مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1396، دوره 17، شماره 12، ص‌ص 328-336

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لبه روی هم آلومینیم به فولاد روکش‌شده با آلومینیم با فرآیند جوش‌کاری قوسی الکترود تنگستنی-گاز

عباس حسن‌نیاه[1] و مجتبی موحدی[2*]

1- کارشناسی‌ارشد، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- استادیار، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی 9466-11365، m_movahedi@sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 20 مهر 1396

پذیرش: 30 آبان 1396

ارائه در سایت: 24 آذر 1396

کلید واژگان:

فولاد روکش‌شده با آلومینیم

GTAW

ترکیبات بین‌فلزی

آزمون کشش- برش

آنالیز تنش

چکیده

ورق‌های آلیاژ آلومینیم 5052-H34 و ورق‌های فولاد St-12 روکش‌شده با آلومینیم 1050 (با ضخامت پوشش 1 mm) به روش جوش‌کاری قوسی الکترود تنگستنی-گاز (GTAW) با طرح اتصال لبه روی هم در سه جریان جوش‌کاری 80، 100 و 120 آمپر با استفاده از فلز پرکننده ER-4047 (Al-Si) متصل شدند. اثر جریان جوش‌کاری بر ریزساختار جوش، لایه‌ی ترکیبات بین‌فلزی و استحکام کششی اتصالات بررسی شد. برای مطالعات ریزساختاری از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی (SEM) مجهز به آنالیز طیف‌سنجی تفرق انرژی (EDS) استفاده شد و استحکام کششی اتصالات از آزمون کشش-برش به‌دست آمد. نتایج نشان داد که در تمام نمونه‌ها یک لایه‌ی واکنشی شامل دو فاز بین‌فلزی Al_5Fe_2 و Al_3Fe در فصل‌مشترک فلز پایه فولاد St-12 با لایه پوشش آلومینیم 1050 در زیر محل جوش به‌صورت پیوسته تشکیل شده است. حداکثر میانگین ضخامت لایه‌ی واکنشی 3.5 µm~ به‌دست آمد که به نظر می‌رسد حضور لایه پوشش آلومینیم 1050 مانع رشد بیش از حد لایه ترکیبات بین‌فلزی Al-Fe شده است. با افزایش جریان جوش‌کاری، استحکام کششی اتصال به‌صورت تقریبا خطی کاهش می‌یابد و فاصله بازوهای اولیه دندریتی α-Al افزایش یافته و توزیع فازهای یوتکتیک‌های Al-Si غیریکنواخت شده است. در نتیجه رشد ترک را تسهیل کرده و نیروی شکست کاهش می‌یابد. حداکثر استحکام کششی در اتصالات معادل 190 MPa~ به‌دست آمد که 80٪~ استحکام کششی فلز پایه آلیاژ آلومینیم 5052-H34 می‌باشد. درحین آزمون کشش-برش شکست همه نمونه‌ها با زاویه 70°~ از سطح آلومینیم 1050 گسترش یافت. تجزیه و تحلیل تنش در جوش نشان داد که شکست در جوش عمدتا با حداکثر تنش نرمال کنترل می‌شود.

Microstructure and mechanical properties of aluminum to aluminum clad steel lap joint using gas tungsten arc welding process

Abbas Hasanniah, Mojtaba Movahedi*

Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 9466-11365, Tehran, Iran, m_movahedi@sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 October 2017
Accepted 21 November 2017
Available Online 15 December 2017

Keywords:
Aluminum clad steel
GTAW
Intermetallic compounds
Shear-tensile test
Stress analysis

ABSTRACT

The 5052 aluminum alloy was lap joined to Al-1050 clad steel sheet (with Al-1050 thickness of 1mm) using gas tungsten arc welding (GTAW) process with 4047 Al-Si filler metal at the welding currents of 80, 100 and 120 A. Effect of welding current was studied on the weld microstructure, intermetallic compounds layer and tensile strength of the joints. Microstructural studies were done using optical and scanning electron microscopes (SEM) equipped with energy dispersive spectroscopy (EDS) and tensile strength of the joints was determined by shear-tensile test. Results shows that the reaction layer included two Al_3Fe and Al_5Fe_2 intermetallic phases formed at the interface of the St-12 base sheet and Al-1050 clad layer. Maximum average thickness of the reaction layer was ~3.5 µm .It seems that presence of Al-1050 layer prevents excessive growth of Al-Fe intermetallic layer. The joint tensile strength decreased almost linearly by enhancement of the welding current and the primary α-Al dendrite arm spacing increased and Al-Si eutectics were distributed more uniformly. As a result, the crack easily grows and fracture force reduces. The maximum tensile strength of the joints reached to ~190 MPa, i.e. ~80% of 5052-H34 aluminum base metal strength. During the shear-tensile test, fracture in all the joints was started from the root of the weld and then propagated inside the weld metal with an angle of ~70° with respect to the Al-1050 base sheet. Stress analysis in weld showed that fracture in the joint was controlled predominantly by the maximum normal stress.

1-مقدمه

اتصال نامشابه آلیاژهای آلومینیم به فولاد به‌دلیل کاربرد آن در صنایع مختلف حمل و نقل مانند خودروسازی و هوافضا مورد توجه می‌باشد. این اتصالات باعث بهبود راندمان سوخت و کنترل آلودگی‌های زیست‌محیطی با کاهش وزن سازه می‌شوند. بنابراین، بررسی و بهبود اتصال فلزات نامشابه فولاد و آلومینیم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اتصال مستقیم آلیاژ آلومینیم به

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Hasanniah, M. Movahedi, Microstructure and mechanical properties of aluminum to aluminum clad steel lap joint using gas tungsten arc welding process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 328-336, 2018 (in Persian)

فولاد با روش‌های جوش‌کاری ذوبی اغلب به دلیل اختلاف زیاد در خواص حرارتی و فیزیکی این دو ماده با مشکلات زیادی مواجه است. علاوه براین، تشکیل لایه‌ای از ترکیبات بین فلزی ترد و ایجاد ترک باعث کاهش استحکام جوش می‌شود [1-5].

به‌منظور ایجاد اتصال بین فولاد و آلومینیم، روش‌های مختلف جوش‌کاری حالت جامد از قبیل جوش‌کاری اصطکاکی تلاطمی، جوش‌کاری اصطکاکی، جوش‌کاری نفوذی، جوش‌کاری انفجاری و جوش‌کاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای بررسی شده است. اگرچه با جوش‌کاری حالت جامد می‌توان اتصال فولاد-آلومینیم با استحکام مناسب ایجاد کرد، اما این فرآیندها دو محدودیت بزرگ دارند: محدودیت هندسه قطعات و نیاز به تجهیزات گران‌قیمت [6-9].

تحقیقات پیشین نشان داده است که با استفاده از فولاد پوشش داده شده، می‌توان لایه‌ی ترکیبات بین‌فلزی Al-Fe را از طریق محدود کردن واکنش‌های شیمیایی و نفوذ بین آلومینیم و فولاد کنترل نمود [10]. در این میان، بیشتر از فولادهای روکش‌شده با Zn استفاده می‌شود. راتاناتاورن و ملاندر [11] در تحقیق خود اثر Zn بر اتصال آلیاژ آلومینیم 5754 به فولاد گالوانیزه با روش جوش‌کاری اصطکاکی تلاطمی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که اتصالات با لایه گالوانیزه نسبت به فولاد بدون پوشش دارای استحکام بیشتری هستند، اما در حین جوش‌کاری، فاز مایع Zn تشکیل شده و منجر به ایجاد حفرات در اتصال شده است. گتزن و همکاران [12] نشان دادند که در جوش‌کاری ذوبی، لایه Zn در فولادهای گالوانیزه می‌تواند باعث بهبود ترشوندگی مذاب فلز پرکننده بر سطح فولاد شود و تشکیل ترکیبات بین‌فلزی را نیز کنترل کند. سیرا و همکاران [13] در تحقیق خود نشان دادند که در هر دو فرآیند جوش‌کاری پرتو لیزر و فرآیند جوش‌کاری قوسی الکترود تنگستنی-گاز (GTAW)، حضور حفرات ناشی از Zn در منطقه ذوب منجر به کاهش شدید استحکام شکست جوش می‌شود. بنابراین، به‌علت پایین بودن نقطه تبخیر فلز Zn و درنتیجه تشکیل حفره در منطقه فلز جوش، استفاده از این فولادها به حرارت‌های ورودی پایین در جوش‌کاری ذوبی محدود شده است [14]. یکی دیگر از روش‌های جایگزین، می‌تواند استفاده از ورق‌های فولادی روکش شده با آلومینیم بجای ورق‌های فولادی پوشش داده شده با Zn باشد. در این ورق‌ها، آلومینیم معمولا به روش جوش‌کاری نوردی بر روی سطح ورق‌های فولادی روکش می‌شود. با توجه به این‌که نقطه ذوب و تبخیر آلومینیم بیشتر از Zn است، بنابراین دمای سرویس‌دهی در اتصالات ایجاد شده با ورق‌های فولادی روکش‌شده با آلومینیم بیشتر از اتصالات ایجاد شده با ورق‌های پوشش داده شده با Zn می‌باشد [15].

