حین چرخش ابزار، سبب تولید حرارت می‌شود و حرکت دورانی پین سبب تغییر شکل شدید مواد در محل اتصال می‌شود. بدین ترتیب همراه با آمیخته شدن مواد از دو قطعه در حال اتصال و از بین رفتن خط اتصال، تبلور مجدد دینامیکی اتفاق می‌افتد. دانه‌های منطقه اتصال در این روش جوشکاری نسبت به روش‌های ذوبی که ستونی و درشت می‌باشند از ظرافت و یکنواختی مناسبی برخوردارند [5,6]. در این روش از آنجا که جوشکاری در حالت جامد انجام می‌شود، عیوب انجمادی از قبیل مک، تخلخل و ترک گرم به وجود نمی‌آیند.

در قطعات جوشکاری شده با روش FSW می‌توان بر اساس تغییرات ایجاد شده در ریزساختار، سه منطقه مجزا تشخیص داد. منطقه اتصال یا (SZ) Stir

و با سرعت پیشروی 50 mm/min جوشکاری شدند. جنس ابزار جوشکاری از فولاد گرم کار H13 انتخاب شد. قطر شانه ابزار، قطر پین و ارتفاع آن به ترتیب ۱۸، ۶ و $4/7$ میلیمتر در نظر گرفته شدند.

پس از انجام جوشکاری، ابتدا نمونه‌های متالوگرافی عمود بر مقطع اتصال تهیه شد. نمونه‌ها قبل و بعد از عملیات حرارتی PWHT (شامل عملیات انحلالی در دمای 490°C به مدت یک ساعت و سپس کوئنچ در آب با دمای محیط) توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به دستگاه آنالیز طیف سنجی نقطه‌ای (EDS) مورد بررسی قرار گرفتند. جهت بررسی وجود و حذف افت استحکام در منطقه HAZ، با استفاده از دستگاه میکرو سختی، پروفیل سختی عمود بر مقطع اتصال در تمام نمونه‌ها قبل و بعد از عملیات PWHT، تهیه شد.

در شکل (۲) پروفیل سختی منطقه اتصال و اطراف آن قبل و بعد از عملیات حرارتی آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اندازه سختی در مرز TMAZ/HAZ، قبل از عملیات حرارتی کمترین مقدار می‌باشد و نیز، سختی در منطقه اتصال نسبت به فلز پایه پائین‌تر است. عامل اصلی افزایش استحکام و سختی در آلیاژ 2024، تشکیل ذرات بسیار ریز رسوب Al_2CuMg یا همان ذرات رسوب S در زمینه آلیاژ می‌باشد [11]. این رسوب‌ها با اعمال حرارت نسبتاً بالا حین فرایند FSW، درشت می‌شوند. در نتیجه سختی در مناطق حرارت دیده کاهش می‌یابد. با انجام عملیات حرارتی پس از جوشکاری تمام این اثرات حذف می‌شوند، (شکل ۲ ب).

اتصال آلیاژ آلومینیم 1100 حین عملیات حرارتی انحلالی بررسی شده و بیان شده است که AGG تنها زمانی اتفاق می‌افتد که دمای عملیات انحلالی بالاتر از دمای ماکزیمم اعمال شده حین فرایند FSW باشد. افزون بر این، با افزایش سرعت دورانی وسعت منطقه AGG افزایش می‌یابد. اما در مرجع [7] برای آلیاژ آلومینیم 2095 نتایجی خلاف این ارائه شده است! در مرجع [8] بیان شده است که در آلیاژ 2219-O اگر حرارت ورودی در حین جوشکاری پایین باشد، به عبارت دیگر اگر سرعت دورانی ابزار کم و یا سرعت پیشروی ابزار بالا باشد، اندازه دانه در منطقه AGG کمتر خواهد بود.

