



## ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال لبه روی هم آلومینیم به فولاد روکش شده با آلومینیم با فرآیند جوش کاری قوسی الکتروود تنگستنی-گاز

عباس حسن‌نیا<sup>1</sup> و مجتبی موحدی<sup>2\*</sup>

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 روکش شده 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 جوش کاری قوسی الکتروود تنگستنی-گاز (GTAW) با طرح اتصال لبه روی هم در سه جریان جوش کاری 80، 100 و 120 آمپر با استفاده از فلز پرکننده ER-4047 (Al-Si) متصل شدند. اثر جریان جوش کاری 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  $Al_3Fe$  و  $Al_5Fe_2$  در فصل مشترک فلز پایه فولاد St-12 با لایه پوشش آلومینیم 1050 در زیر محل جوش به‌صورت پیوسته تشکیل شده است. حداکثر میانگین ضخامت لایه‌ی واکنشی  $3.5 \mu m$  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 جوش کاری، استحکام کششی اتصال به‌صورت تقریباً خطی کاهش می‌یابد و فاصله بازوهای اولیه دندریتی  $\alpha$ -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  $\sim 80\%$  استحکام کششی فلز پایه آلیاژ آلومینیم 5052-H34 می‌باشد. در حین آزمون کشش-برش شکست همه نمونه‌ها با زاویه  $70^\circ$  از سطح آلومینیم 1050 گسترش یافت. تجزیه و تحلیل تنش در جوش نشان داد که شکست در جوش عمدتاً 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  $\sim 3.5 \mu m$ . 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  $\alpha$ -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  $\sim 190$  MPa, i.e.  $\sim 80\%$  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  $\sim 70^\circ$  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

باعث بهبود راندمان سوخت و کنترل آلودگی‌های زیست‌محیطی با کاهش وزن سازه می‌شوند. بنابراین، بررسی و بهبود اتصالات فلزات نامشابه فولاد و آلومینیم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اتصال مستقیم آلیاژ آلومینیم به

اتصال نامشابه آلیاژهای آلومینیم به فولاد به‌دلیل کاربرد آن در صنایع مختلف حمل و نقل مانند خودروسازی و هوافضا مورد توجه می‌باشد. این اتصالات

### 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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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

به منظور ایجاد اتصال بین فولاد و آلومینیوم، روش‌های مختلف جوش کاری حالت جامد از قبیل جوش کاری اصطکاکی تلامپی، جوش کاری اصطکاکی، جوش کاری نفوذی، جوش کاری انفجاری و جوش کاری اصطکاکی تلامپی نقطه‌ای بررسی شده است. اگرچه با جوش کاری حالت جامد می‌توان اتصال فولاد-آلومینیوم با استحکام مناسب ایجاد کرد، اما این فرآیندها دو محدودیت بزرگ دارند: محدودیت هندسه قطعات و نیاز به تجهیزات گران قیمت [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 آلومینیوم و فولاد کنترل نمود [10]. در این میان، بیشتر از فولادهای روکش شده با Zn استفاده می‌شود. راتانائورن و ملاندر [11] در تحقیق خود اثر Zn بر اتصال آلیاژ آلومینیوم 5754 به فولاد گالوانیزه با روش جوش کاری اصطکاکی تلامپی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که اتصالات با لایه گالوانیزه نسبت به فولاد بدون پوشش دارای استحکام بیشتری هستند، اما در حین جوش کاری، فاز مایع Zn تشکیل شده و منجر به ایجاد حفرات در اتصال شده است. گزنن و همکاران [12] نشان دادند که در جوش کاری 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 جوش کاری پرتو لیزر و فرآیند جوش کاری قوسی الکتروکود تنگستنی-گاز (GTAW)، حضور حفرات ناشی از Zn در منطقه ذوب منجر به کاهش شدید استحکام شکست جوش می‌شود. بنابراین، به علت پایین بودن نقطه تبخیر فلز Zn و در نتیجه تشکیل حفره در منطقه فلز جوش، استفاده از این فولادها به حرارت‌های ورودی پایین در جوش کاری ذوبی محدود شده است [14]. یکی دیگر از روش‌های جایگزین، می‌تواند استفاده از ورق‌های فولادی روکش شده با آلومینیوم بجای ورق‌های فولادی پوشش داده شده با Zn باشد. در این ورق‌ها، آلومینیوم معمولاً به روش جوش کاری نوردی بر روی سطح ورق‌های فولادی روکش می‌شود. با توجه به این‌که نقطه ذوب و تبخیر آلومینیوم بیشتر از Zn است، بنابراین دمای سرویس‌دهی در اتصالات ایجاد شده با ورق‌های فولادی روکش شده با آلومینیوم بیشتر از اتصالات ایجاد شده با ورق‌های پوشش داده شده با Zn می‌باشد [15].

