علوم و فناوری جوشکاری ایران

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال هفتم، شماره1، بهار و تابستان 1400، صفحه 27-19

تاثیر پارامترهای جوشکاری بر تشکیل عیب هلالی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیم 1085

نسرین ابراهیمی، فراز امیدبخش*

دانشکده فنی- مهندسی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

(دریافت مقاله: 1399/06/31؛ پذیرش مقاله: 1400/03/22)

چکیده

در این مقاله سعی شده است تا تاثیر پارامترهای جوشکاری شامل شکل ابزار، زاویه ابزار، سرعت چرخشی و پیشروی ابزار بر روی تشکیل عیب هلالی مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی آلیاژ آلومینیم 1085 توسط ابزارهای استوانه‌ای، مثلثی و مربعی تحت شرایط مختلف صورت گرفت. مقاطع جوش حاصل توسط روش‌های رادیوگرافی، متالوگرافی و میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تحت شرایط جوشکاری سرعت چرخشی 1120 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 160 میلی‌متر بر دقیقه و با زاویه 1 درجه عیب هلالی تشکیل شده واضح‌تر بوده و به نظر می‌رسد عامل اصلی تشکیل عیب هلالی مقدار بالای گرمای ورودی به ناحیه جوش در این نمونه باشد که باعث شدید اکسیداسیون آلومینیم شده و تشکیل ذرات اکسیدی را ترغیب نموده است. ذرات اکسیدی حاصل در حین انتقال مواد مابین قسمت پیشرو و پسرو به شکل S توزیع شده و منجر به تشکیل عیب هلالی شده اند.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، عیب هلالی، سرعت چرخشی، سرعت پیشروی، زاویه ابزار.

The effect of welding parameters on the formation of S-shape defects in friction stir welding of aluminum 1085

N.Ebrahimi, F.Omidbakhsh*

Department of Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University,Tabriz, Iran.

(Received 21 September 2020 ; Accepted 12 June 2021)

Abstract

In this paper, the effects of welding parameters involving tool shape, title angle, rotational speed and welding speed on the S-shape defect formation have been investigated. For this purpose friction stir welding process were done on the Al-1085 plates by cylindrical, Triangle and square pins. The welded sections were studied by metallographic, radiography and SEM methods. The results showed that the S-shape defect was formed in the 1120 rpm, 1º title angle, 160mm/min welding condition. It is believed that the higher heat input in this welding condition with low welding speed would lead

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: FarazOmidbakhsh@iaut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-11-19]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.2.3]

to more oxidation of Aluminum and so oxide particles formation. These oxide particles precipitate in a S shape pattern during the materials transfer between Advancing Side and Retreating Side sites which leads to S-shape defect formation.

Keywords: Friction Stir Welding, S-shape Defect, Rotational Speed, Welding Speed, Title Angle.

1- مقدمه

فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، در سال 1991 توسط موسسه TWI، برای جوشکاری و اتصال آلیاژهای آلومینیم ابداع و معرفی گردید. [1]. این روش یک فرایند اتصال حالت جامد بوده بر پایه اختلاط مواد ناشی از تغییر فرم پلاستیک در محل اتصال ایجاد می‌شود. این اختلاط حاصل دوران یک ابزار به صورت پین فرورونده در درز اتصال است که در نتیجه دوران این پین و اصطکاک حاصل، دمای مواد در این محل تا دمای تغییر فرم داغ افزایش می‌یابد[2-4]. از مزایای این روش عدم نیاز به فیلر، گاز محافظ و فلاکس است که این روش را به عنوان یک روش با راندمان انرژی بالا و دوستدار محیط زیست معرفی می‌کند[5].

با توجه به اینکه این فرایند در حالت جامد رخ می‌دهد، عیوب حاصل از جوشکاری معمول که ناشی از فرایند ذوب و انجماد هستند، در اتصالات حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مطرح نیست[6]. با این وجود عیوب ویژه‌ای مانند عیب تونل، حفره و عیب هلالی در این اتصالات مطرح است[7, 8].

تحقیقات وسیعی در این زمینه صورت گرفته است[9-14] که نشان می‌دهد عوامل اصلی در تشکیل این عیوب به صورت کلی عبارتند از: حرارت ورودی نامناسب (حرارت کم یا بیش از اندازه)؛ عدم وجود نیروی فشاری کافی برای فورج مواد در ناحیه زیر ابزار و عدم اختلاط مناسب مواد مابین قسمت‌های پیشرونده و پسرونده است [15].