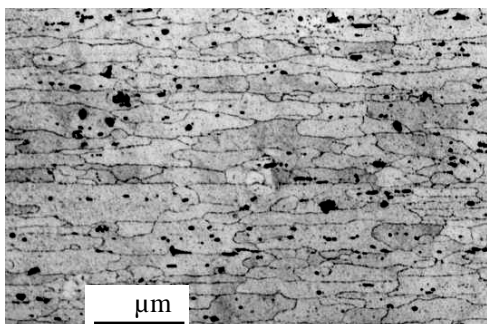
با توجه به نتایج تجربی بیان شده در فوق، می‌توان نتیجه گرفت که پدیده AGG نه تنها به نوع آلیاژ وابسته است بلکه به نوع عملیات حرارتی و پارامترهای جوشکاری، شامل سرعت دورانی و پیشروی ابزار، نیز بستگی دارد. با وجود تحقیقاتی که بر روی پدیده AGG انجام شده هنوز اثر پارامترهای فرایند FSW بر کنترل این پدیده در آلیاژ آلومینیم 2024 بررسی نشده است، بنابراین در این تحقیق سعی شده است شرایط به حداقل رساندن وسعت منطقه AGG در آلیاژ یاد شده بررسی شود.

در آغاز ورق آلومینیم 2024-T8 به ضخامت 5 mm تهیه شد. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلیاژ مورد نظر در جدول (۱) آورده شده است. ابعاد نمونه‌های تهیه شده $15 \times 7 \text{ mm}$ بود که در راستای طولی و عمود بر جهت نورد در حالت لب به لب به روش جوشکاری FSW با تغییر سرعت دورانی ابزار از 450 به 900 rpm

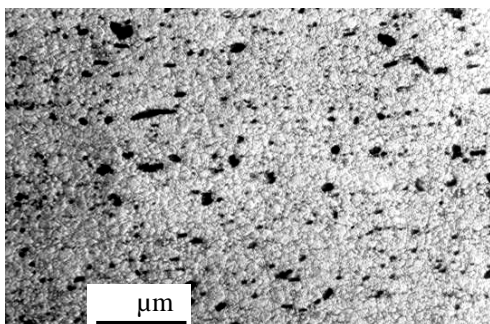
جدول ۱ ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلیاژ 2024-T8 مورد استفاده در این تحقیق

ترکیب شیمیایی							خواص مکانیکی		
Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zr	ازدیاد طول نسبی	استحکام تسلیم	استحکام نهایی
Bal.	۴/۴۳	۱/۴۸	۰/۷۲	۰/۲۶	۰/۱۱	۰/۲	۶ %	۴۶۰ MPa	۴۵۰ MPa

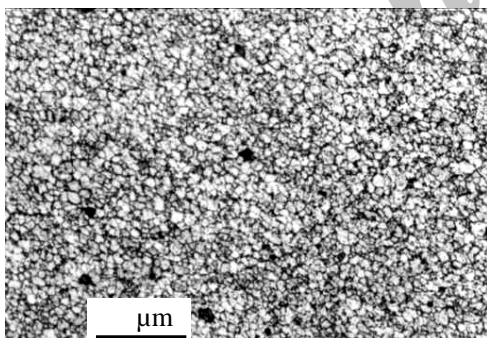
ابزار درحین جوشکاری آن 450 rpm بوده است ولیکن این پدیده در نمونه مربوط به سرعت دورانی 900 rpm کنترل شده است.



(الف)



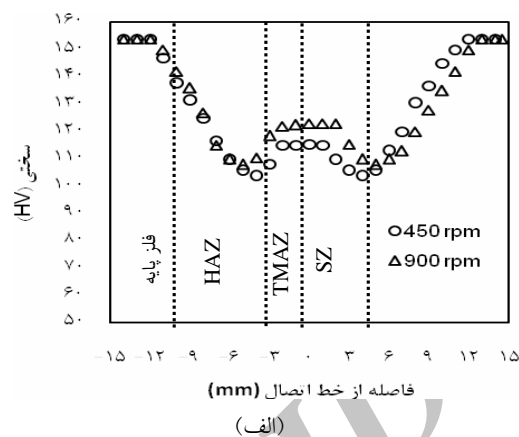
(ب)