هدف پژوهش حاضر، اتصال لبه روی هم آلیاژ آلومینیوم 5052 به فولاد پوشش داده شده با آلومینیوم خالص تجاری با استفاده از روش جوش کاری ذوبی قوسی الکتروکود تنگستنی-گاز است که یک روش جوش کاری بسیار متداول و با قابلیت انعطاف‌پذیری بالا می‌باشد. از فلز پرکننده ER-4047 برای جوش کاری ورق‌ها استفاده شد. اثرات جریان جوش کاری بر تشکیل لایه‌ی ترکیبات بین‌فلزی در فصل مشترک آلومینیوم 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، آلومینیوم 1050

با ضخامت اولیه 2 mm و آلیاژ آلومینیوم H34-5052 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 آلومینیوم 1050 با استفاده از فرآیند جوش کاری نوردی و در یک پاس تولید شدند. در مرحله اول ورق‌های آلومینیوم 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 به منظور حذف اکسیدها، سطح ورق‌های St-12 با اسید هیدروکلریک (HCl) اسیدشویی و بعد از آن سطح ورق‌های آلومینیوم 1050 و فولاد St-12 در استون چربی‌زدایی و سپس با برس سیمی از جنس فولاد زنگ‌نزن برس کاری شدند. در ادامه، فرآیند جوش کاری 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 روکش شده 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) عرض اتصال / نیروی لایه‌کنی = استحکام لایه‌کنی

سپس، ورق‌های آلیاژ آلومینیوم 5052 به ورق‌های فولادی St-12 روکش شده با آلومینیوم 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 آلومینیوم 1050 در حین جوش کاری جلوگیری می‌شود. شمایک موقعیت مشعل جوش کاری و فلز پرکننده در "شکل 2" ارائه شده است. جوش کاری در سه سطح جریان متفاوت 80، 100 و 120 آمپر انجام شد. در جدول 3 محدوده متغیرهای ثابت فرآیند GTAW آورده شده است. جوش کاری نمونه‌ها به صورت دستی انجام شد و سرعت جوش کاری همه نمونه‌ها تقریباً 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 جوش کاری 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 طیفسنجی 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.

هدف پژوهش حاضر، اتصال لبه روی هم آلیاژ آلومینیوم 5052 به فولاد پوشش داده شده با آلومینیوم خالص تجاری با استفاده از روش جوش کاری ذوبی قوسی الکتروکود تنگستنی-گاز است که یک روش جوش کاری بسیار متداول و با قابلیت انعطاف‌پذیری بالا می‌باشد. از فلز پرکننده ER-4047 برای جوش کاری ورق‌ها استفاده شد. اثرات جریان جوش کاری بر تشکیل لایه‌ی ترکیبات بین‌فلزی در فصل مشترک آلومینیوم 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، آلومینیوم 1050

جدول 1 ترکیب شیمیایی و استحکام فلزات پایه و فلز پرکننده

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

جدول 2 استحکام لایه کنی ورق های St-12/Al-1050

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

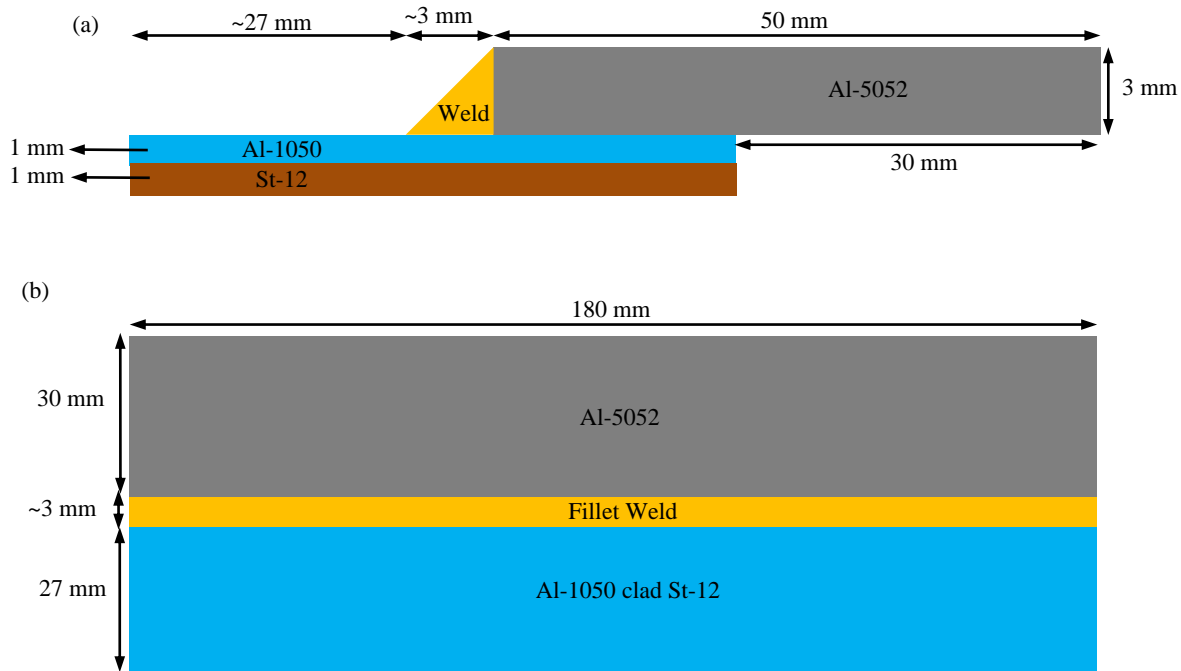


Fig. 1 Lap joint configuration and dimensions of the samples, (a) cross section and (b) top view

