

## بررسی ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی اتصال اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم 1111 به

### AZ31

مهدی عزیزیه<sup>۱\*</sup>، علیرضا صادقی<sup>۲</sup> و امیرحسین کوبی<sup>۳</sup>

#### چکیده

در این پژوهش اتصال آلیاژ آلومینیوم 0011 به آلیاژ منیزیم AZ31 با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج، محدوده‌ی سرعت چرخش 011 تا 411 دور در دقیقه و سرعت حرکت 01 تا 01 میلیمتر بر دقیقه، در حالتی که ابزار تنها در قسمت منیزیمی اتصال وارد می‌شود، به عنوان شرایط بهینه‌ی اتصال جهت ایجاد جوش بدون عیب مشخص گردید. تشکیل ترکیبات بین فلزی در منطقه‌ی جوش در نتایج آزمون پراش اشعه‌ی ایکس نمونه‌های جوشکاری شده-ی معیوب مشاهده شد. هم‌چنین، بیش‌ترین استحکام کششی در نمونه‌ی جوش داده شده با سرعت چرخش 131 دور در دقیقه و سرعت حرکت 01 میلیمتر بر دقیقه برابر با 000 مگاپاسکال بدست آمد. نتایج آزمون پراش اشعه‌ی ایکس وجود ترکیبات بین فلزی را در نمونه‌های اتصال کم استحکام نشان داد. در حالی‌که در نمونه‌های جوشکاری شده که استحکام بالایی داشتند، این فازها مشاهده نشد.

**واژه‌های کلیدی:** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلیاژ آلومینیوم، آلیاژ منیزیم، ویژگی‌های مکانیکی، ریزساختار.

1- استادیار گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز.

2- کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف.

3- استاد گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف.

\*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: [azizieh@iauhvaz.ac.ir](mailto:azizieh@iauhvaz.ac.ir)

## 2 بررسی ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی اتصال اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم 1100 به AZ31

### پیشگفتار

کاربرد آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم در صنعت حمل و نقل و هوافضا به دلیل ویژگی‌های خاص این آلیاژها رو به افزایش است. آلیاژهای منیزیم به عنوان یکی از سبک‌ترین آلیاژها، با چگالی حدود دو سوم آلیاژهای آلومینیوم، در حال جایگزینی آلیاژهای آلومینیوم در صنعت حمل و نقل هستند. بمنظور دستیابی به ترکیبی از ویژگی‌های آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم، ایجاد اتصال با ویژگی‌های مطلوب بین این آلیاژها مورد نیاز است. تلاش‌های زیادی برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم به منیزیم از راه جوشکاری ذوبی صورت گرفته است. به دلیل مقادیر بالای ترکیبات بین‌فلزی تشکیل شده در محل جوش که موجب کاهش شدید ویژگی‌های مکانیکی می‌شود، روش‌های ذوبی، اتصال مطلوبی ایجاد نمی‌کنند [0 و 10].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک فرآیند اتصال حالت جامد است که برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم [0-1] و آلیاژهای منیزیم [2-4] بکار می‌رود و اتصالاتی با ویژگی‌های بهتر از اتصالات ایجاد شده به وسیله روش‌های ذوبی ایجاد می‌کند. این ویژگی‌ها مطلوب‌تر در زمان ایجاد اتصالات ناهمجنس بین منیزیم و آلومینیوم نیز قابل انتظار است [00-5]. با قرار دادن ابزار جوشکاری در موقعیت‌های گوناگون نسبت به خط مرکزی جوش، همراه با استفاده از سرعت‌های گوناگون چرخش ابزار، یان و همکاران [5] جوش‌پذیری و ویژگی‌های مکانیکی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی AZ31 و آلیاژ آلومینیوم 0121 را بررسی کردند. آن‌ها امکان ایجاد جوش با کیفیت بالا را مابین این دو آلیاژ گزارش دادند و هم‌چنین، نشان دادند که با رسیدن دمای جوش به دمای یوتکتیک، جوش سالم قابل دستیابی نخواهد بود. نتایج مشابهی به وسیله یان و ناکاتا [01] حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب روی لب AZ31 به AIAC4C در سرعت‌های گوناگون حرکت ابزار بدست آمد. ساتو و همکاران [00] تشکیل فازهای بین‌فلزی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 0111 و آلیاژ AZ31 را بررسی کردند و تشکیل این فازها را ناشی از ذوب موضعی دانستند. ریخت‌شناسی سطحی و ریزساختار جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی بین آلیاژ آلومینیوم 1110 و AZ31

به وسیله ی کاوون و همکاران [00] مطالعه شد. آن‌ها به بررسی توزیع ذرات منیزیم در زمینه‌ی آلومینیوم و ذرات آلومینیوم در زمینه‌ی منیزیم پرداختند. فصل مشترک بین آلیاژ آلومینیوم 2101 و AZ31 جوش داده شده به روش اصطکاکی اغتشاشی به وسیله ی کوسکا و همکاران [00] با استفاده از SEM و TEM بررسی شد. آن‌ها ذرات بسیار ریز  $Al_3Mg_2$  و  $Al_{12}Mg_{17}$  را مشاهده کردند. فیروزدور و همکاران [00] افزون بر تایید وجود فازهای بین‌فلزی در منطقه‌ی اصطکاکی اغتشاشی، افزایش استحکام منطقه جوش با رفتن ابزار به سمت قسمت منیزیمی در اتصال آلیاژ آلومینیوم 2120 به آلیاژ منیزیم AZ31 را گزارش دادند.