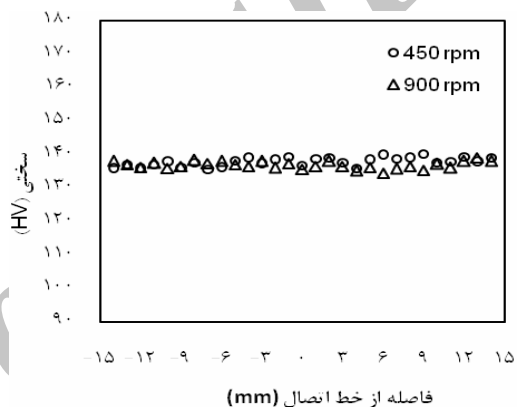
(ج)

شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به الف) فلز پایه
ب) مقطع اتصال $\omega = 450$ rpm و ج) $\omega = 900$ rpm

Charit و همکارانش [12] با انجام تحقیقی بر روی آلیاژ 7010 بیان داشته‌اند که دانه‌ها در سرعت‌های دورانی و



(الف)



(ب)

شکل ۲ پروفیل سختی از مقطع عمود بر منطقه اتصال الف) قبل از عملیات حرارتی و ب) بعد از عملیات حرارتی.

تصاویر متالوگرافی شکل (۳) مربوط به فلز پایه و منطقه اتصال می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود دانه‌ها در منطقه اتصال بسیار ریز و هم‌محور بوده و این در حالی است که دانه‌ها در فلز پایه در راستای نورد کشیده شده می‌باشند. این دانه‌های هم‌محور و بسیار ریز نشان دهنده تبلور مجدد دینامیکی حین فرایند FSW است [2].

در شکل (۴) تصاویر متالوگرافی مربوط به منطقه اتصال بعد از عملیات PWHT آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود رشد غیر عادی دانه‌ها در کل منطقه اتصال مربوط به نمونه‌ای است که سرعت دورانی

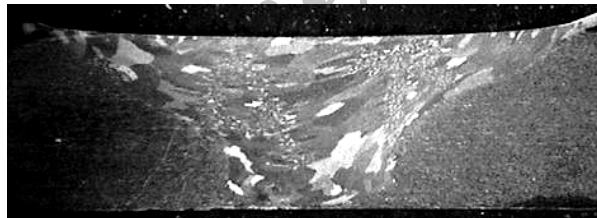
(parameter) که با Z نشان داده شده و مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود، تنها عامل مؤثر در چگونگی رشد دانه‌ها بعد از تبلور مجدد می‌باشد.

$$Z = \frac{3F_v \bar{D}}{2d} \quad (1)$$

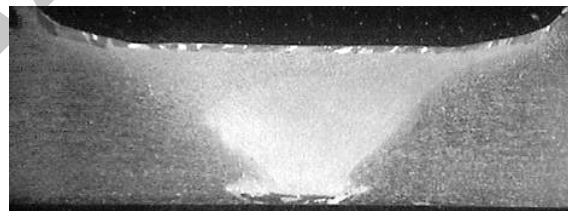
\bar{D} اندازه متوسط دانه‌ها، F_v کسر حجمی و d قطر متوسط ذرات فاز ثانویه می‌باشند. چگونگی رشد دانه‌ها بعد از تبلور مجدد، با توجه به مقدار Z تعیین می‌شود. اگر $0 < Z < 0.1$ باشد احتمال رشد عادی دانه‌ها وجود دارد، اگر $0.1 < Z < 0.25$ باشد رشد غیر عادی در کنار رشد عادی دانه‌ها محتمل است، اگر $0.25 < Z < 1$ تنها پدیده AGG اتفاق می‌افتد و اگر $Z > 1$ باشد دانه‌ها هیچگونه رشدی نخواهند داشت.

پیشروی مشخصی حین فرآیند FSW، پایدار شده و در اثر عملیات PWHT به طور غیر عادی رشد نمی‌کنند. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که اگر اندازه دانه‌های اولیه کوچک باشد (به عنوان مثال زمانی که نسبت سرعت دورانی ابزار کم و سرعت پیشروی در فرآیند FSW بالا است) نیروی رانش جهت رشد دانه‌ها بیشتر از نیروی مقابله کننده در برابر رشد دانه‌ها از طرف ذرات و موانع (pinning) می‌باشد، و بنابراین پدیده AGG اتفاق می‌افتد. اما عوامل دیگری هم در شروع پدیده AGG مهم می‌باشند.