عواملی دیگری نیز علاوه بر موارد فوق در ایجاد یک سری از عیوب موثر هستند که فرایند اکسیداسیون یکی از این عوامل است [5]، که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فلزاتی که اکسیداسیون حرارتی در آن‌ها از شدت بالایی برخوردار است مانند آلومینیم، تیتانیم و فولادهای زنگ‌نزن مطرح می‌باشد [16-18]. در این آلیاژها در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اگر شرایط جوشکاری در حالت بهینه نباشد، با توجه به دمای بالای منطقه در حال جوش احتمال تشکیل ذرات پراکنده اکسید و لایه‌های پیوسته اکسید وجود دارد.

اگر این لایه پیوسته باشد، مانع ایجاد اتصال موثر بین دو قطعه می‌شود که این موضوع بیشتر در جوشکاری آلیاژهای تیتانیم مطرح می‌شود. ولی اگر این اکسیدها به صورت ذرات پراکنده باشند منجر به ایجاد عیب هلالی می‌شوند که در جوشکاری آلیاژهای آلومینیم مطرح است [19-21].

برای شناخت عیب هلالی و تعیین مکانیزم تشکیل آن تحقیقات زیادی صورت گرفته است [16،22-25] که نشان می‌دهد مکانیزم تشکیل عیب هلالی [26] در اثر انتقال ذرات یا لایه‌های اکسیدی در حین تغییرشکل پلاستیک در طول فرایند FSW به صورت خطوط یا منحنی‌های هایپربولیک می‌باشد که به دلیل اختلاط پروانه‌ای یا مدل پروانه‌ای لایه اکسیدی در منطقه پسرو یا پیشرو شکل می‌گیرد [27،28]. عیب هلالی به‌صورت اختلاط پروانه‌ای لایه‌های اکسیدی در جوش FSW آلیاژ آلومینیم ایجاد می‌شود[26].

با توجه به تاثیر مستقیم عیب هلالی در کیفیت اتصال‌های حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و تاثیر این نوع عیب بر رفتارهای خستگی و خوردگی اتصالات حاصل واز سوی دیگر اهمیت شناخت ماهیت آن در تشخیص علت بروز این عیب و در نهایت ارایه راهکار مناسب برای ممانعت از ایجاد آن، در این مقاله سعی شده است تا تاثیر پارامترهای جوشکاری شامل شکل ابزار، زاویه ابزار و سرعت دوران ابزار بر احتمال تشکیل عیب هلالی در جوشکاری آلیاژ آلومینیم خالص تجاری 1085 مورد بررسی قرار بگیرد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-11-19]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.2.3]

2- مواد و روش کار

در این تحقیق، از آلیاژ آلومینیم 1085 با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول (1) که یک آلیاژ آلومینیم خالص تجاری است، استفاده شده است. با توجه به اینکه در آلیاژهای آلومینیم در نتیجه سیکل‌های حرارتی- مکانیکی احتمال ایجاد فرایندهای رسوب‌گذاری و پیرسازی بعدی وجود دارد و این پدیده‌ها می‌توانند بر روی مکانیزم‌های اختلاط و لذا توزیع اکسیدها اثرگذار باشند، لذا در این تحقیق از آلیاژ خالص تجاری استفاده شده است. جهت انجام این پژوهش، نمونه‌ها در ابعاد 10×50×120 میلی‌متر توسط دستگاه وایرکات برش داده شده و برای جوشکاری، لبه نمونه‌ها و سطوح آن‌ها تمیزکاری شدند. بعد از انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سطح جوش حاصل توسط تصویربرداری با کمک دوربین دیجیتالی و همچنین، میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 3x مورد بررسی قرار گرفت. برای بازرسی جوش از نقطه نظر عیوب داخلی، نمونه‌ها توسط دستگاه اشعه X با مدل (XXG-3005:With directional ceramic X-ray tube) مورد بررسی رادیوگرافی قرار گرفتند. به منظور مطالعه عیب هلالی سطح مقطع نمونه‌ها به روش متالوگرافی آماده‌سازی شده و بعد از حکاکی با کمک محلول اچ پولتن با ترکیب 12 میلی‌لیتر HCL ، 6 میلی‌لیتر HNO_3 ، 1میلی‌لیتـر HF و 1میلی‌لیتـر H_2O، توسط میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفتند. سپس ساختار عیب هلالی و ترکیب شیمیایی آن توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل MIRA3 شرکت سازنده TESCAN و روش آنالیز EDS مورد بررسی قرارگرفت.

با توجه به اینکه اثر همزمان 4 پارامتر در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است، به منظور کاهش تعداد نمونه‌ها از روش طراحی آزمایش تاگوچی برای کنترل 4 پارامتر در سه سطح بهره گرفته شده است. طراحی آزمایش به روش تاگوچی با استفاده از 3 سطح و 4 فاکتور یا پارامتر در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. سطوح و پارامترهای استفاده شده در این تحقیق در جدول (2) معرفی شده‌اند.