هدف پژوهش حاضر، اتصال لبه روی هم آلیاژ آلومینیم 5052 به فولاد پوشش داده شده با آلومینیم خالص تجاری با استفاده از روش جوش‌کاری ذوبی قوسی الکترود تنگستنی-گاز است که یک روش جوش‌کاری بسیار متداول و با قابلیت انعطاف‌پذیری بالا می‌باشد. از فلز پرکننده ER-4047 برای جوش‌کاری ورق‌ها استفاده شد. اثرات جریان جوش‌کاری بر تشکیل لایه‌ی ترکیبات بین‌فلزی در فصل‌مشترک آلومینیم 1050 و فولاد St-12، ریزساختار فلز جوش و استحکام کشش-برش اتصالات مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی محل شکست از تجزیه و تحلیل تنش در جوش فیلت ساده استفاده گردید.

2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، از ورق‌های فولاد St-12 به ضخامت 1.5 mm، آلومینیم 1050 با ضخامت اولیه 2 mm و آلیاژ آلومینیم 5052-H34 به ضخامت 3 mm استفاده شد. ترکیب شیمیایی و استحکام کششی فلزات پایه و فلز پرکننده در جدول 1 آورده شده است. ابتدا، ورق‌های فولادی روکش شده با آلومینیم 1050 با استفاده از فرآیند جوش‌کاری نوردی و در یک پاس تولید شدند. در مرحله اول ورق‌های آلومینیم 1050 و فولاد St-12 به ترتیب در دمای 400 °C به مدت 30 دقیقه و در 900 °C به مدت 60 دقیقه تحت عملیات حرارتی قرار گرفته و بعد از آن در کوره سرد شدند. در مرحله دوم، قبل از عملیات نورد، برای ایجاد اتصال متالورژیکی مناسب سطح ورق‌ها آماده سازی شدند. ابتدا به‌منظور حذف اکسیدها، سطح ورق‌های St-12 با اسید هیدروکلریک (HCl) اسیدشویی و بعد از آن سطح ورق‌های آلومینیم 1050 و فولاد St-12 در استون چربی‌زدایی و سپس با برس سیمی از جنس فولاد زنگ‌نزن برس‌کاری شدند. در ادامه، فرآیند جوش‌کاری نوردی با کاهش ضخامت 0.5 و عملیات حرارتی پس از اتصال با دما و زمان 450 °C و 90 دقیقه انجام شد [16]. ورق‌های روکش‌شده با ضخامت لایه پوشش Al-1050 برابر با 1 mm تولید شدند. استحکام ورق‌های دو لایه St-12/Al-1050 بعد از عملیات حرارتی با استفاده از آزمون لایه‌کنی مطابق با استاندارد ASTM-D1876-08 ارزیابی شد. سه نمونه تهیه و سپس میانگین استحکام اتصالات نوردی محاسبه شد. برای انجام این آزمایشات، از دستگاه کشش هانسفیلد با سرعت کشش ثابت 5 mm/min استفاده گردید. استحکام لایه‌کنی ورق‌های دو لایه با استفاده از فرمول (1) محاسبه و نتایج در جدول 2 گزارش شده است.

(1) استحکام لایه‌کنی = نیروی لایه‌کنی / عرض اتصال

سپس، ورق‌های آلیاژ آلومینیم 5052 به ورق‌های فولادی St-12 روکش‌شده با آلومینیم 1050 با طرح اتصال لبه روی هم به روش GTAW متصل شدند. طرح اتصال و ابعاد ورق‌ها در "شکل 1" آورده شده است. همچنین، قطر فلز پرکننده ER-4047 برابر 2 mm بود. علت استفاده از فلز پرکننده ER-4047 نقطه‌ی ذوب پایین آن (580 °C) در مقایسه با دیگر فلزات پرکننده در خانواده Al-Si است که در این صورت به حرارت ورودی کم‌تری برای ذوب فلز پرکننده نیاز است و در نتیجه از ذوب کامل لایه واسط آلومینیم 1050 در حین جوش‌کاری جلوگیری می‌شود. شماتیک موقعیت مشعل جوش‌کاری و فلز پرکننده در "شکل 2" ارائه شده است. جوش‌کاری در سه سطح جریان متفاوت 80، 100 و 120 آمپر انجام شد. در جدول 3 محدوده متغیرهای ثابت فرآیند GTAW آورده شده است. جوش‌کاری نمونه‌ها به صورت دستی انجام شد و سرعت جوش‌کاری همه نمونه‌ها تقریبا برابر و در بازه مشخص شده در جدول 3 قرار داشت. برای تعیین استحکام جوش، سه نمونه از مقطع عرضی با عرض 25 mm برای هر یک از جریان‌های جوش‌کاری تهیه شد. برای انجام آزمون کشش-برش، از دستگاه کشش هانسفیلد با سرعت کشش ثابت 1 mm/min استفاده گردید. نمونه‌های متالوگرافی به صورت مقطع عرضی از جوش‌های ساخته شده بریده و سپس پولیش شدند. مقطع عرضی درز جوش توسط محلول اچ 0.5 ml هیدروفلوئوریک اسید و 99.5 ml آب مقطر اچ شد. مطالعات ماکرو و ریزساختاری فلز جوش توسط میکروسکوپ نوری و تشکیل و تغییرات ضخامت لایه ترکیبات بین‌فلزی Al-Fe و شناسایی فازهای آن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز طیف سنجی تفرق انرژی انجام شد. فاصله بازوهای دندریتی اولیه مطابق با "شکل 5" برای 20 نقطه مختلف با استفاده از نرم‌افزار آنالیز تصویری امیج‌جی اندازه‌گیری و میانگین آن گزارش شد.

جدول 1 ترکیب شیمیایی و استحکام فلزات پایه و فلز پرکننده

Table 1 Chemical composition (wt.%) and strength of the base metals and filler metal

ماده	Fe	Al	Mg	Si	C	استحکام (MPa)
Al-5052-H34	0.23	Rem.	2.36	0.06	-	245
Al-1050	0.4	Rem.	-	0.25	-	80
St-12	Rem.	-	-	0.04	0.1	260
ER-4047	0.18	Rem.	-	11.5	-	124

جدول 2 استحکام لایه‌کنی ورق‌های St-12/Al-1050

Table 2 Peel strength of Al-1050/St-12 sheets

نمونه	استحکام لایه‌کنی (N/mm)	میانگین استحکام لایه‌کنی (N/mm)
1	35.3	35
2	34.6	
3	35.1	