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

متغیر	واحد	مقدار
ولتاژ	V	12
جریان گاز آرگون	l.min <sup>-1</sup>	8
قطر الکتروود تنگستنی	mm	2.4
سرعت جوش کاری	mm/min	100-110

همان گونه که دیده می شود، ورق Al-5052 در بالا و ورق فولاد St-12 در پایین قرار گرفته است. طرح اتصال لبه روی هم و جوش ایجاد شده نیز به صورت فیلت ساده است. نکته قابل ذکر در مورد نمای پشت جوش این است که در اثر حرارت جوش کاری، ورق St-12 در زیر محل جوش ذوب نشده است. تمام نمونه های جوش داده شده از هر دو طرف به صورت چشمی بازرسی شدند. در ورق های متصل شده، هیچ گونه عیب قابل مشاهده ای از قبیل ترک در داخل جوش، حفره و بریدگی کناره جوش مشاهده نشد. در "شکل 4" نیز ماکروساختار مقطع عرضی جوش ارائه شده

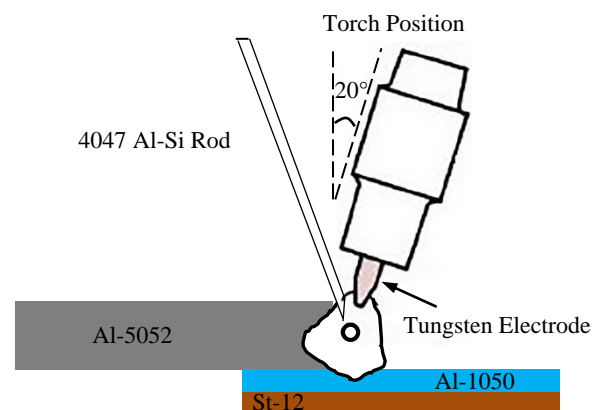


Fig. 2 Schematic of GTAW process

شکل 2 طرحواره فرآیند GTAW

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- ماکروساختار جوش

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

### 2-3- ریزساختار فلز جوش و لایه واکنشی بین فلزی

"شکل 5" تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فلز جوش در کمترین و بیشترین جریان جوش کاری را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، فلز جوش در تمام جوش‌ها شامل دندریتهای محلول جامد  $\alpha$ -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  $\alpha$ -Al در فلز جوش تشکیل شده است. همان‌گونه که از "شکل 4" مشخص است، در حین جوش کاری، 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  $\alpha$ -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 جوش کاری مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در اثر افزایش جریان جوش کاری، فاصله بازوهای دندریتی اولیه  $\alpha$ -Al افزایش پیدا کرده است. میانگین فاصله بازوهای اولیه دندریتی محلول جامد  $\alpha$ -Al در جریان جوش کاری 80 آمپر برابر  $40 \mu\text{m}$  بود در حالی که در جریان جوش کاری 120 آمپر به مقدار  $80 \mu\text{m}$  رسیده است. فاصله بازوهای دندریتی اولیه تشکیل شده در حین جوش کاری به عوامل مختلفی از قبیل دما و زمان جوش کاری، سرعت سرد شدن جوش و زمان انجماد وابسته است که این عوامل تحت تاثیر پارامترهای جوش کاری مانند جریان جوش کاری و سرعت جوش کاری قرار می‌گیرند [18,17]. افزایش جریان جوش کاری منجر به افزایش حرارت ورودی در جوش کاری می‌شود؛ بنابراین، در جریان جوش کاری 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 بر این، مشاهده می‌شود که با افزایش جریان جوش کاری و فاصله بین بازوهای اولیه دندریتهای، 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 فصل‌مشارک اتصال نوردی بعد از عملیات حرارتی و لایه ترکیبات بین‌فلزی Al-Fe در جریان‌های جوش کاری متفاوت در "شکل 7" نشان داده شده است. "شکل 7-a" نشان می‌دهد که در حین عملیات حرارتی در دمای  $450^\circ\text{C}$  به مدت 90 دقیقه، در فصل‌مشارک اتصال نوردی ترکیبات بین‌فلزی Al-Fe تشکیل نشده است. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، در حین جوش کاری، 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 جوش کاری، لایه ترکیبات بین‌فلزی Al-Fe در زیر محل جوش و در فصل‌مشارک 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

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 میکروسکوپی جوش‌ها مشخص شد که در حین جوش کاری، ورق آلیاژ آلومینیم 5052 ذوب شده اما هیچ‌گونه ذوب ظاهری در ورق فولاد St-12 مشاهده نشد. بنابراین، در حین جوش کاری فلز پایه آلیاژ آلومینیم 5052 و فلز پایه آلومینیم 1050 به علت حرارت ورودی جوش کاری ذوب و با مذاب فلز پرکننده مخلوط شده اند و عملاً اتصال بین دو آلومینیم Al-1050 و Al-5052 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  $30^\circ$  است.