عوامل مهم در پدیده AGG عبارتند از ذرات فاز ثانویه، تکسچر و جهت تنش‌های سطحی در دو سطح بالا و پایین سطح اتصال. Hatherly و Humphreys [13] اثر ذرات فاز ثانویه بر پدیده AGG را مورد بررسی قرار داده و بیان نموده‌اند که مقدار پارامتر مانع (Pinning)



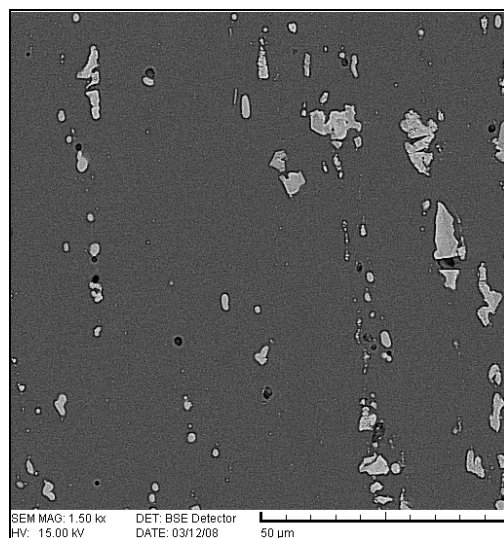
(الف)



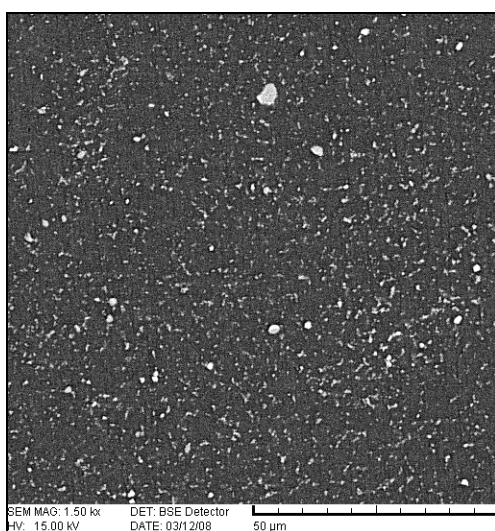
(ب)

شکل ۴ تصویر منطقه اتصال بعد از عملیات PWHT

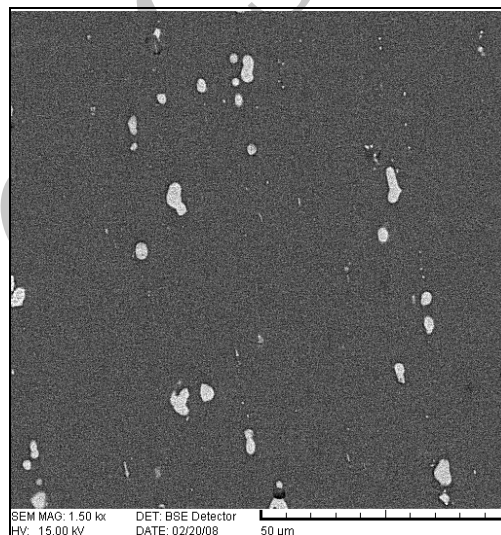
(الف) $\omega = 450$ rpm و (ب) $\omega = 900$ rpm



(الف)



(ج)

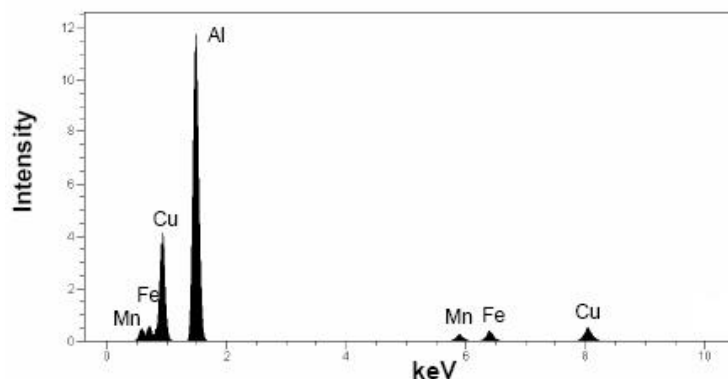


(ب)