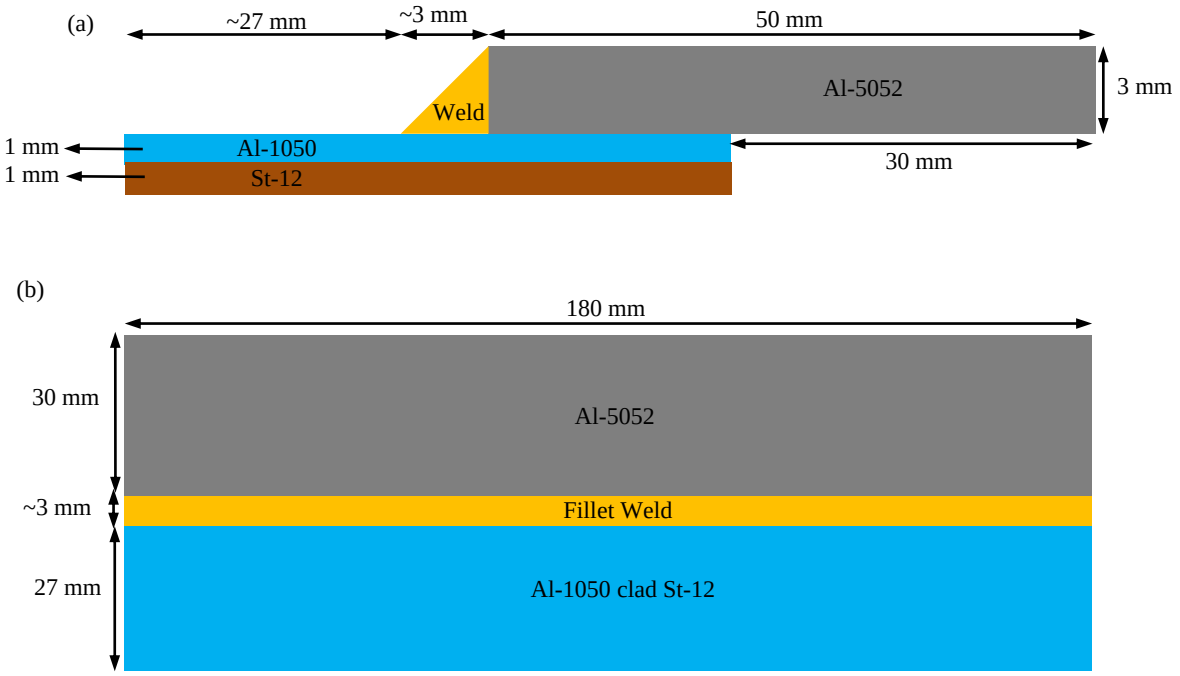

Fig. 1 Lap joint configuration and dimensions of the samples, (a) cross section and (b) top view

شکل 1 طرحواره طرح اتصال لبه روی هم و ابعاد نمونه ها، (a) نمای جانبی و (b) نمای بالایی

جدول 3 متغیرهای ثابت فرآیند GTAW

Table 3 Constant parameters of GTAW process

متغیر	واحد	مقدار
ولتاژ	V	12
جریان گاز آرگون	$l.min^{-1}$	8
قطر الکترود تنگستنی	mm	2.4
سرعت جوش‌کاری	mm/min	100-110

همان‌گونه که دیده می‌شود، ورق Al-5052 در بالا و ورق فولاد St-12 روکش‌شده با Al-1050 در پایین قرار گرفته است. طرح اتصال لبه روی هم و جوش ایجاد شده نیز به‌صورت فیلت ساده است. نکته‌ی قابل ذکر در مورد نمای پشت جوش این است که در اثر حرارت جوش‌کاری، ورق St-12 در زیر محل جوش ذوب نشده است. تمام نمونه‌های جوش داده شده از هر دو طرف به‌صورت چشمی بازرسی شدند. در ورق‌های متصل شده، هیچ‌گونه عیب قابل مشاهده‌ای از قبیل ترک در داخل جوش، حفره و بریدگی کناره جوش مشاهده نشد. در "شکل 4" نیز ماکروساختار مقطع عرضی جوش ارائه شده

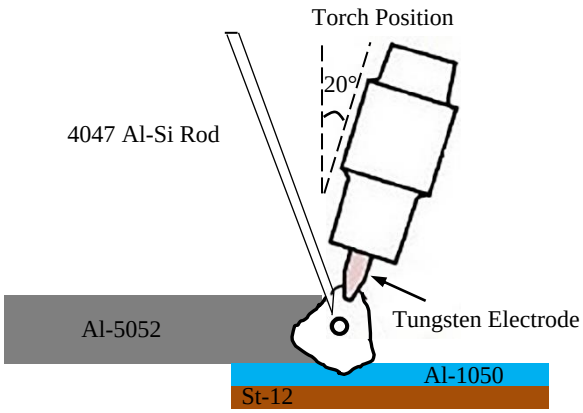

Fig. 2 Schematic of GTAW process

شکل 2 طرحواره فرآیند GTAW

3- نتایج و بحث

3-1- ماکروساختار جوش

در "شکل 3" ظاهر جوش‌های ایجاد شده نشان داده شده است. "شکل 3-a" ظاهر جوش از نمای جلو و "شکل 3-b" نمای پشت جوش را نشان می‌دهد.

است. در تمام جوش‌های تولید شده با لایه پوشش Al-1050، این لایه به صورت جزئی ذوب شده و مذاب فلز پرکننده هیچ تماسی با سطح فولاد نداشته است. همچنین، از بررسی تصاویر ماکروسکوپی جوش‌ها مشخص شد که در حین جوش‌کاری، ورق آلیاژ آلومینیم 5052 ذوب شده اما هیچ‌گونه ذوب ظاهری در ورق فولاد St-12 مشاهده نشد. بنابراین، در حین جوش‌کاری فلز پایه آلیاژ آلومینیم 5052 و فلز پایه آلومینیم 1050 به علت حرارت ورودی جوش‌کاری ذوب و با مذاب فلز پرکننده مخلوط شده اند و عملا اتصال بین دو آلومینیم Al-5052 و Al-1050 انجام شده است. از طرفی، زاویه‌ای که فلز پرکننده با سطح لایه واسط Al-1050 در تماس است، به‌عنوان معیار ترشوندگی در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در "شکل 4" نشان داده شده است، زاویه ترشوندگی در تمام جوش‌ها برابر °30~ است.

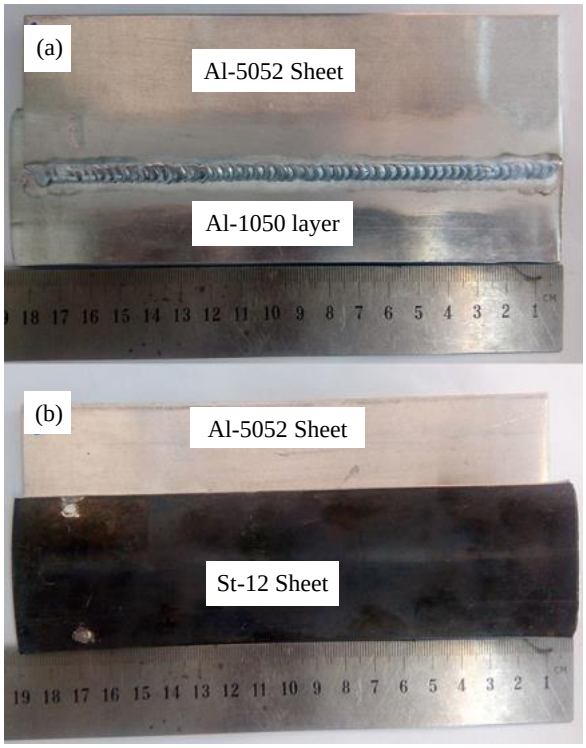

Fig. 3 (a) Front view and (b) back view of the joint

شکل 3 (a) نمای جلو و (b) نمای پشت اتصال

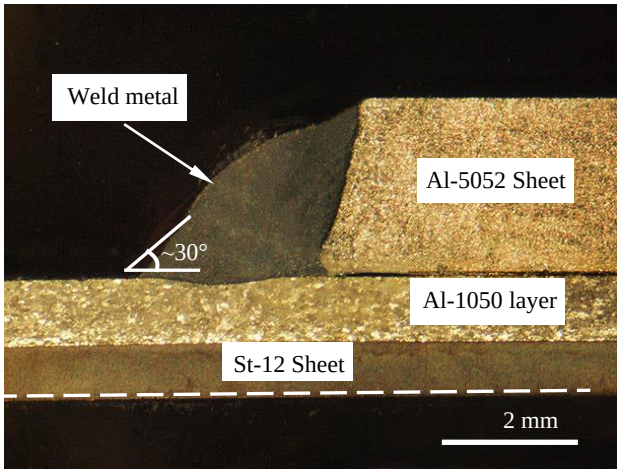

Fig. 4 Macrostructure of the lap joint cross-section

شکل 4 ماکروساختار مقطع عرضی اتصال لبه روی هم

3-2- ریزساختار فلز جوش و لایه واکنشی بین‌فلزی

"شکل 5" تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فلز جوش در کم‌ترین و بیش‌ترین جریان جوش‌کاری را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، فلز جوش در تمام جوش‌ها شامل دندریت‌های محلول جامد α-Al و یوتکتیک‌های Al-Si تشکیل شده در فضای بین‌دندریتی می‌باشد. با توجه به این‌که ترکیب فلز پرکننده ER-4047 نزدیک به ترکیب نقطه یوتکتیک است اما دندریت‌های محلول جامد α-Al در فلز جوش تشکیل شده است. همان‌گونه که از "شکل 4" مشخص است، در حین جوش‌کاری، فلز پایه آلومینیم 5052 ذوب شده و وارد فلز جوش می‌شود. در نتیجه، درصد وزنی آلومینیم در فلز جوش افزایش می‌یابد و در حین انجماد سبب تشکیل دندریت‌های محلول جامد α-Al می‌شود. این ریزساختار در مطالعات دیگر مربوط به جوش‌های ساخته شده با فلز پرکننده Al-Si هم گزارش شده است [17,14].