اگرچه ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی جوش‌های ناهمجنس ایجاد شده بین آلومینیوم و منیزیم بتازگی بسیار مورد توجه قرار گرفته است، اما تاثیر محل قرارگیری ابزار روی ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی اتصال هنوز مشخص نشده است. هم‌چنین، محدوده‌ی سرعت چرخش و سرعت حرکت ابزار برای جوشکاری این دو فلز به هم مشخص نشده است.

این مقاله به مطالعه‌ی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بین آلیاژ آلومینیوم 0011 و آلیاژ منیزیم AZ31 می‌پردازد. در درجه‌ی نخست هدف رسیدن به اتصال بدون عیب می‌باشد. هم‌چنین، ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی جوشکاری شده در محدوده‌ی سرعت حرکت 01 تا 11 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخش ابزار 0111 تا 011 دور در دقیقه در موقعیت‌های گوناگون قرارگیری ابزار مورد بررسی قرار گرفته است.

### روش پژوهش

ورق‌های بکار رفته به عنوان فلز پایه برای جوشکاری ناهمجنس اصطکاکی اغتشاشی از آلیاژ منیزیم AZ31 و آلیاژ آلومینیوم 0011 با ضخامت 0 میلی‌متر تهیه شده‌اند. ترکیب شیمیایی AZ31 و 0011 به ترتیب در جدول-1 های 0 و 0 نشان داده شده است. پیش از جوشکاری، لایه‌های اکسیدی به وسیله ی برس فلزی از سطوح ورق‌ها حذف شده اند.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با سرعت چرخش 0111 دور در دقیقه و سرعت حرکت 01 میلیمتر در دقیقه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در حالت 0 و 0، یک ترک طولی در جوش درست پس از عبور ابزار ایجاد شد (شکل 0الف). ترک طولی مذکور در هنگام وارد شدن ابزار در حالت 0 و 0، در تمامی سرعت‌های چرخش و حرکت ابزار مشاهده گردید. در حالت 0 نیز، برای سرعت چرخش ابزار بالاتر از 411 دور در دقیقه بدون توجه به سرعت جوشکاری، جوش سالم و فاقد عیب تشکیل نشد و ترک طولی مشاهده گردید (شکل 0ب). در حالت 0 چون درصد فلز آلومینیوم و منیزیم در منطقه جوش تقریباً مساوی است، بر اساس نمودار فازی آلومینیوم-منیزیم (شکل 0)، دمای ذوب منطقه‌ی اتصال بسیار پایین می‌آید و در نتیجه، ترک گرم در خط جوش رخ می‌دهد. دو روش برای جلوگیری از این اتفاق وجود دارد. روش نخست عدم وارد نمودن ابزار در درز جوش و در نتیجه، وارد کردن ابزار در قسمت آلومینیوم و یا منیزیم است. در این صورت به دلیل جزیی بودن درصد منیزیم و یا آلومینیوم در منطقه‌ی جوش، دمای ذوب منطقه بالا می‌رود و از ترک خوردن گرم جلوگیری می‌شود. روش دوم پایین آوردن حرارت ورودی جوش می‌باشد. کاهش سرعت چرخش و یا افزایش سرعت حرکت می‌تواند حرارت ورودی جوش را کاهش دهد. پایین آوردن سرعت چرخش به دلیل کاهش حرارت ورودی و در نتیجه، کاهش دمای منطقه‌ی اصطکاکی اغتشاشی (شکل 0) موجب ایجاد اتصالات بدون عیب در حالت 0 شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در سرعت چرخش 221 دور در دقیقه و کم‌تر از آن ترکی مشاهده نگردید. با این حال، حتی در سرعت چرخش‌های بسیار پایین، ترک‌هایی در حالت 0 و 0 دیده شد (شکل 1).

در حالت 0، همان‌گونه که گفته شد، کم‌ترین دمای ذوب اتفاق می‌افتد. با این‌که بر اساس شکل 0، دمای منطقه‌ی اصطکاکی اغتشاشی شده در سرعت چرخش 131 دور در دقیقه و کم‌تر، پایین‌تر از 011 درجه سانتیگراد می‌باشد. اما باید توجه داشت که نمودار فازی شکل 0، مربوط به آلومینیوم و منیزیم خالص است. در حالی‌که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بین آلیاژ