شکل ۵ تصویر SEM قبل از عملیات PWHT، (الف) فلز پایه، (ب) $\omega = 450$ rpm و (ج) $\omega = 900$ rpm

در شکل (۶) نتایج آنالیز EDS این ذرات آورده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود این ذرات حاوی عناصر Al، Fe، Mn و Cu می باشند، و با توجه به تحقیقات منتشر شده [14,15] این ذرات در فاز زمینه نامحلول می باشند. این ذرات می توانند مانعی در برابر رشد غیر عادی دانه ها باشند.

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مربوط به ریزساختار فلز پایه و منطقه اختلاط نمونه ها، در شکل (۵) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود این ذرات حین فرایند جوشکاری خرد شده و با افزایش سرعت دورانی ابزار شدت خرد شدن افزایش می یابد.



شکل ۶ آنالیز EDS از ذرات مشاهده شده در شکل ۵

جدول ۲ نتایج مربوط به اندازه گیری قطر متوسط دانه‌ها، کسر حجمی و قطر متوسط ذرات و محاسبه Z

Z	d (μm)	F _v (%)	D (μm)	نام نمونه
۶/۷۸	۲/۳۲	۰/۲۱	۵۰	فلز پایه
۰/۵۹	۱/۷۳	۰/۱۷	۴	ω = 450 rpm
۲/۵۷	۱/۲۶	۰/۱۸	۱۲	ω = 900 rpm

حرارتی بعدی فراهم می‌باشد و از طرف دیگر سرعت دورانی آنقدر بالا نبوده است که سبب خرد شدن شدید ذرات پایدار در آلیاژ شده و قدرت ممانعت ذرات در برابر پدیده AGG را افزایش دهد.

در این تحقیق اثر سرعت دورانی ابزار بر ریزساختار منطقه اتصال آلیاژ 2024-T8 به ضخامت ۵ mm قبل و بعد از عملیات حرارتی بررسی شده است. نتایج به دست آمده به شرح ذیل می‌باشد:

۱- در مناطق حرارت دیده به خاطر فرایند شدن رسوبات استحکام دهنده حین فرایند FSW افت سختی اتفاق می‌افتد که این افت با عملیات PWHT حذف می‌شود.

۲- خرد شدن ذرات بین فلزی حین فرایند FSW اتفاق

با استفاده از نرم افزار Image Analyzer اندازه متوسط و کسر حجمی ذرات مشاهده شده در شکل (۵) و اندازه متوسط دانه‌ها در شکل (۳) اندازه‌گیری شده و مقدار Z برای هر یک از نمونه‌ها محاسبه گردید که نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقدار Z در فلز پایه و منطقه اتصال نمونه‌ای که سرعت دورانی آن ۹۰۰rpm بوده است، بالاتر از ۱ بوده و بنابراین مطابق مدل Humphreys هیچگونه رشدی اتفاق نمی‌افتد ولیکن در منطقه اتصال نمونه‌ای که سرعت دورانی آن ۴۵۰rpm بوده، مقدار Z بین ۰/۲۵ و ۱ می‌باشد. بنابراین، رشد غیر عادی دانه‌ها اتفاق می‌افتد به عبارت دیگر می‌توان گفت در نمونه یاد شده، از آنجاکه گرمای ورودی حین جوشکاری پایین بوده و اندازه دانه‌های منطقه اتصال، کوچک هستند، نیروی رانش برای پدیده AGG حین عملیات

۵- پارامتر زبر عامل اصلی در پدیده AGG است. با افزایش سرعت دورانی ابزار پارامتر زبر به گونه‌ای تغییر می‌کند که رشد غیر عادی دانه‌ها حین عملیات PWHT اتفاق نمی‌افتد. در واقع با افزایش سرعت دورانی ابزار و افزایش اندازه دانه‌های منطقه اتصال، نیروی رانش جهت پدیده AGG حین عملیات PWHT کاهش می‌یابد، از طرف دیگر با افزایش سرعت دورانی و افزایش شدت خرد شدن ذرات بین فلزی قدرت ممانعت این ذرات در برابر پدیده AGG، نیز افزایش می‌یابد.