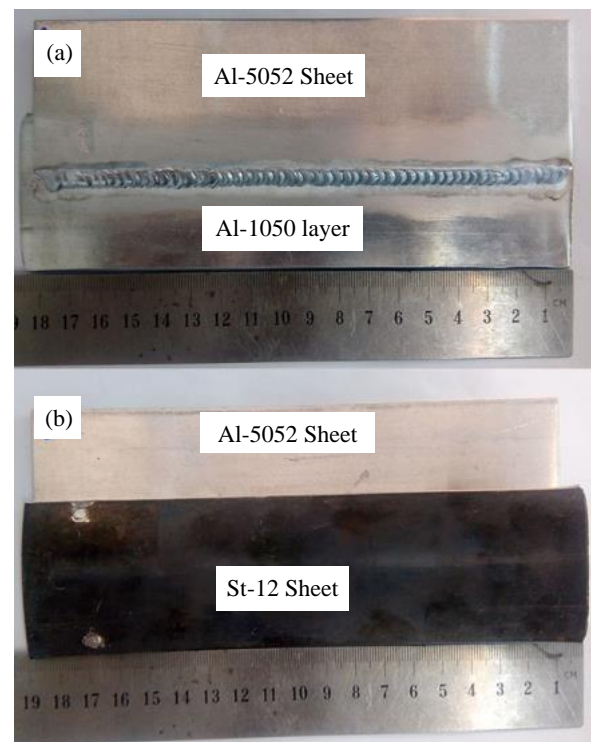


Fig. 3 (a) Front view and (b) back view of the joint

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

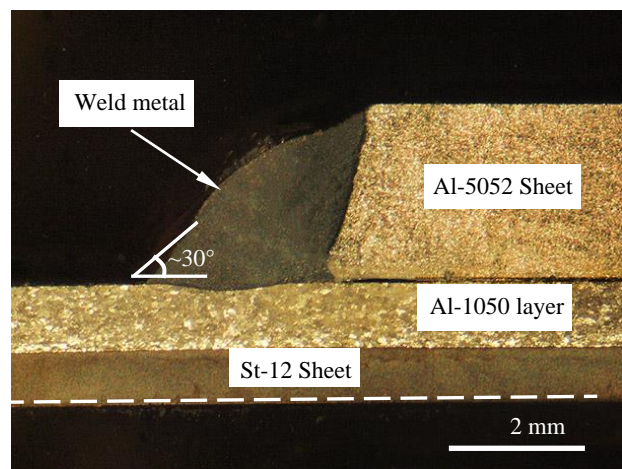


Fig. 4 Macrostructure of the lap joint cross-section

شکل 4 ماکروساختار مقطع عرضی اتصال لپه روی هم

نشان می‌دهد که فازهای بین فلزی  $Al_3Fe$  و  $Al_5Fe_2$  رایج‌ترین فازهای تشکیل شده در جوش کاری نامتشابه آلومینیم-فولاد هستند [17,9,8].

"شکل 8" نشان می‌دهد که ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی با افزایش جریان جوش کاری 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 بین فلزی و  $t$  زمان نفوذ است [21]. همان‌طور که مشخص است، واکنش تشکیل ترکیبات بین فلزی  $Al-Fe$ ، یک واکنش نفوذی بین اتم‌های آهن و آلومینیم می‌باشد که به شدت به دما و زمان نفوذ وابسته است. از جمله متغیرهای موثر بر زمان نفوذ، میزان حرارت ورودی و سرعت جوش کاری است که می‌تواند رشد لایه ترکیبات بین فلزی را کنترل کند. با افزایش جریان جوش کاری، حرارت ورودی هم افزایش یافته که این عامل سبب افزایش دمای فصل مشترک لایه پوشش آلومینیم 1050 و فولاد St-12 شده است. افزایش دما سبب افزایش نفوذ درهم اتم‌های آهن و آلومینیم در دو طرف فصل مشترک شده و در نتیجه در جریان جوش کاری بالاتر، لایه ترکیبات بین فلزی ضخیم‌تری در فصل مشترک لایه پوشش آلومینیم 1050 و فولاد St-12 تشکیل شده است. به‌طور کلی، تشکیل لایه ترکیبات بین فلزی اثر مهمی بر کیفیت اتصال دارد. برخی از مطالعات قبلی گزارش کردند که یک لایه بین فلزی  $Al-Fe$  با ضخامت کمتر از  $10 \mu m$  هیچ اثر مخربی بر استحکام اتصال ندارد. با این حال، هنگامی که ضخامت لایه بین فلزی بالاتر از  $10 \mu m$  باشد، کیفیت اتصال به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد [23,22]. از سوی دیگر، برخی محققان دیگر مشاهده کردند که وجود لایه بین فلزی  $Al-Fe$  با ضخامت کمتر از  $2 \mu m$ ، هیچ تاثیر منفی بر کیفیت اتصال ندارد و حتی ممکن است آن را بهبود بخشد [25,24]. در این پژوهش، میانگین ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی در بین  $1.5 \mu m$  تا  $3.5 \mu m$  متغیر بود. بنظر می‌رسد که تشکیل لایه ترکیبات بین فلزی با ضخامت کمتر از  $3.5 \mu m$  اثر مخربی بر استحکام کششی اتصالات نداشته‌اند. 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 جوش کاری متفاوت رسم شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، استحکام کششی جوش‌ها با جریان جوش کاری رابطه خطی دارد و با افزایش جریان جوش کاری کاهش می‌یابد. در جریان جوش کاری 80 آمپر، میانگین استحکام کششی اتصال به 190 MPa رسیده است که در حدود 80٪ استحکام کششی فلز پایه الیاز آلومینیم 5052-H34 می‌باشد. در حین آزمون کشش-برش، در تمام نمونه‌های جوش کاری 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  $70^\circ$  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 بین فلزی