ابزار بکار رفته جهت جوشکاری از فولاد ابزار H13، به قطر 1 میلیمتر، ارتفاع 0/3 میلیمتر، با شیارهای دایره‌ای با گام 1/4 میلیمتر و شانه به قطر 04 میلیمتر عمود بر محور ابزار بود. نمونه‌ها در سرعت‌های 001، 041، 101، 131، 211، 221، 311، 411 و 0111 دور در دقیقه تهیه شدند. برای هر کدام از سرعت‌های چرخش ذکر شده، سه نمونه تهیه گردید که سرعت حرکت ابزار در آنها به ترتیب 01، 01 و 01 میلیمتر در دقیقه در نظر گرفته شد. افزون بر این، برای هر کدام از نمونه‌های جوشکاری شده، آزمایش‌ها در سه حالت: 0- قرارگیری ابزار در درز اتصال، 0- قرارگیری ابزار 0/1 میلیمتر به سمت آلیاژ منیزیم و 0- قرارگیری ابزار 0/1 میلیمتر به سمت آلیاژ آلومینیوم انجام شد. در نتیجه، پارامترهای سرعت چرخش، سرعت حرکت و محل قرارگیری ابزار مورد بررسی قرار گرفت. پس از جوشکاری، مقاطع عرضی از سطح جوش برای بررسی میکروسکوپی با میکروسکوپ نوری و الکترونی تهیه شد. پس از سمباده‌زنی و پرداخت نهایی، نمونه‌ها در محلول محتوی 1 میلی لیتر اسید استیک، 1 گرم اسید پیکریک، 01 میلی لیتر آب و 011 میلی لیتر اتانول برای بررسی ریزساختار AZ31 و در محلول 01 میلی لیتر اسید کلریدریک، 01 میلی لیتر اسید نیتریک، 01 میلی لیتر اسید فلوئوریک و 11 میلی لیتر آب برای بررسی ریزساختار آلیاژ آلومینیوم 0011 اچ شدند. ترکیبات ایجاد شده در منطقه‌ی جوش به روش پراش اشعه‌ی ایکس تعیین شد. برای این آزمون نمونه‌ها با دقت خاصی از مناطق کاملاً نزدیک به درز جوش که احتمال حضور فازهای بین فلزی وجود داشت انتخاب شدند. تغییرات سختی جوش‌ها بر روی مقطع عرضی عمود بر جهت جوشکاری در مقیاس ویکرز اندازه‌گیری شد. نمونه‌های آزمون کشش عمود بر جهت جوشکاری تهیه شد. این نمونه‌ها با استفاده از دستگاه Instron 1115 در دمای اتاق در سرعت 0 میلیمتر بر دقیقه آزمایش شدند.

### نتایج و بحث

#### ظاهر جوش

شکل 0 سطح جوش‌های ایجاد شده در سه حالت

آلومینیوم 0011 و منیزیم AZ31 می‌باشد. در نتیجه، وجود عناصر اضافی می‌تواند افزون بر کاهش بیش‌تر دمای ذوب، به دلیل وجود پراش‌های انجمادی، ذوب موضعی را ایجاد نماید و در نتیجه، موجب ترک گرم می‌شود (شکل 1 الف).

در حالت 0 نیز همان‌گونه که در شکل 1 ب مشاهده می‌شود، ترک طولی به صورت جزئی در اتصال بوجود آمد. در این حالت ابزار جوشکاری در قسمت آلومینیوم وارد شده است و در نتیجه، بیش‌تر حرارت ورودی به این بخش وارد شده است. فلز منیزیم به دلیل ساختار شش گوشه‌ی فشرده‌ی خود، دارای سیستم‌های لغزش محدودی می‌باشد. در نتیجه، شکل‌پذیری این فلز پایین است. با افزایش دما، چون سامانه‌های لغزش بیش‌تری فعال می‌شوند، شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. در حالتی که ابزار در قسمت منیزیم وارد شد (حالت 0)، چون بیش‌تر حرارت ورودی به این قسمت وارد شده است، شکل‌پذیری و سیلان مواد مناسب است. در نتیجه، اتصال اصطکاکی اغتشاشی بدون عیب ایجاد می‌شود، اما در حالت 0 که حرارت ورودی کم‌تری به قسمت منیزیم وارد می‌شود، به دلیل پایین بودن دما در این بخش، سامانه‌های لغزش کم‌تری فعال شده و در نتیجه، به دلیل کاهش سیلان، اتصال مطلوبی بدست نمی‌آید. این در حالی است که یان و همکاران [5] ایجاد اتصال بین آلیاژ آلومینیوم و منیزیم در هر حالتی که ابزار در مرکز اتصال قرار نگرفته باشد را گزارش نموده‌اند. البته، در گزارش ایشان پایین بودن استحکام اتصال در حالت 0 گزارش شده است. اتصال بدون عیب ایجاد شده در حالت 0 در شکل 2 دیده می‌شود.

با این‌که حرارت ورودی پایین، برای جلوگیری از ایجاد ترک موثر است، اما در شرایطی که حرارت ورودی بسیار پایین باشد، به دلیل سیلان پایین مواد، سطح جوش بسیار ناصاف می‌شود. در این حالت با وجود عدم مشاهده عیب، به دلیل عدم اختلاط مناسب دو قطعه، اتصال مطلوبی بدست نمی‌آید. این حالت برای سرعت چرخش 001 دور در دقیقه در شکل 3 دیده می‌شود.

#### ریزساختار و پراش اشعه ایکس

ریزساختار نمونه جوش داده شده با سرعت چرخش 131 دور در دقیقه و سرعت حرکت 01 میلی‌متر در دقیقه در حالت 0 در دو قسمت آلیاژ آلومینیوم و منیزیم، در شکل 4 نشان داده شده است. دانه‌های ریز ایجاد شده به وسیله‌ی تبلور دوباره‌ی دینامیکی حین جوشکاری از جمله ویژگی‌های این فرآیند می‌باشند. شکل 5 منطقه‌ی اغتشاشی نمونه جوشکاری شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است، منطقه‌ی اغتشاشی شامل لایه‌های متناوب آلومینیوم و منیزیم می‌باشد. این لایه‌ها، به لایه‌های پیازی معروفند [10]. سیلان ایجاد شده در منطقه‌ی اغتشاشی در اثر چرخش ابزار موجب ایجاد این لایه‌ها می‌شود. هم‌چنین، در این شکل، تصویر گرفته شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مشاهده می‌شود. آنالیز عنصری گرفته شده با این میکروسکوپ نیز نمایانگر وجود لایه‌های آلومینیوم در زمینه منیزیم می‌باشد.