در "شکل 6" نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری فاصله بازوهای دندریتی اولیه در جوش‌های ایجاد شده با جریان‌های جوش‌کاری مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در اثر افزایش جریان جوش‌کاری، فاصله بازوهای دندریتی اولیه α-Al افزایش پیدا کرده است. میانگین فاصله بازوهای اولیه دندریتی محلول جامد α-Al در جریان جوش‌کاری 80 آمپر برابر 40 µm بود در حالی که در جریان جوش‌کاری 120 آمپر به مقدار 80 µm رسیده است. فاصله بازوهای دندریتی اولیه تشکیل شده در حین جوش‌کاری به عوامل مختلفی از قبیل دما و زمان جوش‌کاری، سرعت سرد شدن جوش و زمان انجماد وابسته است که این عوامل تحت تاثیر پارامترهای جوش‌کاری مانند جریان جوش‌کاری و سرعت جوش‌کاری قرار می‌گیرند [18,17]. افزایش جریان جوش‌کاری منجر به افزایش حرارت ورودی در جوش‌کاری می‌شود؛ بنابراین، در جریان جوش‌کاری بالاتر، مقدار حرارت ورودی و دمایی که فلز جوش تجربه کرده، افزایش یافته است. همچنین، حرارت ورودی بیش‌تر منجر به سرعت سرد شدن پایین‌تر و زمان انجماد طولانی‌تر شده است. علاوه براین، مشاهده می‌شود که با افزایش جریان جوش‌کاری و فاصله بین بازوهای اولیه دندریت‌ها، توزیع فازهای یوتکتیک Al-Si در ریزساختار فلز جوش غیریکنواخت می‌شود. به بیان دیگر فازهای یوتکتیک در بعضی از نقاط ریزساختار به‌صورت موضعی تجمع کرده‌اند [20,19].

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از فصل‌مشترک اتصال نوردی بعد از عملیات حرارتی و لایه ترکیبات بین‌فلزی Al-Fe در جریان‌های جوش‌کاری متفاوت در "شکل 7" نشان داده شده است. "شکل 7-a" نشان می‌دهد که در حین عملیات حرارتی در دمای 450 °C به مدت 90 دقیقه، در فصل‌مشترک اتصال نوردی ترکیبات بین‌فلزی Al-Fe تشکیل نشده است. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، در حین جوش‌کاری، لایه پوشش آلومینیم 1050 به‌صورت جزئی ذوب شده و مذاب فلز پرکننده با ورق فولاد St-12 تماسی نداشته است. اگرچه به دلیل حرارت ایجاد شده در حین جوش‌کاری، لایه ترکیبات بین‌فلزی Al-Fe در زیر محل جوش و در فصل‌مشترک فولاد St-12 و لایه پوشش آلومینیم 1050 شکل گرفته است. به‌منظور شناسایی فازهای تشکیل شده در لایه ترکیبات بین‌فلزی، از نقاط مشخص شده بر روی "شکل 7" آنالیز طیف‌سنجی تفرق انرژی گرفته شده و نتایج در جدول 4 ارائه شده است. از نتایج بدست آمده مشخص شد که لایه ترکیبات بین‌فلزی Al-Fe شکل گرفته در تمام جوش‌ها شامل دو زیرلایه با کنتراست متفاوت می‌باشد. ترکیب شیمیایی نقاط A و B در "شکل 7-d" به‌ترتیب بهترین

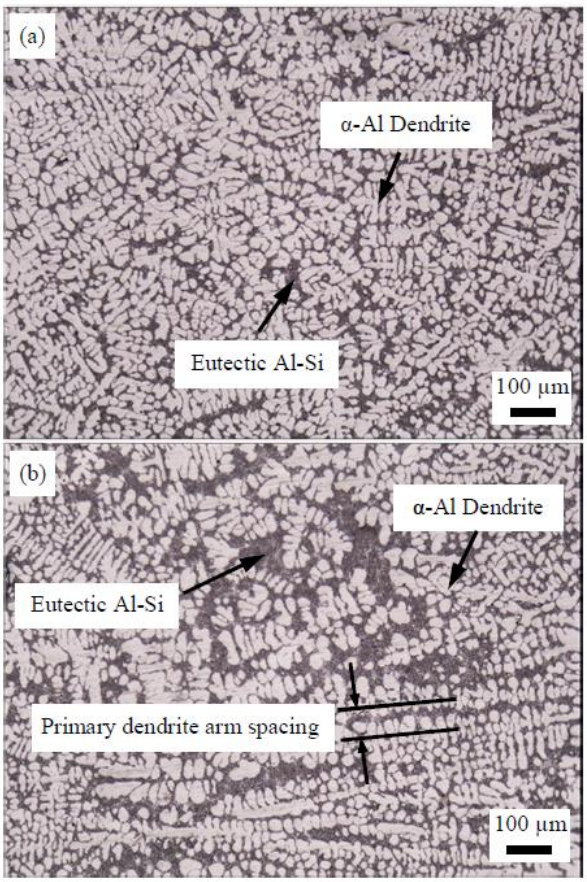

Fig. 5 Microstructure of the weld metal with the welding current of (a) 80 A (b) and 120 A

شکل 5 ریزساختار فلز جوش با جریان جوش‌کاری (a) 80 A و (b) 120 A

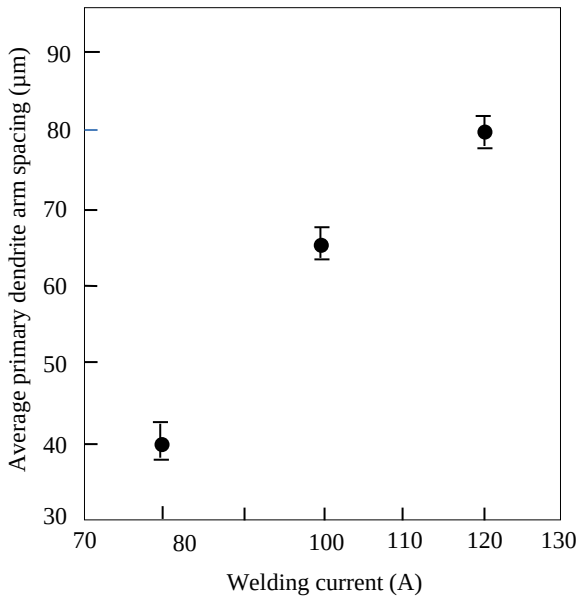

Fig. 6 Primary dendrite arm spacing vs. welding current

شکل 6 فاصله بازوهای دندریتی اولیه برحسب جریان جوش‌کاری

هماهنگی را با فازهای بین‌فلزی Al_3Fe (در مجاورت لایه پوشش آلومینیم 1050) و Al_5Fe_2 (در نزدیکی فولاد St-12) دارد. نتایج تحقیقات دیگر نیز نشان می‌دهد که فازهای بین‌فلزی Al_3Fe و Al_5Fe_2 رایج‌ترین فازهای تشکیل‌شده در جوش‌کاری نامتشابه آلومینیم-فولاد هستند [17,9,8].