می‌افتد که با افزایش سرعت دورانی ابزار شدت آن افزایش می‌یابد.

۳- دانه‌های منطقه اتصال بسیار ریز و هم محور می‌باشند و با افزایش سرعت دورانی ابزار اندازه آنها افزایش می‌یابد.

۴- حین عملیات PWHT رشد غیر عادی دانه‌ها در کل منطقه اتصال نمونه‌ای که حین فرایند FSW، سرعت دورانی ابزار ۴۵۰ rpm بوده است، اتفاق می‌افتد. در حالی که دانه‌ها در منطقه اتصال نمونه‌ای که سرعت دورانی ابزار حین فرایند FSW، ۹۰۰ rpm بوده است پایدار شده‌اند.

1. Thomas W. M., "Friction stir butt welding", International Patent Application PCT/GB92, Patent Application GB9125978.8, 6, December (1991).
2. Di S., Yang X., Luan G., and Jian B., "Comparative study on fatigue properties between AA2024-T4 friction stir welds and base materials", *Mat. Sci. Eng.*, Vol. 436A, pp. 389-395, (2006).
3. Fersini D., and Pirondi A., "Fatigue behaviour of Al2024-T3 friction stir welded lap joints", *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 74, pp. 468-480, (2007).
4. Mishra R. S., and Ma, Z.Y., "Friction stir welding and processing", *Mat. Sci. Eng.*, Vol. 50, pp. 1-78, (2005).
5. Su J.Q., Nelson T.W., Mishra R., and Mahoney, M., "Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium", *Acta. Mat.*, Vol. 51, pp.713-729, (2003).
6. Genevois C., Fabrègue D., Deschamps A., and Poole J., "On the coupling between precipitation and plastic deformation in relation with friction stir welding of AA2024 T3 aluminium alloy", *Mat. Sci. Eng.*, Vol. 441A, pp. 39-48, (2006).
7. Attallah M. M., and Salem H.G., "Friction stir welding parameters: a tool for controlling abnormal grain growth during subsequent heat treatment", *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 391A, pp. 51-59, (2005).
8. Chen Y.C., Feng J.C., and Liu H.J., "Stability of the grain structure in 2219-O aluminum alloy friction stir welds during solution treatment", *Mater. Charac.*, Vol. 58, pp. 174-178, (2007).
9. Charit I., Mishra R. S., and Mahoney M. W., "Multi-sheet structures in 7475 aluminum by friction stir welding in concert with post-weld superplastic forming", *Scripta Mater.*, Vol. 47, pp. 631-636, (2002).
10. Sato Y. S., Watanabe H., Park S.H.C., and Kokawa H., *Proc. 5th Int. Symp., Friction Stir Welding*, Metz, France, (2004).
11. Smith W.F., "Structure and Properties of Engineering materials", 2nd ed., McGraw-Hill, (1987).

12. Charit I., Mishra R. S., and Mahoney M. W., "Multi-sheet structures in 7475 aluminum by friction stir welding in concert with post-weld superplastic forming", *Scripta Mater.* Vol. 47, pp. 631-636, (2002).
13. Humphreys F.J., and Hatherly M., "Recrystallization and Related Annealing Phenomena" 2nd ed., Elsevier, (2004).
14. Barcellona A., Buffa G., Fratini L., and Palmeri D., "On microstructural phenomena occurring in friction stir welding of aluminium alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, pp. 340-343, (2006).
15. Charit I., and Mishra R. S., "High strain rate superplasticity in a commercial 2024 Al alloy friction stir processing", *Materials and Engineering A*, Vol. 359, pp. 290-296, (2003).

Archive of SID