همان‌گونه که گفته شد، حرارت ناشی از چرخش ابزار و تغییر شکل پلاستیک شدید سبب افزایش دما به بالاتر از دمای یوتکتیک شده که به تشکیل فازهای ترد می‌انجامد. بمنظور بررسی دقیق‌تر این فازها، پراش اشعه ایکس دو نمونه در شکل 01 با هم مقایسه شده‌اند. در نمونه جوش بدون عیب (شکل 01 الف)، که در حرارت ورودی کم‌تری قرار داشته است، نتایج، نشان دهنده‌ی عدم وجود فازهای بین فلزی است. در مقابل، در نمونه دارای عیب (شکل 01 ب) که در حرارت ورودی بالاتر جوش داده شده است، نتایج پراش مقادیر بیش‌تری از  $Al_{12}Mg_{17}$  و  $Al_3Mg_2$  را در نزدیکی فصل مشترک جوش نشان می‌دهد.

وجود این فازها در اتصال آلومینیوم به منیزیم به وسیله‌ی کوستکا و همکاران [00] و کاوون و همکاران [00] نیز دیده شد. این فازهای بین فلزی همگی فازهای تردی بوده که ترکیب یوتکتیک دارند و مهم‌ترین عامل ایجاد ترک در جوش هستند. نبود مقادیر ترکیبات بین فلزی در نمونه‌ی شکل 01 الف نشان می‌دهد که دمای جوش نزدیک و یا پایین‌تر از دمای یوتکتیک بوده و از تشکیل فازهای بین فلزی جلوگیری شده است. عدم ایجاد این فازهای بین فلزی در نمونه‌های جوش بدون عیب به وسیله‌ی یان و همکاران [5] نیز گزارش شده است.

ترک خوردن فازهای ترد ایجاد شده در حین فرآیند

به استحکام 001 مگاپاسکال را در اتصال آلیاژ آلومینیوم 1110 (که دارای استحکامی بسیار بیش‌تر از آلیاژ 0011 است) به آلیاژ AZ31 گزارش نموده‌اند.

تشکیل ساختار لایه‌ای در جوش به سختی بالاتر جوش منجر می‌شود. این لایه‌بندی مشابه یک کامپوزیت عمل کرده و به دلیل وجود مقادیر بالای فصل مشترک بین لایه‌ها سختی منطقه‌ی اصطکاکی اغتشاشی شده افزایش می‌یابد. افزون بر این، افزایش سختی در این منطقه، به دلیل تبلور دوباره‌ی دینامیک و ریزش‌دانه نیز می‌باشد. پروفیل سختی در طول فصل مشترک در شکل 00 نشان داده شده است. فلز پایه‌ی آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم به ترتیب دارای مقادیر سختی متوسط 10 و 11 ویکرز هستند درحالی‌که منطقه جوش دارای مقادیر سختی از 30 تا 013 ویکرز است.

#### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بین ورق‌های AZ31 و 0011 مورد بررسی قرار گرفت. در سرعت چرخش ابزار بین 011 تا 411 دور در دقیقه، درحالی‌که ابزار 0/1 میلیمتر از درز جوش به سمت ورق منیزیمی جابه‌جا شد، جوش‌های فاقد عیب بدست آمد. در حالی‌که در حالت قرارگیری ابزار روی درز جوش و یا در منطقه‌ی آلومینیومی جوش، اتصال بدون عیب بدست نیامد. نتایج پراش اشعه‌ی ایکس، وجود فازهای ترد  $Al_3Mg_2$  و  $Al_{12}Mg_{17}$  در نمونه با جوش معیوب را نشان داد. همچنین، بالاترین استحکام جوش مربوط به نمونه‌ی جوشکاری شده با سرعت 131 دور در دقیقه و سرعت حرکت 01 میلیمتر در دقیقه و به مقدار 000 مگاپاسکال می‌باشد.

#### منابع

- 1- B. Cantor, P. Grant, and C. Johnston, "Automotive Engineering, Lightweight, Functional and Novel Materials", Taylor and Francis, England, 2008.
- 2- L. Liu, X. Liu, and S. Liu, "Microstructure of Laser-TIG Hybrid Welds of Dissimilar Mg Alloy and Al Alloy with Ce as Interlayer", Scripta Materialia, Vol. 55, pp. 383-386, 2006.

اصطکاکی اغتشاشی، پس از پایان فرآیند، در تنش‌های پسماند و انقباضی جوش، موجب ایجاد ترک‌های طولی در جوش می‌شود.