"شکل 8" نشان می‌دهد که ضخامت لایه ترکیبات بین‌فلزی با افزایش جریان جوش‌کاری افزایش یافته است. ضخامت لایه واکنشی (X) تحت فرآیند کنترل شده با نفوذ از معادله $X = K(t)^{1/2}$ پیروی می‌کند، K ثابت رشد، X ضخامت لایه ترکیبات بین‌فلزی و t زمان نفوذ است [21]. همان‌طور که مشخص است، واکنش تشکیل ترکیبات بین‌فلزی Al-Fe، یک واکنش نفوذی بین اتم‌های آهن و آلومینیم می‌باشد که به‌شدت به دما و زمان نفوذ وابسته است. از جمله متغیرهای موثر بر زمان نفوذ، میزان حرارت ورودی و سرعت جوش‌کاری است که می‌تواند رشد لایه ترکیبات بین‌فلزی را کنترل کند. با افزایش جریان جوش‌کاری، حرارت ورودی هم افزایش یافته که این عامل سبب افزایش دمای فصل‌مشترک لایه پوشش آلومینیم 1050 و فولاد St-12 شده است. افزایش دما سبب افزایش نفوذ درهم اتم‌های آهن و آلومینیم در دو طرف فصل‌مشترک شده و در نتیجه در جریان جوش‌کاری بالاتر، لایه ترکیبات بین‌فلزی ضخیم‌تری در فصل‌مشترک لایه پوشش آلومینیم 1050 و فولاد St-12 تشکیل شده است. به‌طورکلی، تشکیل لایه ترکیبات بین‌فلزی اثر مهمی بر کیفیت اتصال دارد. برخی از مطالعات قبلی گزارش کردند که یک لایه بین‌فلزی Al-Fe با ضخامت کمتر از 10 µm هیچ اثر مخربی بر استحکام اتصال ندارد. با این حال، هنگامی که ضخامت لایه بین‌فلزی بالاتر از 10 µm باشد، کیفیت اتصال به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد [23,22]. از سوی دیگر، برخی محققان دیگر مشاهده کردند که وجود لایه بین‌فلزی Al-Fe با ضخامت کمتر از 2 µm، هیچ تاثیر منفی بر کیفیت اتصال ندارد و حتی ممکن است آن را بهبود بخشد [25,24]. در این پژوهش، میانگین ضخامت لایه ترکیبات بین‌فلزی در بین 1.5 µm تا 3.5 µm متغیر بود. بنظر می‌رسد که تشکیل لایه ترکیبات بین‌فلزی با ضخامت کمتر از 3.5 µm اثر مخربی بر استحکام کششی اتصالات نداشته اشد. این ادعا در بخش 3-3 بررسی خواهد شد.

3-3- استحکام کششی جوش

در "شکل 9" میانگین استحکام کششی جوش‌های ایجاد شده با جریان‌های جوش‌کاری متفاوت رسم شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، استحکام کششی جوش‌ها با جریان جوش‌کاری رابطه خطی دارد و با افزایش جریان جوش‌کاری کاهش می‌یابد. در جریان جوش‌کاری 80 آمپر، میانگین استحکام کششی اتصال به 190 MPa رسیده است که در حدود 80٪ استحکام کششی فلز پایه آلیاژ آلومینیم 5052-H34 می‌باشد. در حین آزمون کشش-برش، در تمام نمونه‌های جوش‌کاری شده شکست از داخل فلز جوش صورت گرفت. نتایج نشان داد که در تمام جوش‌ها، ترک از محل ریشه جوش آغاز شده و با زاویه‌ای در حدود 70° نسبت به سطح لایه پوشش آلومینیم 1050 گسترش یافته است (شکل 10). ساختار دندریتی توسط فاصله بازوهای دندریتی اولیه

جدول 4 نتایج آنالیز EDS از ترکیبات بین‌فلزی

Table 4 EDS analysis results from the intermetallic compound

محل نقطه در شکل 7	ترکیب اندازه‌گیری شده (at. %) Al	Fe	ترکیب اسمی	ترکیب بین‌فلزی شناسایی شده
A	78	22	Al_3Fe (Al: 74.5-76.5)	Al_3Fe
B	73	27	Al_5Fe_2 (Al: 70-73)	Al_5Fe_2

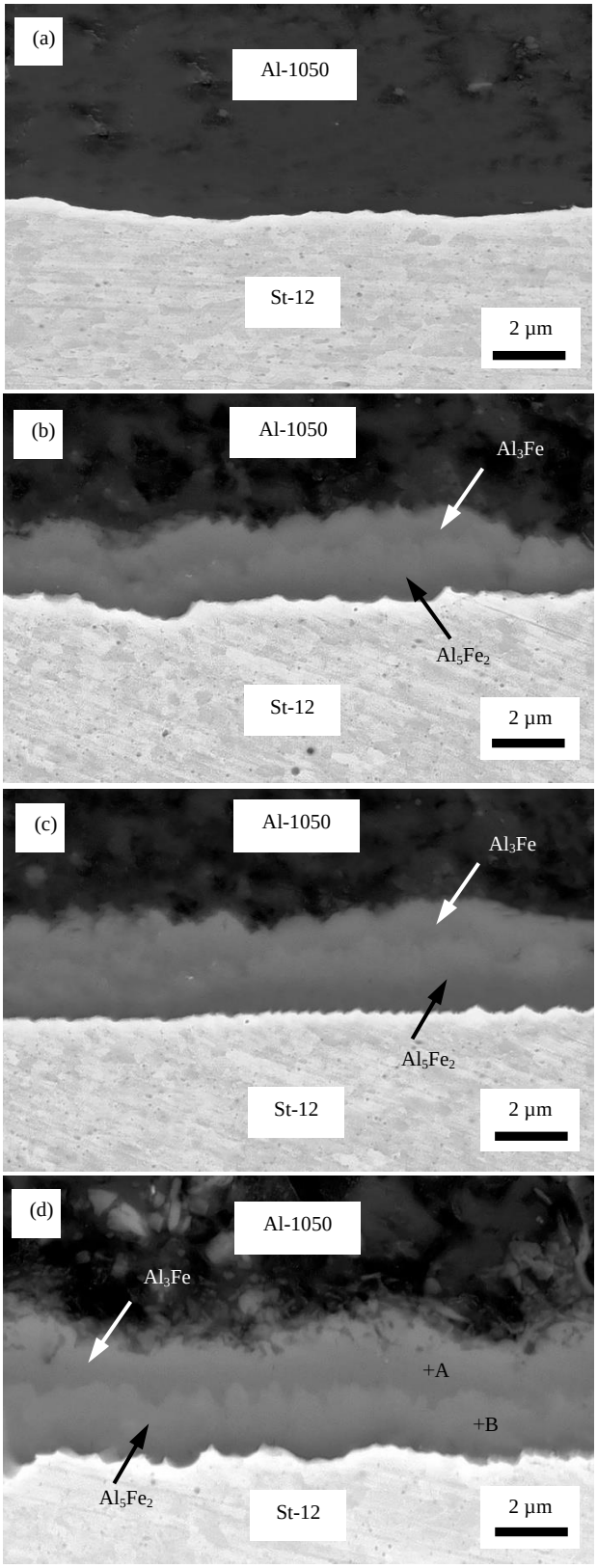

Fig. 7 SEM images from (a) the roll bonding interface of St-12/Al-1050 before welding and the reaction layer formed at the interface of St-12/Al-1050 with the welding current of (b) 80 A, (c) 100 A and (d) 120 A

شکل 7 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از (a) فصل‌مشترک اتصال نوردی St-12/Al-1050 قبل از جوش‌کاری و لایه واکنشی تشکیل شده در فصل مشترک St-12/Al-1050 با جریان جوش‌کاری (b) 80 A، (c) 100 A و (d) 120 A