با استفاده از روش طراحی بهینه آزمایش به روش تاگوچی با در نظر گرفتن3 سطح و 4 پارامتر (فاکتور)، تعداد 9 آزمایش تعیین و مورد استفاده قرار گرفت که به صورت L_9 نمایش داده می‌شود. در جدول (3)، ترکیب فاکتورها و سطوح در هر آزمایش نشان داده شده است.

در جدول (4) پارامترهای مورد استفاده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و با توجه به طراحی تاگوچی اشاره شده در جدول (2و3) ارایه شده است. با توجه به جدول مشاهده می‌شود که از سه نوع ابزار با پین مربعی، مثلثی و پین استوانه‌ای با شانه ابزار یکسان استفاده شده است.

جدول 1- ترکیب شیمیایی نمونه بر حسب درصد وزنی عناصر.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti	Be	Ca	Li
۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۰۱	۰/۰۰۷	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	۰/۰۱۲	None	Trace	None
Pb	Sn	Sr	V	Na	Bi	Zr	B	Ga	Al		
Trace	<۰/۰۰۲	None	۰/۰۱۳	Trace	<۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	<۰/۰۰۰۵	۰/۰۱	balance		

جدول2- مشخصات پارامترها و سطوح مورد استفاده در طراحی آزمایش تاگوچی L9.

پارامتر	سطح یک	سطح دو	سطح **سه**
شکل ابزار	استوانه ای	چهارگوش (مربعی)	مثلثی
زاویه ابزار(درجه)	۱	۲	۳
سرعت پیشروی جوش(mm/min)	۱۰۰	۱۶۰	۲۵۰
سرعت دوران(rpm)	۴۵۰	۹۰۰	۱۱۲۰

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-11-19]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.2.3]

جدول 3- ترکیب فاکتورها و سطوح در هر آزمایش.

شماره آزمایش	شکل ابزار	زاویه ابزار	سرعت جوشکاری	سرعت دوران
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۲	۲	۲
۳	۱	۳	۳	۳
۴	۲	۱	۲	۳
۵	۲	۲	۳	۱
۶	۲	۳	۱	۲
۷	۳	۱	۳	۲
۸	۳	۲	۱	۳
۹	۳	۳	۲	۱

جدول 4- طراحی تاگوچیL9 اعمال شده برای انتخاب پارامترهای جوشکاری و معیار حرارت ورودی.

نمونه	شکل ابزار	سرعت چرخشی (دور بر دقیقه)	سرعت پیشروی (میلی متر بر دقیقه)	زاویه ابزار (درجه)	معیاری از گرمای ورودی (w/v^2)
۱	□	۹۰۰	۱۰۰	۳	۸/۱
۲	□	۱۱۲۰	۱۶۰	۱	۷/۸۴
۳	□	۴۵۰	۲۵۰	۲	۰/۸۱
۴	⬭	۱۱۲۰	۲۵۰	۳	۵/۰۱۷
۵	⬭	۹۰۰	۱۶۰	۲	۵/۰۶
۶	⬭	۴۵۰	۱۰۰	۱	۲/۰۲
۷	Δ	۱۱۲۰	۱۰۰	۲	۱۲/۵۴
۸	Δ	۴۵۰	۱۶۰	۳	۱/۲۶
۹	Δ	۹۰۰	۲۵۰	۱	۳/۲۴

در شکل(2) ابزارمورد استفاده نشان داده شده است. ابزارها از فولاد ابزار H13 ساخته شده و سپس تحت عملیات حرارتی کوئنچ تمپر سختی آن‌ها به 56 راکول سی افزایش یافت.

با توجه اهمیت دما و میزان گرمای ورودی در فرایند اکسیداسیون حرارتی که منجربه ایجاد عیب هلالی می شود، از یک معیار غیرمستقیم برای مطالعه کیفی میزان گرمای ورودی استفاده شده است که توسط آکین لابی [29] معرفی گردیده است. در این معیار میزان گرمای ورودی به منطقه جوش با کمک رابطه (1) محاسبه می‌شود:

$$Q = h\frac{2pwT}{f} \qquad (۱)$$

در این رابطه مطابق تحقیقات مقدار گرمـای ورودی متنـاسب با سرعت چرخشی و پیشروی است و نسبت w^2/v، (w: سرعت چرخشی (rpm/mm)، v : سرعت پیشروی (mm/ min) به عنوان یک معیار کیفی برای مطالعه میزان گرمای ورودی معرفی شده است[30]. نسبت گرمای ورودی در جوش‌های تولید شده را به نسبت پارامترهای جوشکاری نشان می‌دهد. نسبت گرمای با تقسیم مربع سرعت دوران(w^2) به سرعت پیشروی (v)، بدست می‌آید.