#### ویژگی‌های مکانیکی

نتایج آزمون کشش در جدول 0 ارائه شده است. نتایج شامل استحکام کششی، استحکام تسلیم و قابلیت تغییر شکل نسبی در شرایط گوناگون جوشکاری می‌باشد. این مقادیر تنها از نمونه‌هایی که در حالت 0 جوشکاری جوش داده شده و به جوش سالم منجر شده‌اند، تهیه شده است. بر اساس جدول 0، بالاترین استحکام کششی در نمونه‌ی جوش داده شده با نسبت سرعت چرخش 131 به سرعت جوشکاری 01 با استحکام کششی 000 مگاپاسکال بوده است. با افزایش نسبت سرعت چرخش به سرعت جوشکاری، استحکام کششی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد که در شکل 00 نشان داده شده است. در توضیح این شکل می‌توان گفت که در مقادیر کم نسبت سرعت چرخش به سرعت جوشکاری، اغتشاش به حدی نبوده تا به ایجاد اتصال بیانجامد و استحکام جوش‌ها بسیار پایین است. از سوی دیگر، در مقادیر بالای نسبت سرعت چرخش به سرعت جوشکاری، حرارت ورودی اضافی به بالا رفتن دمای جوش می‌انجامد که در منطقه‌ی جوش ذوب موضعی و تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد را موجب می‌شود. بر اساس شکل 00 مقدار بهینه نسبت سرعت چرخش به سرعت جوشکاری در محدوده‌ی 00 تا 000 می‌باشد. تاکنون گزارشی در مورد دستیابی به چنین استحکامی برای اتصال آلومینیوم تقریباً خالص به آلیاژ AZ31 منتشر نشده است. برای مثال یان و همکارانش [5] در بهترین حالت به استحکام 41 مگاپاسکال برای اتصال آلیاژ آلومینیوم 0121 به AZ31 دست یافتند. همچنین، ساتو و همکارانش [00] دستیابی 3- M. Cabibbo, H.J. McQueen, E. Evangelista,

S. Spigarelli, M. Di Paola, and A. Falchero, "Microstructure and Mechanical Property Studies of AA6056 Friction Stir Welded Plate", Materials Science and Engineering A, Vol. 460-461, pp. 86-94, 2007.

4- Z.W. Chen, T. Pasang, and Y. Qi, "Shear Flow and Formation of Nugget Zone during

Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 5083-O”, Materials Science and Engineering A, Vol. 474, pp. 312-316, 2008.

5- T. Hirata, T. Oguri, H. Hagino, T. Tanaka, S.W. Chung, Y. Takigawa, and K. Higashi, “Influence of Friction Stir Welding Parameters on Grain Size and Formability in 5083 Aluminum Alloy”, Materials Science and Engineering A, Vol. 456, pp. 344-349, 2007.

6- Z. Hua, W. Huiqiang, H. Jihua, L. Sanbao, and W. Lin, “Effect of Welding Speed on the Material Flow Patterns in Friction Stir Welding of AZ31 Magnesium Alloy”, Rare Metals, Vol. 26, pp. 158-162, 2007.

7- N. Afrin, D.L. Chen, X. Cao, and M. Jahazi, “Microstructure and Tensile Properties of Friction Stir Welded AZ31B Magnesium Alloy”, Materials Science and Engineering A, Vol. 472, pp. 179-186, 2008.

8- W. Xunhong and W. Kuishe, “Microstructure and Properties of Friction Stir Butt-Welded AZ31 Magnesium Alloy”, Materials Science and Engineering A, Vol. 431, pp. 114-117, 2006.

9- J. Yan, Z. Xu, Z. Li, L. Li, and S. Yang, “Microstructure Characteristics and

Performance of Dissimilar Welds between Magnesium Alloy and Aluminum Formed by Friction Stirring”, Scripta Materialia, Vol. 53, pp. 585-589, 2005.

10- Y.C. Chen and K. Nakata, “Friction Stir Lap Joining Aluminum and Magnesium Alloys”, Scripta Materialia, Vol. 58, 433-436, 2008.

11- Y.S. Sato, S.H.C. Park, M. Michiuchi, and H. Kokawa, “Constitutional Liquation during Dissimilar Friction Stir Welding of Al and Mg Alloys”, Scripta Materialia, Vol. 50, pp. 1233-1236, 2004.

12- Y.J. Kwon, I. Shigematsu, and N. Saito, “Dissimilar Friction Stir Welding between Magnesium and Aluminum Alloys”, Materials Letters, Vol. 62, pp. 3827-3829, 2008.

13- A. Kostka, R.S. Coelho, J. dos Santos, and A.R. Pyzalla, “Microstructure of Friction Stir Welding of Aluminum Alloy to Magnesium Alloy”, Scripta Materialia, Vol. 60, pp. 953-956, 2009.

14-V. Firouzdor and S. Kou, “Al-to-Mg Friction Stir Welding: Effect of Positions of Al and Mg with Respect to the Welding Tool”, Welding Journal, Vol. 88, pp. 213-223, 2009.

پیوست‌ها

جدول 1- ترکیب شیمیایی AZ31 (درصد وزنی).

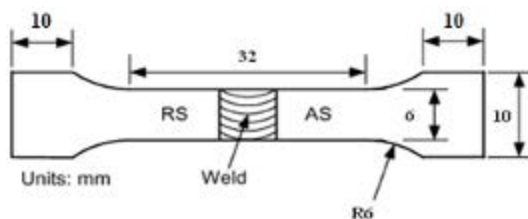
Mg	Fe	Si	Ni	Cu	Mn	Zn	Al
bal.	1/111	1/01	1/111	1/11	1/01	1/11	0/1

جدول 2- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 1111 (درصد وزنی).