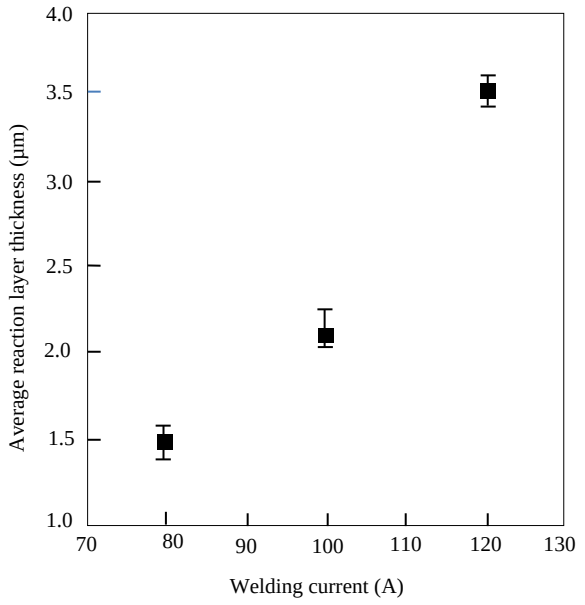

Fig. 8 Variation of the reaction layer thickness vs. the welding current

شکل 8 تغییرات ضخامت لایه واکنشی برحسب جریان جوش‌کاری

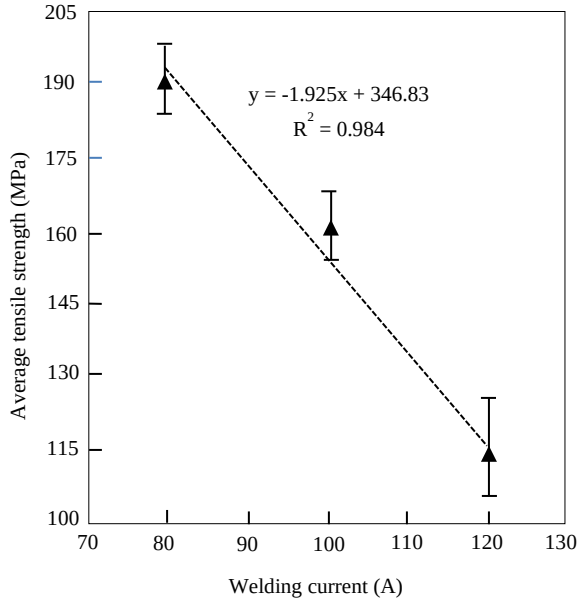

Fig. 9 Average tensile strength of the joints vs. welding current

شکل 9 میانگین استحکام کششی اتصالات برحسب جریان جوش‌کاری

و ثانویه و مورفولوژی آن مشخصه‌یابی می‌شود که تأثیر قابل‌توجهی در خواص مکانیکی دارد [20,19]. کاهش استحکام کششی اتصالات در اثر جریان جوش‌کاری را می‌توان با تغییرات ریزساختاری بوجود آمده در فلز جوش توضیح داد. استحکام کششی فلز جوش تحت تاثیر فاصله بازوهای دندریتی اولیه و یکنواختی توزیع یوتکتیک‌های Al-Si قرار دارد که این دو عامل به سرعت سرد شدن فلز جوش وابسته می‌باشند. نتایج بررسی‌های میکروسکوپی مسیر شکست نشان داد که ترک از داخل یوتکتیک‌های Al-Si فلز جوش گسترش پیدا کرده است (شکل 10-e). بنابراین از این نقطه‌نظر، استحکام جوش تحت تاثیر نحوه توزیع یوتکتیک‌های Al-Si می‌باشد. بررسی سطوح شکست نمونه‌های آزمون کشش در مطالعات قبلی نیز نشان داده است که

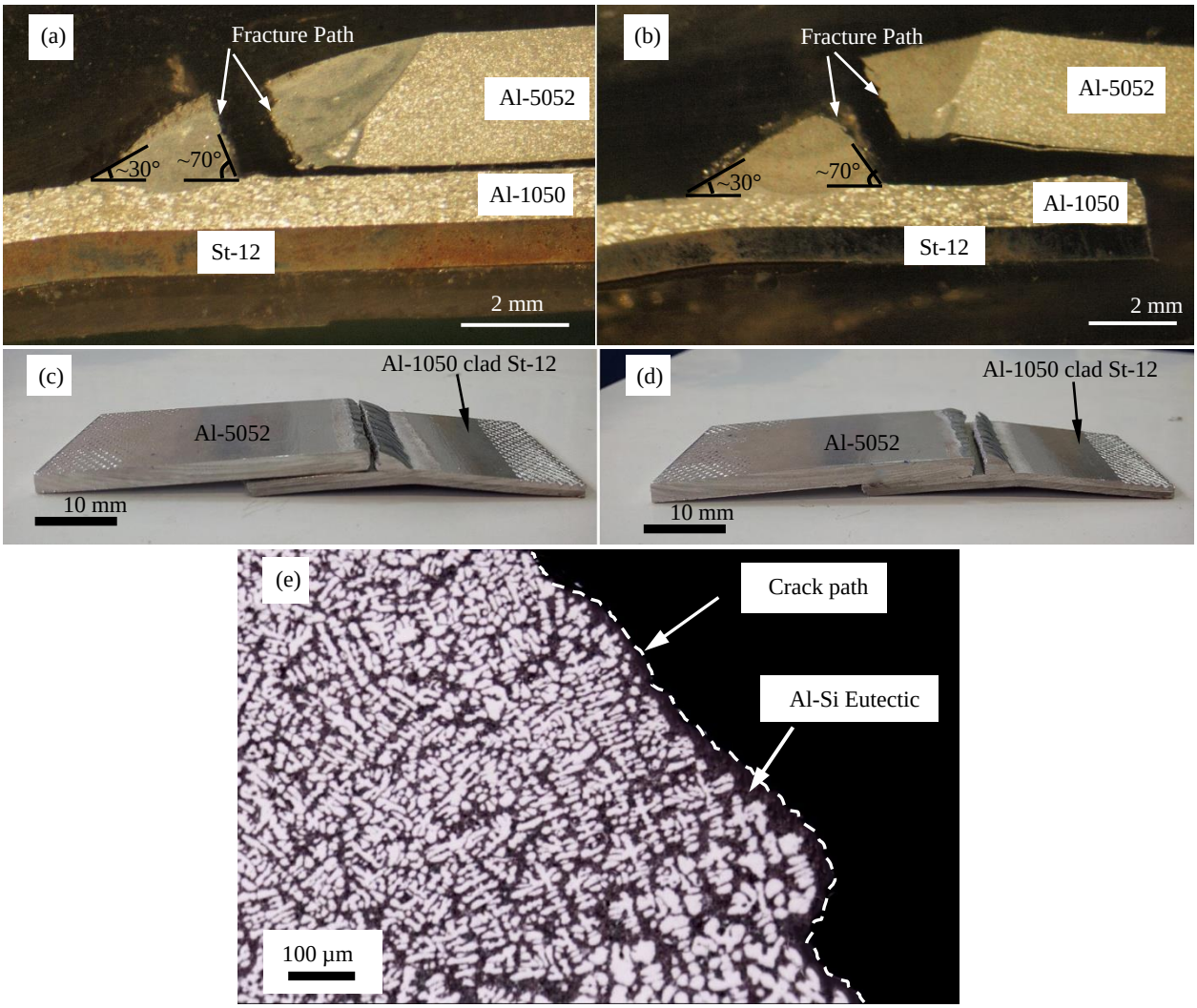

Fig. 10 Fracture path during shear-tensile test for the sample with the welding current of (a) 80 A and (b) 120 A. Stereograph from the sample after shear-tensile test with the welding current of (c) 80 A and (d) 120 A. (e) Microscopic image from crack propagation through Al-Si eutectics

شکل 10 مسیر شکست جوش در حین آزمون کشش-برش در نمونه با جریان جوش‌کاری (a) 80 A و (b) 120 A. استریوگراف از نمونه بعد از آزمون کشش-برش با جریان جوش‌کاری (c) 80 A و (d) 120 A. (e) تصویر میکروسکوپی گسترش ترک از یوتکتیک‌های Al-Si

فازهای یوتکتیک Al-Si نقش مهمی در استحکام کششی آلیاژ دارند [27,26]. یوتکتیک‌های Al-Si مسیر مناسبی برای رشد و گسترش ترک نسبت به دندریت‌های α-Al می‌باشند. در فلز جوش ایجاد شده با جریان جوش‌کاری بالاتر یعنی 120 آمپر، تجمع موضعی یوتکتیک‌های Al-Si به دلیل توزیع غیریکنواخت آن‌ها در زمینه، رشد ترک از داخل این فازها را تسهیل کرده و در نتیجه به نیروی کم‌تری برای شکست نیاز می‌باشد. اما در فلز جوش با جریان جوش‌کاری پایین‌تر یعنی 80 آمپر، یوتکتیک‌های Al-Si با توزیع یکنواخت در لابه‌لای بازوهای دندریت α-Al تشکیل شده‌اند و چون زمینه دندریتی α-Al نسبت به فازهای یوتکتیکی دارای انعطاف‌پذیری بیش‌تری است، پس ترک در هنگام رشد به راحتی گسترش پیدا نمی‌کند و نیروی شکست و به تبع آن استحکام کششی فلز جوش افزایش می‌یابد. همان گونه که در بخش 3-2 بحث شد، عدم شکست نمونه‌ها از فصل‌مشترک فولاد St-12 و آلومینیم 1050 در حین آزمون کشش-برش نشان می‌دهد که تشکیل ترکیبات بین‌فلزی با حداکثر ضخامت 3.5 µm اثر منفی بر استحکام اتصال بین این دو لایه نداشته است و بنابراین، شکست از داخل فلز جوش اتفاق افتاده است.