محل نقطه در شکل 7	ترکیب شیمیایی (at. %)	
	ترکیب اسمی	ترکیب اندازه‌گیری شده
A	$Al_3Fe$	$Al_3Fe$ (Al: 74.5-76.5)
	$Al_5Fe_2$	$Al_5Fe_2$ (Al: 70-73)

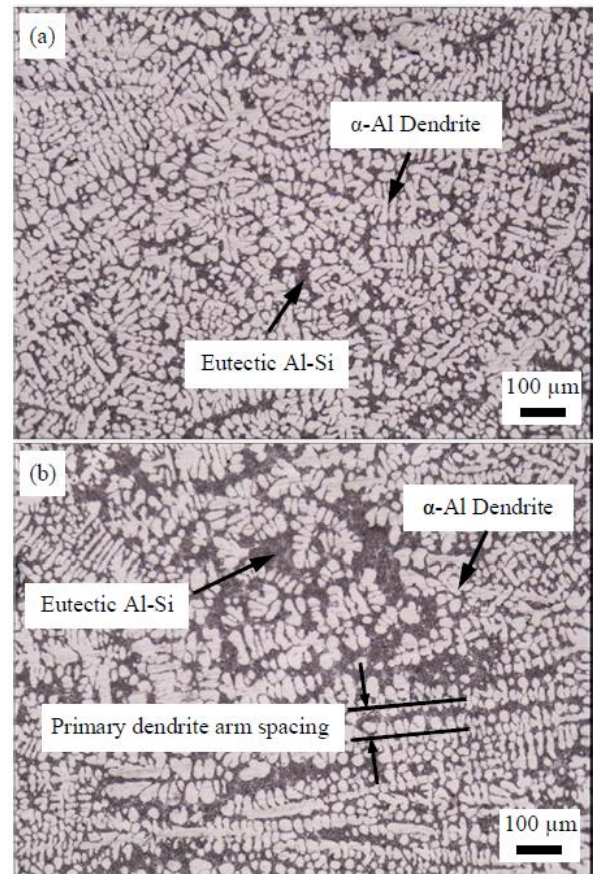


Fig. 5 Microstructure of the weld metal with the welding current of (a) 80 A (b) and 120 A

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

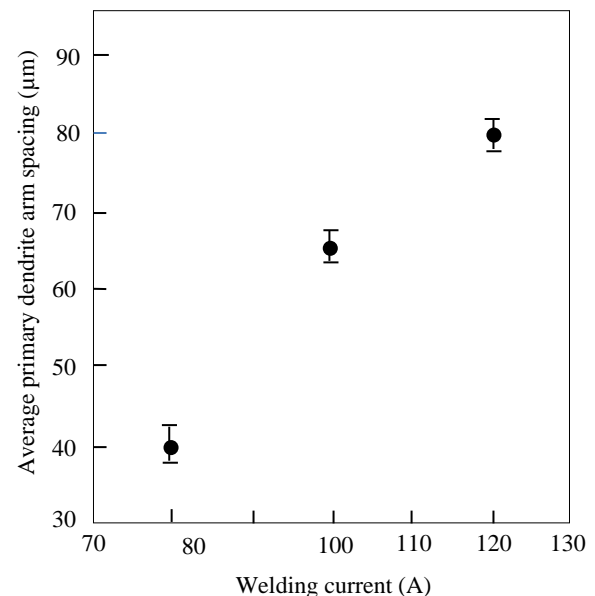


Fig. 6 Primary dendrite arm spacing vs. welding current

شکل 6 فاصله بازوهای دندریتی اولیه برحسب جریان جوش کاری

همانگی را با فازهای بین فلزی  $Al_3Fe$  (در مجاورت لایه پوشش آلومینیم 1050) و  $Al_5Fe_2$  (در نزدیکی فولاد St-12) دارد. نتایج تحقیقات دیگر نیز