3- نتایج و بحث

3-1- بازرسی کیفی جوش

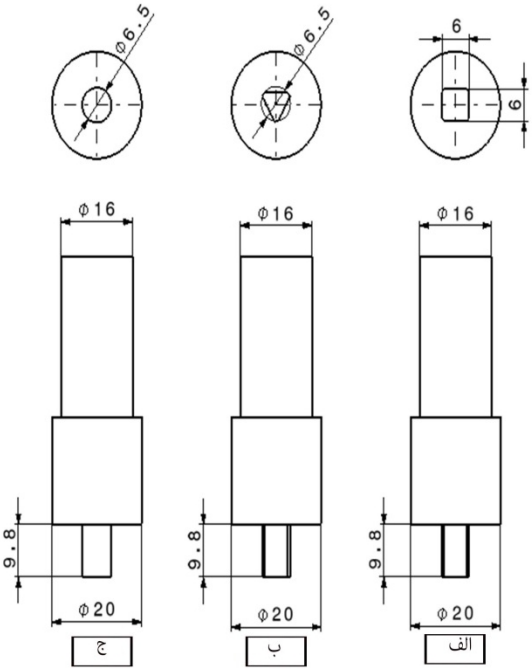
در گام اول صحت جوش‌های حاصل با کمک بازرسی چشمی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-11-19]

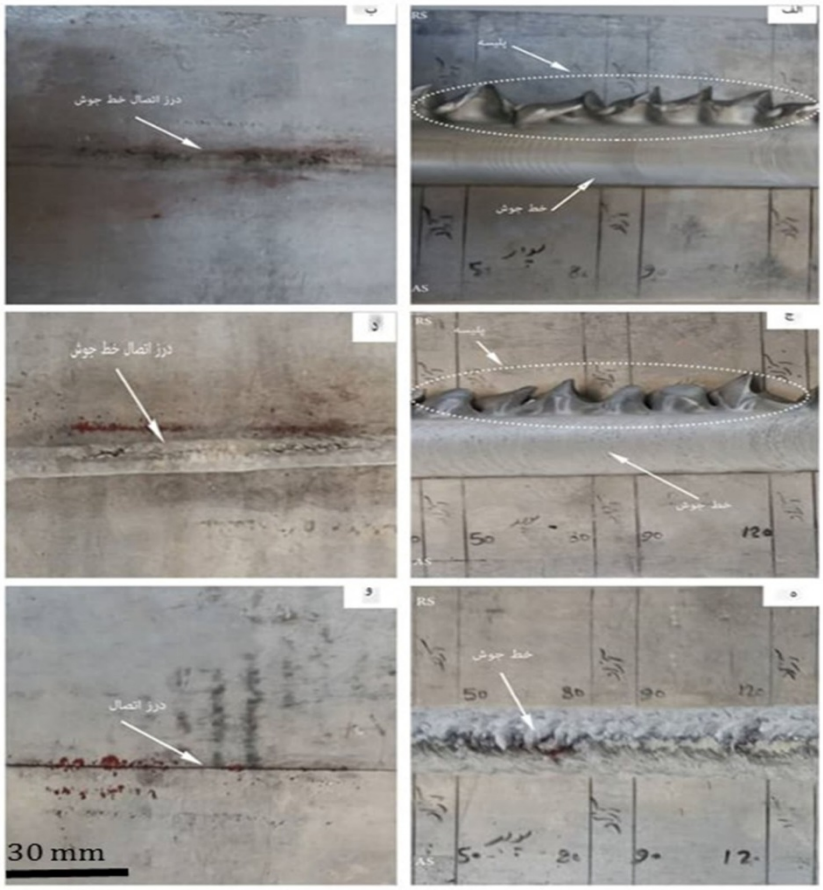
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.2.3]

و تصویربرداری توسط دوربین دیجیتالی بررسی شدند. بررسی نشان داد که به جز نمونه 3 که در آن اتصال برقرار نشده است، در سایر نمونه‌ها اتصال برقرار شده است. در شکل‌های (3و4) تصاویر حاصل از بررسی ماکروسکوپیک سطح و پشت نمونه‌ها ارایه شده است. در شکل‌های(3-ه،3-و) درز اتصال در نمونه 3 به وضوح مشخص بوده و نشان می‌دهد که اتصال موثر برقرار نشده است.

شکل 1- تجهیزات مورد استفاده برای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.