3-4- تجزیه و تحلیل تنش جوش

نتایج بررسی‌های شکست در حین آزمون کشش-برش نشان داد که در تمام جوش‌ها، مسیر شکست زاویه‌ای در حدود 70° نسبت به سطح لایه پوشش 1050 دارد. از آنجا که هیچ عیب قابل‌توجهی مانند حفره یا ترک در محل شکست وجود نداشت، بنظر می‌رسد تکرارپذیری زاویه شکست در تمام اتصالات تولید شده ناشی از شرایط تنشی باشد که در حین آزمون کشش-برش به جوش فیلت ساده اعمال می‌شود. از این نظر، جوش‌های فیلت تولید شده در مطالعه حاضر، مورد تجزیه و تحلیل تنش قرار گرفتند. در جوش‌های فیلت به دلیل پیچیدگی توزیع تنش در قسمت‌های مختلف به خصوص گلویی جوش، معیارهای گوناگونی در کدها و استانداردهای مختلف برای محاسبه تنش وارده بر جوش وجود دارد.

در این میان رایج‌ترین آن‌ها استاندارد AWS B4.0 [28] است که در این استاندارد تنش برشی (τ) در جوش فیلت ساده با اندازه ساق برابر مطابق با

معادله (2) محاسبه می‌شود:

$$\tau = \frac{F}{a \times L} \tag{2}$$

که a اندازه گلویی جوش در زاویه 45° از سطح افقی، F نیروی بارگذاری شده بر گلویی جوش و L اندازه کل طول جوش (تحمل کننده نیرو) است. در این استاندارد فرض شده است که شکست در زاویه 45° از سطح فلز پایه افقی و تحت تاثیر تنش برشی (τ) اتفاق می‌افتد.

با توجه به "شکل 4" مشخص شد که در این پژوهش، جوش‌های فیلت دارای اندازه ساق‌های نابرابر هستند. "شکل 11-a" به‌صورت شماتیکی، یک جوش فیلت با اندازه ساق‌های نابرابر ($S \neq H$) را نشان می‌دهد $\sigma(\theta)$ و $\tau(\theta)$ به‌ترتیب، اجزای نرمال و برشی تنش ناشی از نیروی F در یک صفحه با زاویه θ از سطح افقی تعریف می‌شوند. اندازه صفحه در یک زاویه θ در داخل جوش فیلت (a_θ) می تواند از معادله (3) محاسبه شود:

$$a_\theta = \frac{S \sin \alpha}{\sin(\alpha + \theta)} \tag{3}$$

بنابراین، اجزای برشی و نرمال تنش روی صفحه با زاویه θ به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\tau(\theta) = \frac{F \cos \theta}{a_\theta L} = \frac{F}{SL} \frac{\cos \theta \sin(\alpha + \theta)}{\sin \alpha} \tag{4}$$

$$\sigma(\theta) = \frac{F \sin \theta}{a_\theta L} = \frac{F}{SL} \frac{\sin \theta \sin(\alpha + \theta)}{\sin \alpha} \tag{5}$$

به‌منظور برقراری ارتباط بین استحکام اتصالات با اجزای تنش اعمال شده، یعنی تنش‌های نرمال و برشی، نیاز به تعریف تنش موثر (σ_{eff}) به عنوان تابعی از اجزای تنش است. معادلات (6) تا (8) سه تعریف برای تنش موثر ارائه می‌دهند [30,29]:

$$\sigma_{eff} = \tau(\theta) \tag{6}$$

$$\sigma_{eff} = \sigma(\theta) \tag{7}$$

$$\sigma_{eff} = \sqrt{\sigma^2(\theta) + 3\tau^2(\theta)} = \frac{F}{SL} \frac{\sin(\alpha + \theta)}{\sin \alpha} \sqrt{\sin^2 \theta + 3 \cos^2 \theta} \tag{8}$$

با توجه به زاویه α = ~30° در این پژوهش (زاویه ترشوندگی در شکل 4)، تنش نرمال حداکثر (σ_m)، تنش برشی حداکثر (τ_m) و تنش موثر فون میزز حداکثر (فون میزز)σ_m به ترتیب در θ_{max} = ~70°، 30° و 37° اتفاق می‌افتد که به ترتیب در "شکل‌های 11-b تا 11-d" مشخص شده‌اند. همان‌طور که قبلا ذکر شد، مسیر شکست در تمام جوش ها، در حدود 70° نسبت به سطح لایه پوشش Al-1050 است که نزدیک به زاویه‌ای است که تنش نرمال به حداکثر مقدار خود می‌رسد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که شکست عمدتا تحت تاثیر تنش نرمال حداکثر (σ_m) در جوش قرار دارد.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش، ورق‌های آلیاژ آلومینیم 5052 به ورق‌های فولادی St-12 روکش‌شده با آلومینیم 1050 با طرح اتصال لبه روی هم به روش فرآیند قوسی الکترود تنگستنی-گاز و با استفاده از فلز پرکننده ER-4047 متصل شدند. نتایج به‌دست آمده به‌صورت زیر می‌باشند:

1. اتصالاتی کاملا سالم و بدون هیچ‌گونه عیبی مانند ترک و حفره تولید شدند.

2. در اثر افزایش جریان جوش‌کاری، فاصله بازوهای اولیه دندریتی α-Al افزایش یافته و توزیع فازهای یوتکتیک‌های Al-Si در زمینه غیریکنواخت شده است. زیرا در اثر افزایش جریان جوش‌کاری، حرارت ورودی افزایش یافته است و منجر به کاهش سرعت سردشدن و افزایش زمان انجماد فلز جوش شده است.

3. در فصل‌مشترک فولاد St-12 با پوشش آلومینیم 1050 لایه‌ی ترکیبات بین‌فلزی آهن-آلومینیم با ضخامت کم‌تر از 3.5 µm~ تشکیل شده که اثر منفی بر استحکام اتصال نداشته است. لایه ترکیبات بین‌فلزی Al-Fe شکل گرفته شامل دو زیرلایه متفاوت بود: فاز Al_5Fe_2 در نزدیکی فولاد St-12 و فاز Al_3Fe در مجاورت لایه پوشش آلومینیم 1050.

4. استحکام کششی جوش‌ها با جریان جوش‌کاری یک رابطه خطی داشت و با افزایش جریان جوش‌کاری کاهش یافت. با افزایش جریان جوش‌کاری، فاصله بازوهای اولیه دندریتی α-Al افزایش یافته و توزیع فازهای یوتکتیک‌های Al-Si در زمینه غیریکنواخت شده است. در نتیجه رشد ترک از داخل ترکیبات ترد یوتکتیک Al-Si تسهیل شده و نیروی شکست کاهش می‌یابد. استحکام کششی جوش در کمترین شدت جریان جوش‌کاری (80 A)

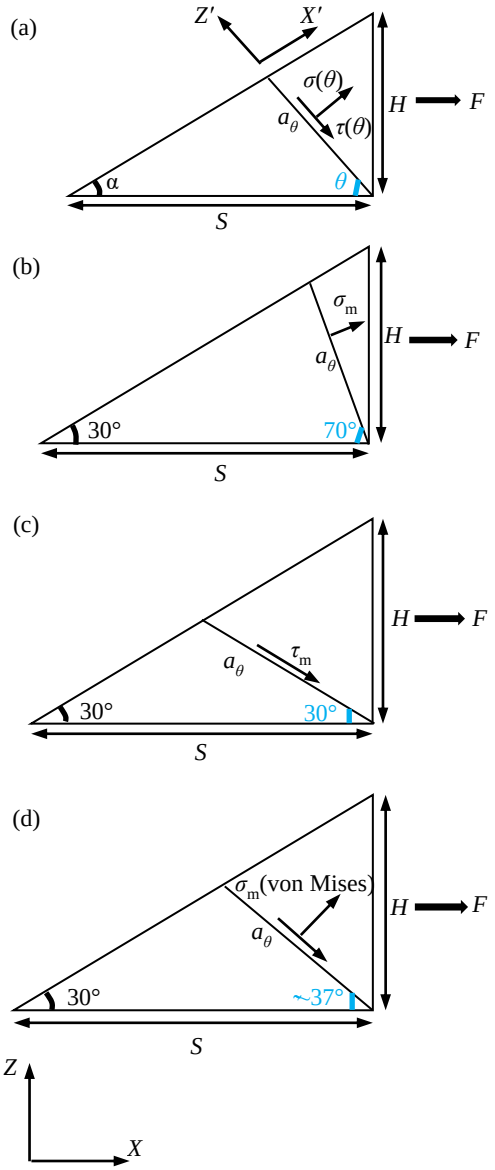

Fig. 11 (a) Stress decomposition in a fillet weld with unequal leg size, (b) maximum normal stress, (c) maximum shear stress and (d) maximum von Mises effective stress

شکل 11 (a) توزیع تنش در یک جوش فیلت با اندازه ساق نابرابر، (b) حداکثر

تنش نرمال، (c) حداکثر تنش برشی و (d) حداکثر تنش موثر فون میزز

به 190 MPa~ رسید که 80٪~ استحکام کششی فلز پایه آلومینیم H34-5052 می‌باشد.