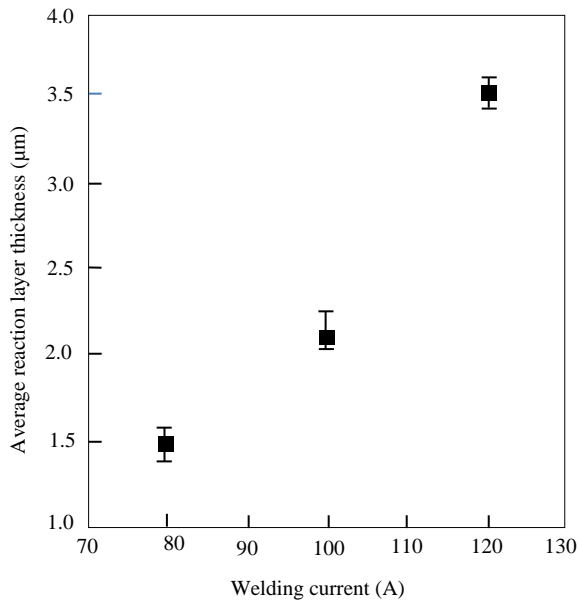


Fig. 8 Variation of the reaction layer thickness vs. the welding current

شکل 8 تغییرات ضخامت لایه واکنشی برحسب جریان جوش کاری

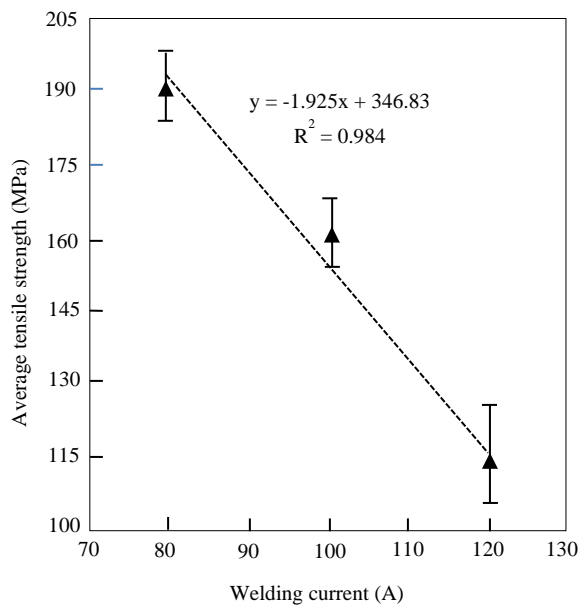


Fig. 9 Average tensile strength of the joints vs. welding current

شکل 9 میانگین استحکام کششی اتصالات برحسب جریان جوش کاری و ثانویه و مورفولوژی آن مشخصه‌یابی می‌شود که تأثیر قابل توجهی در خواص مکانیکی دارد [20,19]. کاهش استحکام کششی اتصالات در اثر جریان جوش کاری را می‌توان با تغییرات ریزساختاری بوجود آمده در فلز جوش توضیح داد. استحکام کششی فلز جوش تحت تأثیر 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 تأثیر نحوه توزیع یوتکتیک‌های Al-Si می‌باشد. بررسی سطوح شکست نمونه‌های آزمون کشش در مطالعات قبلی نیز نشان داده است که