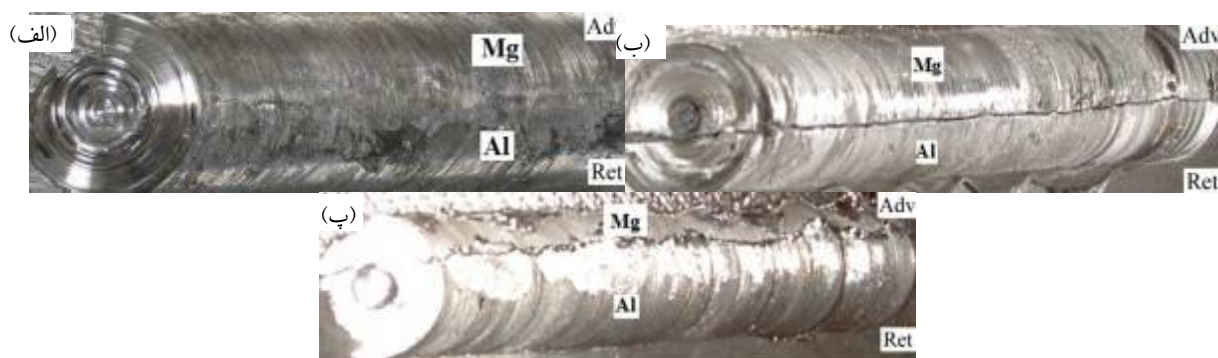
Al	V	Zn	Mn	Fe	Si	Cu
bal.	1/10	1/11	1/11	1/00	1/01	1/14

جدول 3- ویژگی‌های کششی فلزات زمینه و ورق‌های جوش داده شده با استفاده از متغیرهای فرآیند گوناگون.

درصد تغییر طول نسبی (%)	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	نسبت چرخش به حرکت (دور بر میلی‌متر)
0	002	30	001/01
0	41	25	001/01
5	005	41	041/01
3	000	22	041/01
0	50	10	041/01
0	000	33	131/01
5	000	011	131/01
0	30	20	131/01
0	013	44	221/01
0	001	50	221/01
0	51	11	221/01
0	32	13	311/01
0	14	11	311/01

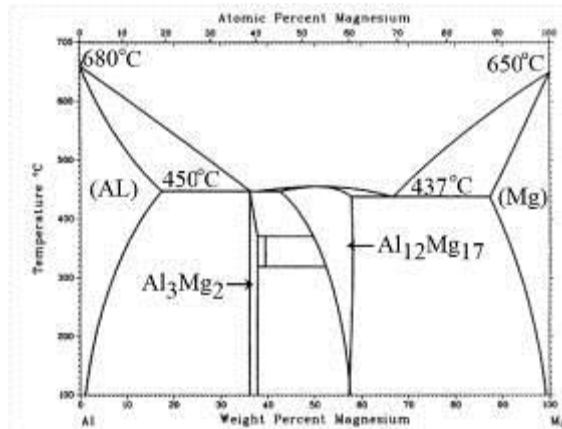


شکل 1- شکل و ابعاد نمونه‌های تست کشش.

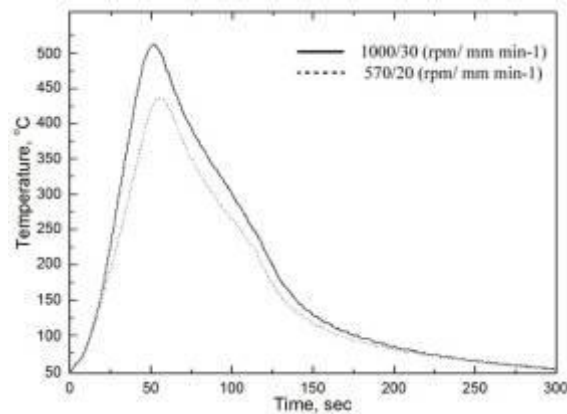


شکل 2- ترک طولی در اتصالات بدست آمده در سرعت چرخش 1111 دور در دقیقه و سرعت حرکت ابزار 31 میلی‌متر در دقیقه در حالات (الف) 1، (ب) 2 و (پ) 3.

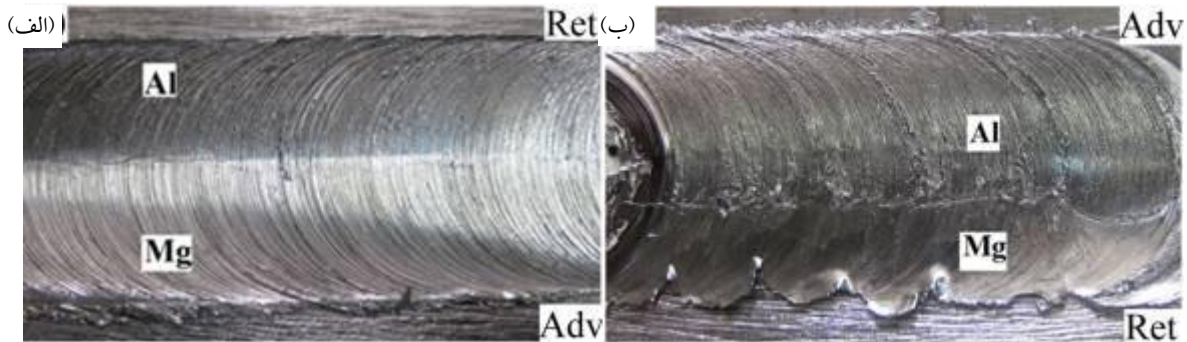




شکل 3- نمودار فازی آلومینیوم- منیزیم.



شکل 4- تغییرات دمایی برای دو نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخش 1111 و 571 دور در دقیقه.