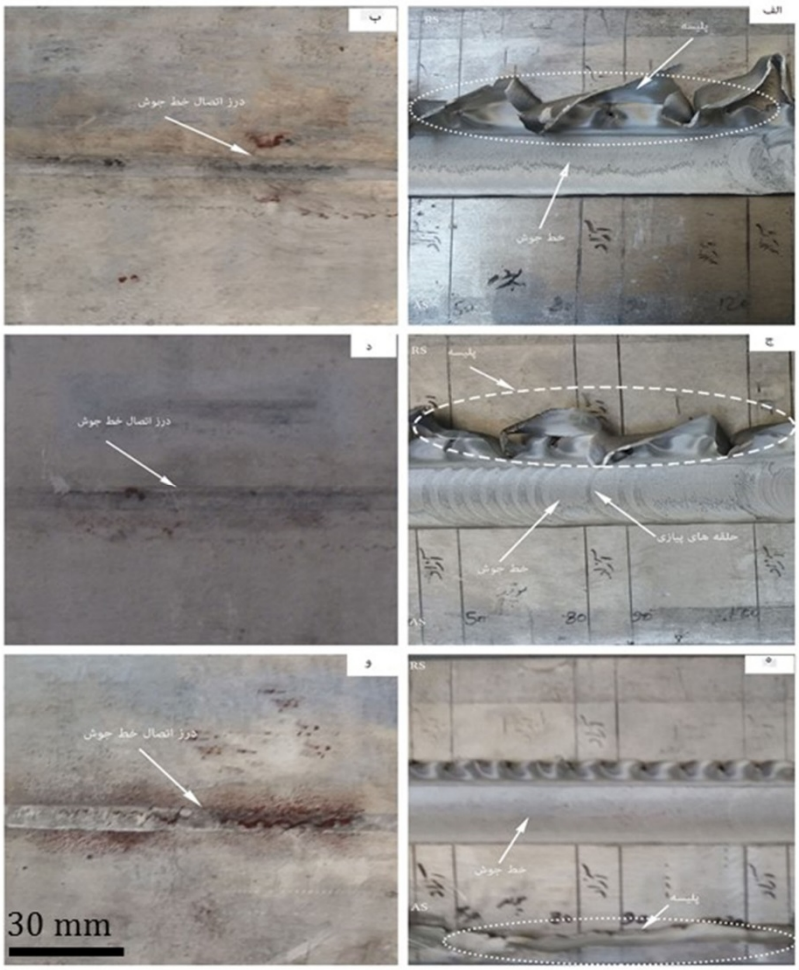
شکل2- شکل ابزار به کار برده شده در جوشکاری نمونه‌های:
الف- شکل ابزار مربعی ب- شکل ابزار مثلثی
ج -شکل ابزار استوانه‌ای (ابعاد برحسب میلی‌متر).



تصاویر سطح جوش نمونه‌های جوشکاری شده تصاویر پشت نمونه‌های جوشکاری شده

شکل 3 - تصاویر حاصل از دوربین دیجیتالی از پین مربعی الف و ب- نمونه 1، ج و د- نمونه 2، ه ، و - نمونه 3.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-11-19]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.2.3]



تصاویر سطح جوش نمونه‌های جوشکاری شده تصاویر پشت نمونه‌های جوشکاری شده

شکل 4- تصاویر حاصل از دوربین دیجیتالی از پین استوانه ای الف و ب- نمونه 4، ج و د- نمونه ، ه ، و- نمونه 6.

در گام بعدی صحت جوش‌ها توسط رادیوگرافی مطالعه قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که در اکثر نمونه‌ها عیب تونلی در نمونه‌ها ایجاد شده است.

در شکل(5)، تصاویر رادیوگرافی حاصل از نمونه‌های 2 و 6 از نمای بالا نشان داده شده است. در هر دو نمونه عیب تونلی به وضوح مشخص است.

3-2- مطالعه میکروسکوپ سطح مقطع جوش

در تصاویر میکروسکوپ نوری سطح مقطع جوش نمونه‌های6و2 بررسی شده و در شکل (6) نشان داده شده است:

مطالعه سطح مقطع نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری مشخص نمود که در نمونه‌های2و6 عیب هلالی ایجاد شده است.

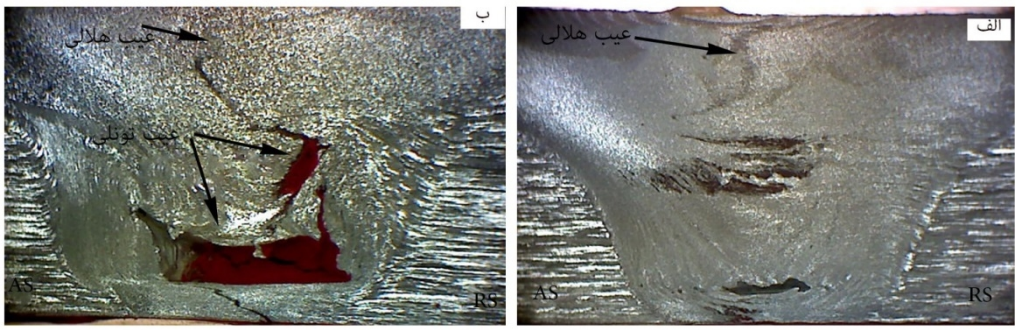
در شکل(6) سطح مقطع این نمونه‌ها نشان داده شده است. عیب هلالی در نمونه 2 در بالای مقطع جوش و نزدیک به سطح جوش و در محل (Stir zone) ایجاده شده است.