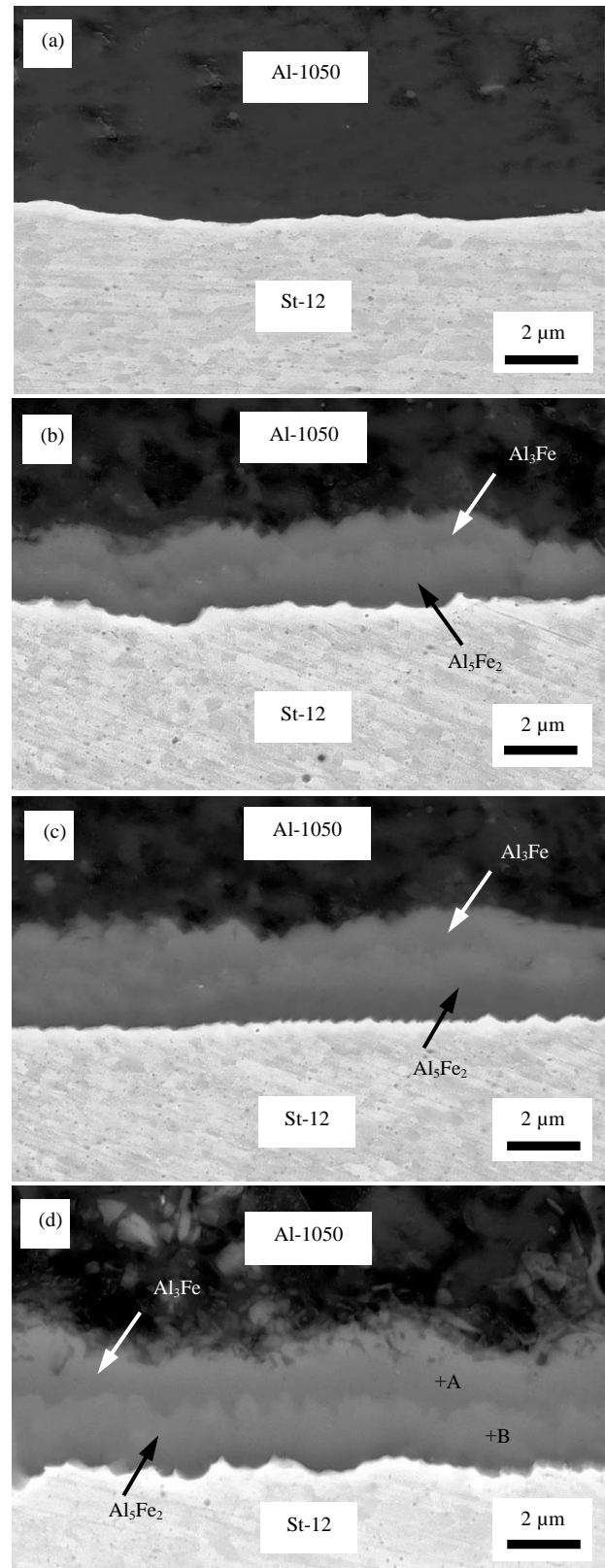
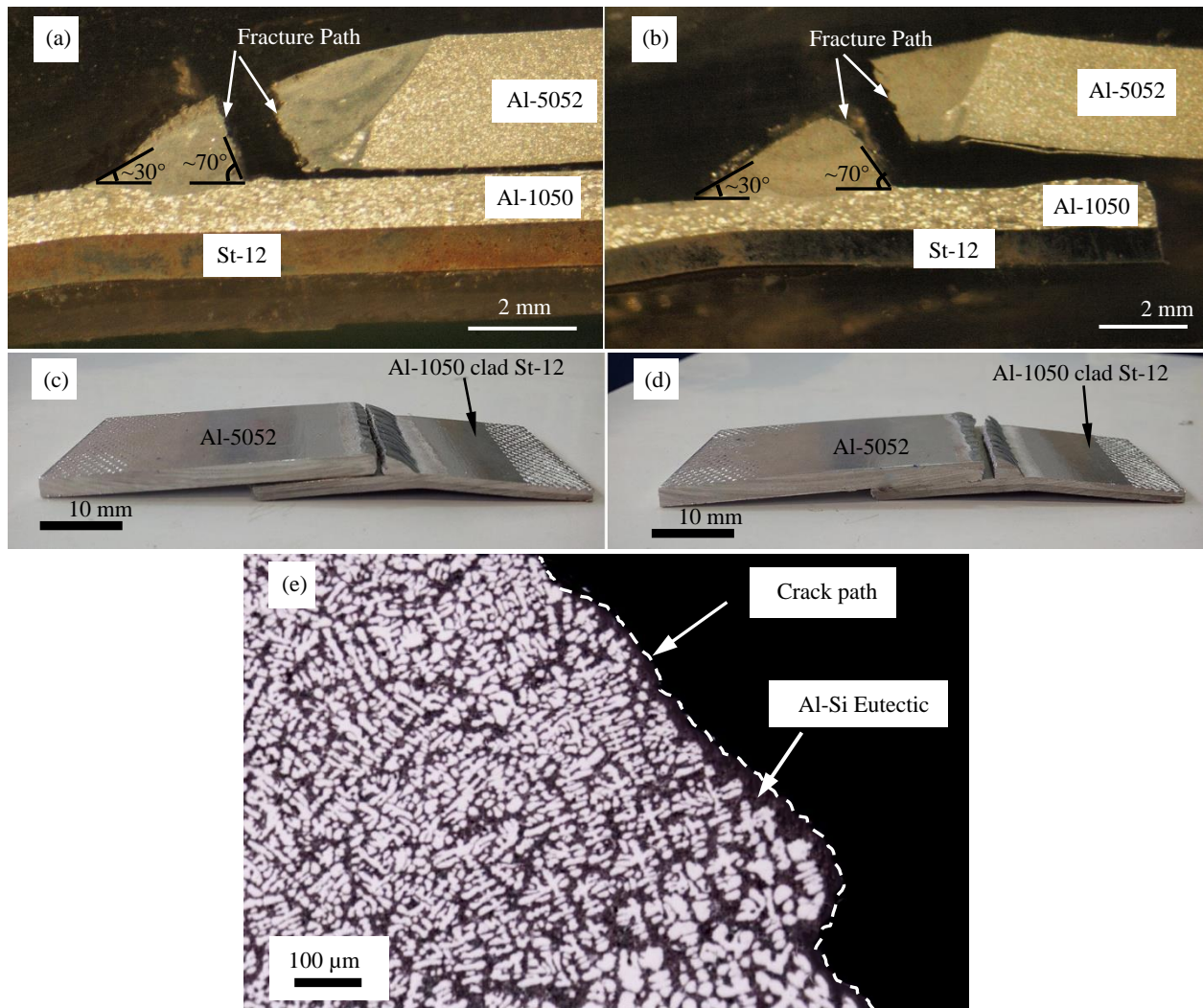


Fig. 7 SEM images from (a) the roll bonding interface of St-12/Al-1050 before welding and the reaction layer formed at the interface of St-12/Al-1050 with the welding current of (b) 80 A, (c) 100 A and (d) 120 A

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



**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 جوش کاری (a) 80 A و (b) 120 A. استریوگراف از نمونه بعد از آزمون کشش-برش با جریان جوش کاری (c) 80 A و (d) 120 A. تصویر میکروسکوپی گسترش ترک از یوتکتیک‌های Al-Si (e).

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  $70^\circ$  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.