شکل 5- ترک طولی اتصالات بدست آمده در سرعت چرخش 571 دور در دقیقه و سرعت حرکت ابزار 21 میلیمتر در دقیقه

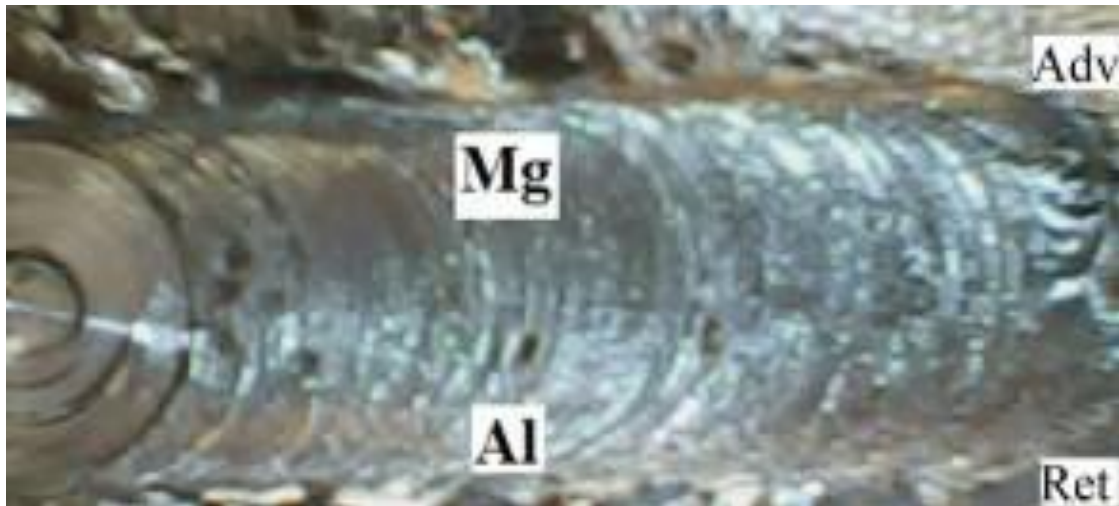
در حالات (الف) 1 و (ب) 3.



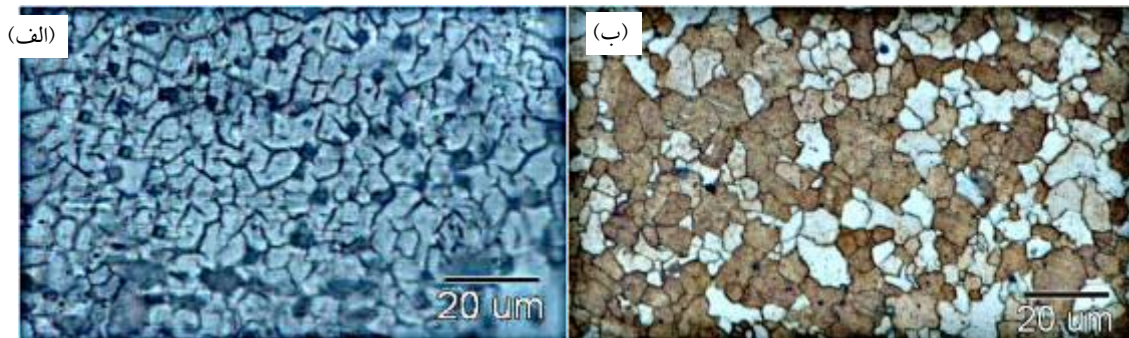
شکل 6- اتصالات بدست آمده در سرعت چرخش 571 دور در دقیقه و سرعت حرکت ابزار 21 میلیمتر در دقیقه در حالت 2

(الف) قسمت آلومینیوم در طرف پیشین ابزار بوده است و (ب) قسمت منیزیم در طرف پیشین ابزار بوده است.