5.شکست همه نمونه‌ها درحین آزمون کشش-برش از داخل فلز جوش و با زاویه °70 نسبت به سطح لایه پوشش آلومینیم 1050 اتفاق افتاد. نتایج تجزیه و تحلیل شکست در جوش فیلت ساده با اندازه ساق نابرابر نشان داد که شکست جوش‌ها اساسا با جزء حداکثر تنش نرمال از تنش بوجود آمده در حین آزمون کشش-برش کنترل می‌شود.

5- مراجع

[1] M. Elyasi, H. Aghajani Derazkola, M. Hosseinzadeh, Effects of friction stir welding parameters on mechanical quality of AA1100 aluminum alloy to A441 AISI steel joint, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 379-390, 2015. (in Persianفارسی)

[2] M. Zarooni, R. Eslami Farsani, An Experimental study of joining aluminum to galvanized and plain carbon steels using the welding-brazing hybrid method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 249-259, 2015. (in Persianفارسی)

[3] S. Nourouzi, M. Shakeri, M. Habibnia, Frictions stir welding of dissimilar metal Al 5050 Aluminum alloy to AISI304 stainless steel, Modares Mechanical Engineering, Vol. 12, No. 6, pp. 95-103, 2013. (in Persian فارسی)

[4] A. Das, M. Shome, S.F. Goecke, A. De, Joining of aluminium alloy and galvanized steel using a controlled gas metal arc process, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 27, pp. 179-187, 2017.

[5] J. M. Piccini, H. G. Svoboda, Tool geometry optimization in friction stir spot welding of Al-steel joints, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 26, pp. 142-154, 2017.

[6] H. He, C. Yang, S. Lin, C. Fan, Z. Chen, Z. Chen, Flux modification for AC-TIG braze welding of aluminium to stainless steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 19, No. 6, pp. 527-533, 2014 .

[7] H. Dong, L. Yang, C. Dong, S. Kou, Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 534, pp. 424-435, 2012.

[8] S. B. Lin, J. L. Song, C. L. Yang, G. C. Ma, Metallurgical and mechanical investigations of aluminium-steel butt joint made by tungsten inert gas welding–brazing, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 14, No. 7, pp. 636-639, 2009.

[9] S. Madhavan, M. Kamaraj, L. Vijayaraghavan, Microstructure and mechanical properties of cold metal transfer welded aluminium/dual phase steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 21, No. 3, pp. 194-200, 2016.

[10] A. Macwan, A. Kumar, D. L. Chen, Ultrasonic spot welded 6111-T4 aluminum alloy to galvanized high-strength low-alloy steel: Microstructure and mechanical properties, *Materials & Design*, Vol. 113, pp. 284-296, 2017.

[11] W. Ratanathavorn, A. Melander, Influence of zinc on intermetallic compounds formed in friction stir welding of AA5754 aluminium alloy to galvanised ultra-high strength steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 22, No. 8, pp. 673-680, 2017.

[12] M. Gatzen, T. Radel, C. Thomy, F. Vollertsen, The role of zinc layer during wetting of aluminium on zinc-coated steel in laser brazing and welding, *Physics Procedia*, Vol. 56, pp. 730-739, 2014.

[13] G. Sierra, P. Peyre, F. Deschaux Beaume, D. Stuart, G. Fras, Galvanised steel to aluminium joining by laser and GTAW processes, *Materials Characterization*, Vol. 59, No. 12, pp. 1705-1715, 2008.

[14] H. Dong, W. Hu, Y. Duan, X. Wang, C. Dong, Dissimilar metal joining of aluminum alloy to galvanized steel with Al–Si, Al–Cu, Al–Si–Cu and Zn–Al filler wires, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 2, pp. 458-464, 2012.

[15] M. Movahedi, A. H. Kokabi, S. M. Seyed Reihani, Investigation on friction stir lap welding of aluminium to aluminium clad steel sheets, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 17, No. 3, pp. 231-236, 2012.

[16] M. Movahedi, A. H. Kokabi, S. M. Seyed Reihani, Investigation on the bond strength of Al-1100/St-12 roll bonded sheets, optimization and characterization, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 6, pp. 3143-3149, 2011.

[17] S. Madhavan, M. Kamaraj, L. Vijayaraghavan, K. Srinivasa Rao, Microstructure and mechanical properties of aluminium/steel dissimilar weldments: effect of heat input, *Materials Science and Technology*, Vol. 33, No. 2, pp. 200-209, 2017.

[18] S. H. Z. Xue, D. Zuo, J. Shen, Correlation between process parameters and primary dendrite arm spacing in laser welding of Cu and Al, *Transactions of Tianjin University*, Vol. 20, No. 5, pp. 315–321, 2014.

[19] W. R. Osorio, P. R. Goulart, A. Garcia, G. A. Santos, C. M. Neto, Effect of dendritic arm spacing on mechanical properties and corrosion resistance of Al 9 Wt Pct Si and Zn 27 Wt Pct Al alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 37, No. 8, pp. 2525-2538, 2006.

[20] P. R. Goulart, J. E. Spinelli, W. R. Osório, A. Garcia, Mechanical properties as a function of microstructure and solidification thermal variables of Al–Si castings, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 421, No. 1, pp. 245-253, 2006 .

[21] C. Dharmendra, K. P. Rao, J. Wilden, S. Reich, Study on laser welding–brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with a zinc based filler, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 3, pp. 1497-1503, 2011.

[22] C. Y. Lee, D. H. Choi, Y. M. Yeon, S. B. Jung, Dissimilar friction stir spot welding of low carbon steel and Al–Mg alloy by formation of IMCs, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 14, No. 3, pp. 216-220, 2009.

[23] H. T. Zhang, J. C. Feng, P. He, H. Hackl, Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminium–zinc-coated steel joints made by a modified metal inert gas welding–brazing process, *Materials Characterization*, Vol. 58, No. 7, pp. 588-592, 2007.

[24] M. Movahedi, A. H. Kokabi, S. M. Seyed Reihani, W. J. Cheng, C. J. Wang, Effect of annealing treatment on joint strength of aluminum/steel friction stir lap weld, *Materials & Design*, Vol. 44, pp. 487-492, 2013.

[25] M. Movahedi, A. H. Kokabi, S. M. S. Reihani, H. Najafi, Effect of tool travel and rotation speeds on weld zone defects and joint strength of aluminium steel lap joints made by friction stir welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 17, No. 2, pp. 162-167, 2012.

[26] Q. G. Wang, Microstructural effects on the tensile and fracture behavior of aluminum casting alloys A356/357, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 34, No. 12, pp. 2887-2899, 2003.

[27] S. K. Shaha, F. Czerwinski, W. Kasprzak, J. Friedman, D. L. Chen, Microstructure and mechanical properties of Al–Si cast alloy with additions of Zr–V–Ti, *Materials & Design*, Vol. 83, pp. 801-812, 2015.

[28] *AWS B4.0 Standard methods for mechanical testing of welds*, 8th Edition, pp. 13-14, American National Standard, 2016.

[29] H. Lu, P. Dong, S. Boppudi, Strength analysis of fillet welds under longitudinal and transverse shear conditions, *Marine Structures*, Vol. 43, pp. 87-106, 2015.

[30] C. Nie, P. Dong, A traction stress based shear strength definition for fillet welds, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 47, No. 8, pp. 562-575, 2012.