3-3- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

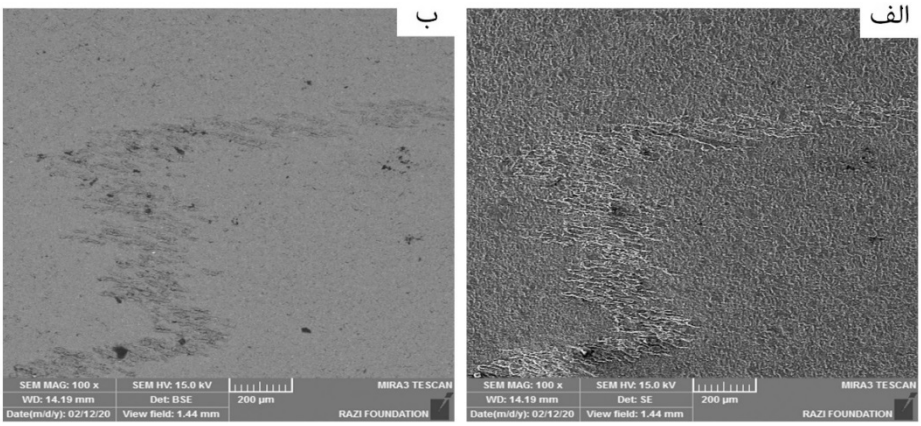
عیوب هلالی در این نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی و آنالیز (EDS) نیز مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل(7) و عیب هلالی در نمونه 2 نشان داده شده است؛ همان‌گونه که مشاهده می‌شود تصویر حاصل از حالت الکترون برگشتی به وضوح نشان می‌دهد که عیب هلالی در نتیجه توزیع یک فاز ثانویه در زمینه فلز پایه به شکلS ایجاد شده است. در این مناطق با کمک آنالیز (EDS) توزیع عنصری برای عناصر آلومینیم

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-11-19]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.2.3]

شکل 5- تصاویر حاصل از رادیوگرافی نمونه‌های جوشکاری در پین مربعی و استوانه‌ای : الف- نمونه 2، ب- نمونه 6.



شکل 6- تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع جوش برای نمونه‌ها با پین استوانه‌ای و مربعی: الف- نمونه 6 ، ب- نمونه 2.



شکل 7- منطقه عیب هلالی در نمونه 2: الف- تصویر حالت الکترون ثانویه ب- تصویر در حالت الکترون برگشتی.

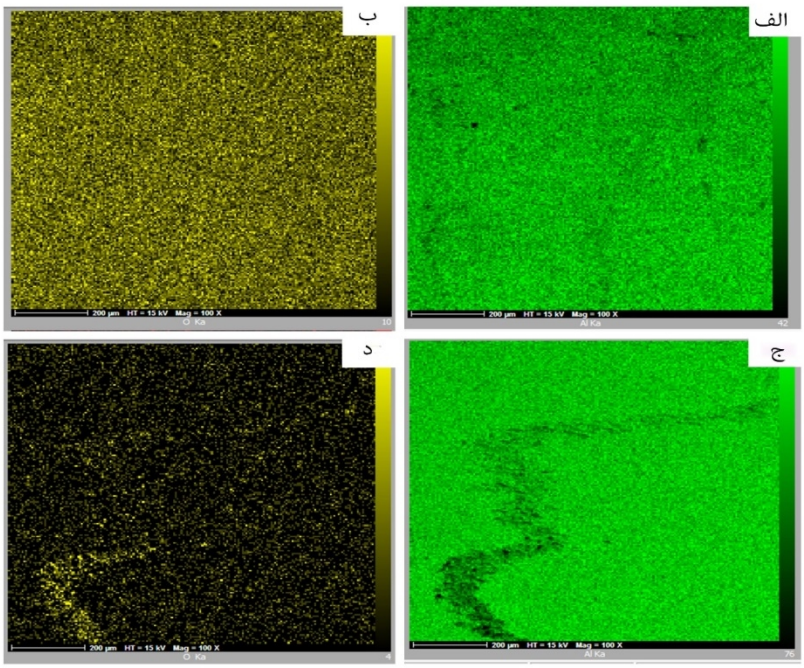
و اکسیژن مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل در شکل (8) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوی s شکل حاصل تجمع ذرات اکسیدی بوده و جنس این اکسیدها بسیار نزدیک به ترکیب شیمیایی اکسید آلومینیم می‌باشد [26]. الگوی s شکل در بزرگنمایی بالاتر مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که ذرات اکسید در این منطقه تجمع یافته‌اند. که تصاویر آن در شکل(9) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که این ذرات دارای توزیع نامنظم بوده و دارای ابعاد بسیار کوچک در حدود 0,5 µm هستند.