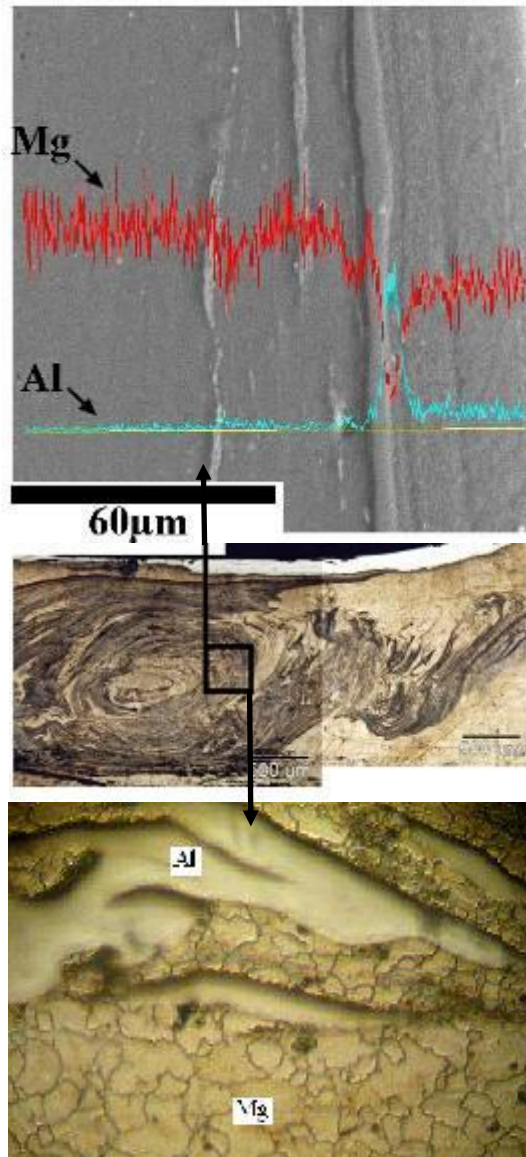




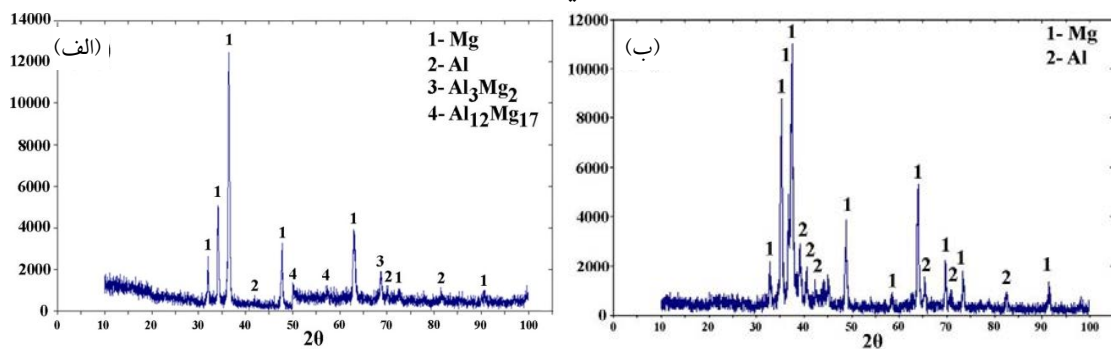
شکل 7- سطح بسیار ناصاف نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخش 421 دور در دقیقه و سرعت حرکت 21 میلی‌متر در دقیقه.



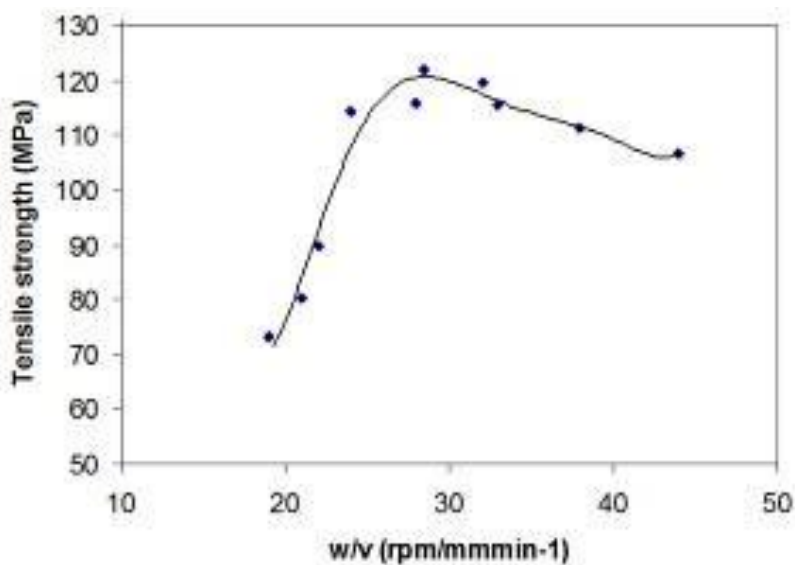
شکل 8- ریزساختار نمونه‌ی جوشکاری شده با سرعت چرخش 571 دور در دقیقه و سرعت حرکت 21 دور در دقیقه (الف) AZ31 و (ب) آلیاژ 1111.



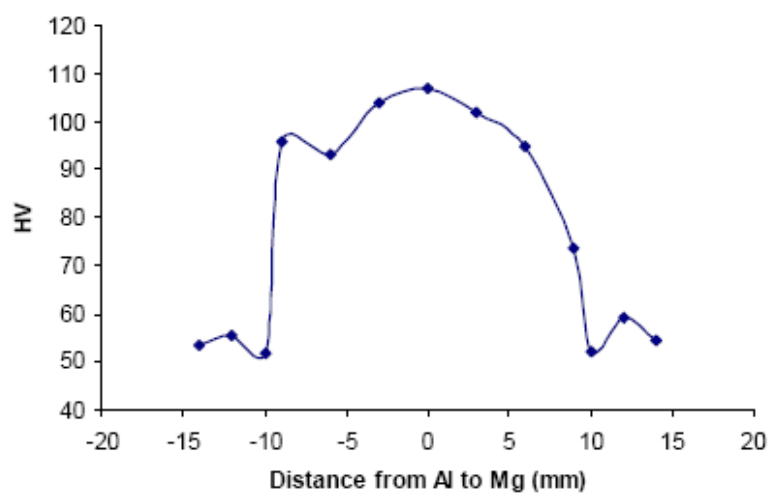
شکل 9- ریزساختار نمونه جوشکاری شده در سرعت چرخش 661 دور در دقیقه و سرعت حرکت ابزار 21 میلیمتر در دقیقه.



شکل 11- پراش اشعه‌ی X از نمونه‌های جوش داده شده در مد 2 با (الف) حرارت ورودی کم (جوش بدون عیب) و (ب) حرارت ورودی بالا (جوش معیوب).



شکل 11- تغییرات استحکام کششی نسبت سرعت چرخش به حرکت  $(\omega/v)$ .



شکل 12- سختی ویکرز اندازه‌گیری شده در طول منطقه جوش.