4- نتیجه‌گیری

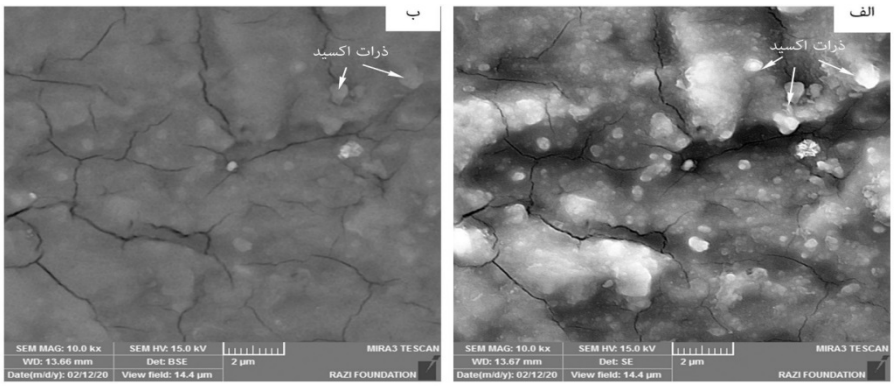
با توجه به بررسی‌ها و مشاهدات موجود نتایج زیر قـابل‌حصول

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-11-19]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.2.3]



شکل8- آنالیز EDS برای بررسی توزیع خطی در نمونه 6، الف و ب- توزیع Map خطی AL و O و ج و د- توزیع Map خطی AL و O در نمونه 2.



شکل 9- منطقه عیب هلالی در نمونه 6: الف- تصویر حالت الکترون ثانویه ب- تصویر در حالت الکترون برگشتی.

می‌باشد:

1- از جوش‌های تولید شده در این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت ابزار پین استوانه‌ای نسبت به پین مربعی عملکرد بهتری داشته است.

2- نمونه با شرایط جوشکاری، سرعت چرخشی 1120 دور بردقیقه و سرعت پیشرویی160 میلی‌متر بر دقیقه و زاویه1 درجه، حداکثر عیب هلالی در نمونه مشاهده گردید.

3- با توجه به تصاویر بدست آمده توسط آنالیز (EDS) به نظر می‌رسد ناحیه S عناصر Al و O وجود داشته که بیانگر تشکیل اکسید آلومینیم در منطقه عیب هلالی می‌باشد.

منابع

1-W. Thomas, "International Patent Application", *PCT/GB92/0220* 1991.

2-N. Soni, S. Chandrashekhar, A. Kumar, and V. R. Chary, "Defects Formation during Friction Stir Welding: A Review," *International Journal of Engineering and Management Research*, vol. Volume-7,, pp. 121-125, 2017.

3-M. P. Mubiayi and E. T. Akinlabi, "Friction StirWelding of Dissimilar Materials between Aluminium Alloys and Copper" - *An Overview"Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. Vol III, WCE 2013, July 3 - 5, 2013, London, U.K., 2013.

4-K. Kumar and V. Satish Kailas, ,, "The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation. , "*Materials Science and Engineering A*,, vol. 485(1-2): pp. p. 367–374., 2008.

5- R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-11-19]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.2.3]

underwater and under liquid nitrogen: an improved method to join Al alloys to Mg alloys", *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall Mater. Sci.Eng*, vol. 43, pp. 5106–5114, (2012).

19-S. R. Ren, Z. Y. Ma, and L. Q. Chen, *Mater. Sci. Eng.*, vol. A 479, pp. 293–299., (2008)

20-A. J. Leonard and S. A. Lockyer, "Flaws in Friction Stir Welds", *Proceedings of the Fourth International Conference on Friction Stir Welding*, , pp. p. 14–16., 2003:.

21-Y. S. Sato, F. Yamashita, Y. Sugiura, S. H. C. Park , and H. Kokawa, "Scr. Mater.," vol. 50, pp. 365–369., (2004).

22-Y. Wu, H. Mao, Q. Yang, and Z. Zhang, "Effect of Welding Parameters on Defects and Fracture Behavior of Friction Stir Welded 2195-T8 Al-Li Alloy Joints", *Materials Science Forum*, vol. 913,, pp. pp 182-189, 2018.

23-Y. Tao, D. R. Ni, B. L. Xiao, Z. Y. Ma , W. Wu, R. X. Zhang, *et al.*, "Origin of unusual fracture in stirred zone for friction stir welded 2198-T8 Al-Li alloy joints", *Materials Science & Engineering* vol. A 693, pp. 1–13, (2017)

24-H. Mohammadzadeh Jamalian, M. Farahani, M. K. Besharati Givi , and M. Aghaei Vafaei, "Study on the effects of friction stir welding process parameters on the microstructure and mechanical properties of 5086-H34 aluminum welded joints", *Springer-Verlag London* pp. 1-11, 2015.

25-R. P. Mahto, C. Gupta, M. Kinjawadekar, M. Abhishek, and S. K. Pal, "Weldability of AA6061-T6 and AISI 304 by underwater friction stir welding," *Journal of Manufacturing Processes* vol. 38, pp. 370–386, (2019)

26-H.-B. Chen, K. Yan, T. Lin, S. B. Chen, C. Yu Jiang, and Y. Zhao, "The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds.," *Materials Science and Engineering: A,*, vol. 433(1):, pp. p. 64-69., 2006.

27-T.L. Dickerson and J. Przydatek, "Fatigue of friction stir welds in Aluminum alloys that contain root flaws," *International Journal of Fatigue* vol. 25, pp. 1399-1409., 2003.

28-H. S. Park, T. Kimura, T. Murakami, Y. Nagano, K. Nakata, and M. Ushio, "Microstructures and mechanical properties of friction stir welds of 60% Cu–40% Zn copper alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 371, pp. 160-169, 2004.

29- Akinlabi E.T, D. M. Madyira, and S. A. Akinlabi, "Effect of Heat Input on the Electrical Resistivity of Dissimilar Friction Stir Welded Joints of Aluminium and Copper," *in AFRICON, 2011 IEEE.*, 2011.

30- R. Nandan, T. , a. D. , H. K. D. H.Bhadeshia , and "Recent advances in friction stir welding process, weldment structure and properties.," *progress in Material Science*, vol. 53(6), pp. 980-1023, 2008.

processing.," *Materials Science and Engineering R.*, vol. 50, pp.1–78., 2005.

6-P. Kah, R. Rajan, J. Martikainen, and R. Suoranta, "Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 10, p. 26, 2015.

7- O. B. Annette, " Friction stir welding. In AWS welding handbook part 2 (pp.(211–261)." *Miami, Florida: American Welding Society (AWS).* (2007).

8- P. Wanjara, B. Monsarrat, and S. Larose, "Gap tolerance allowance and robotic operational window for friction stir butt welding of AA6061.," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, pp. 631–640., (2013).

9- R. P. Mahto, C. Gupta, M. Kinjawadekar, A. Meena, and S. K. Pal, "Weldability of AA6061-T6 and AISI 304 by underwater friction stir welding," *J. Manuf. Process.*, vol. 38, pp. 370–386, (2019).

10- K. Kimapong and T. Watanabe, " Lap joint of A5083 aluminum alloy and SS400 steel by friction stir welding," *Mater. Trans.* , vol. 46, pp. 835–841,, (2005).

11-Z. Shen , Y. Chen, M. Haghshenas, and A. P. Gerlich, "Role of welding parameters on interfacial bonding in dissimilar steel/aluminum friction stir welds,," *Eng. Sci. Technol.an Int. J.*, pp. 8–15, (2015).

12-M. Dehghani, A. Amadeh, and S. A. A. Akbari Mousavi, "Investigations on the effects of friction stir welding parameters on intermetallic and defect formation in joining aluminum alloy to mild steel," *Mater. Des.* , vol. 49 pp. 433–441, (2013).

13-T. Watanabe , H. Takayama, and A. Yanagisawa, "Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding, ,"*J. Mater. Process. Technol.*, vol. 178, pp. 342–349, (2006).

14-M. Dehghani , S. A. A. A. Mousavi, and A. Amadesh, "Effects of welding parameters and tool geometry on properties of 3003-H18 aluminum alloy to mild steel friction stir weld", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* , vol. 23 pp. 1957–1965, (2013)

15-P. Wanjara, B. Monsarrat, and S. Larose, "Gap tolerance allowance and robotic operational window for friction stir butt welding of AA6061", *Journal of Materials Processing Technology*, , vol. 213, pp. 631–640., (2013).

16-R. P. Mahto, R. Kumar, and S. Pal,"Characterizations of weld defects, intermetallic compounds and mechanical properties of friction stir lap welded dissimilar alloys," *Materials Characterization*, vol. 160, pp. 1-15, (2020).

17-W. Y. Li, J. F. Li, and a. e. a. Z. H. Zhang, "Metal Flow during Friction Stir Welding of 7075-T651 Aluminum Alloy,"*Experimental Mechanics,*, vol. 53, pp. pp. 1573–1582., 2013.

18-M. A. Mofid, A. Abdollah-Zadeh, F. M. Ghaini, and C. H. Gur, "Submerged friction-stirwelding (SFSW)

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-11-19]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.2.3]