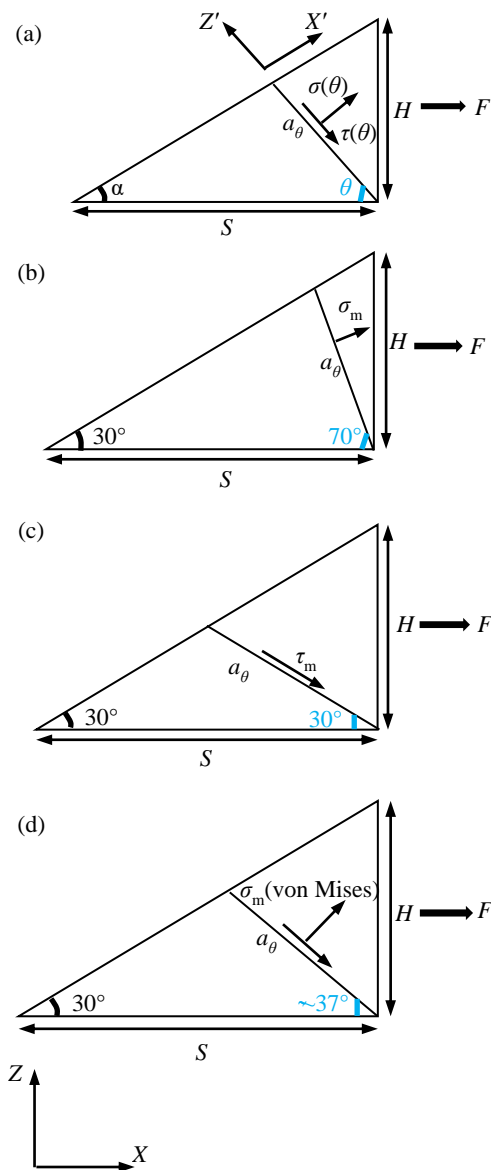
در این میان رایج‌ترین آن‌ها استاندارد AWS B4.0 [28] است که در این استاندارد تنش برشی ( $\tau$ ) در جوش فیلت ساده با اندازه ساق برابر مطابق با

فازهای یوتکتیک Al-Si نقش مهمی در استحکام کششی آلیاژ دارند [26,27]. یوتکتیک‌های Al-Si مسیر مناسبی برای رشد و گسترش ترک نسبت به دندریت‌های  $\alpha$ -Al می‌باشند. در فلز جوش ایجاد شده با جریان جوش کاری 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 جوش کاری پایین‌تر یعنی 80 آمپر، یوتکتیک‌های Al-Si با توزیع یکنواخت در لابه‌لای بازوهای دندریت  $\alpha$ -Al تشکیل شده‌اند و چون زمینه دندریتی  $\alpha$ -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. همان‌گونه که در بخش 2-3 بحث شد، عدم شکست نمونه‌ها از فصل مشترک فولاد St-12 و آلومینیم 1050 در حین آزمون کشش-برش نشان می‌دهد که تشکیل ترکیبات بین‌فلزی با حداکثر ضخامت  $3.5 \mu\text{m}$  اثر منفی بر استحکام اتصال بین این دو لایه نداشته است و بنابراین، شکست از داخل فلز جوش اتفاق

است و منجر به کاهش سرعت سرد شدن و افزایش زمان انجماد فلز جوش شده است.

3. در فصل مشترک فولاد St-12 با پوشش آلومینیوم 1050 لایه‌ی ترکیبات بین‌فلزی آهن-آلومینیوم با ضخامت کم‌تر از  $3.5 \mu\text{m}$  تشکیل شده که اثر منفی بر استحکام اتصال نداشته است. لایه ترکیبات بین‌فلزی Al-Fe شکل گرفته شامل دو زیرلایه متفاوت بود: فاز Al<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub> در نزدیکی فولاد St-12 و فاز Al<sub>3</sub>Fe در مجاورت لایه پوشش آلومینیوم 1050.

4. استحکام کششی جوش‌ها با جریان جوش کاری یک رابطه خطی داشت و با افزایش جریان جوش کاری کاهش یافت. با افزایش جریان جوش کاری، فاصله بازوهای اولیه دندریتی  $\alpha$ -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 جوش کاری (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

معادله (2) محاسبه می‌شود:

$$\tau = \frac{F}{a \times L} \quad (2)$$

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

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

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

بنابراین، اجزای برشی و نرمال تنش روی صفحه با زاویه  $\theta$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

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

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

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

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

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

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

با توجه به زاویه  $\alpha \sim 30^\circ$  در این پژوهش (زاویه ترشوندگی در شکل 4)، تنش نرمال حداکثر ( $\sigma_m$ )، تنش برشی حداکثر ( $\tau_m$ ) و تنش موثر فون میز (فون میز)  $\sigma_m$  به ترتیب در  $\theta_{\text{max}} \sim 70^\circ$ ،  $30^\circ$  و  $37^\circ$  اتفاق می‌افتد که به ترتیب در "شکل‌های 11-b تا 11-d" مشخص شده‌اند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، مسیر شکست در تمام جوش‌ها، در حدود  $70^\circ$  نسبت به سطح لایه پوشش 1050-Al است که نزدیک به زاویه‌ای است که تنش نرمال به حداکثر مقدار خود می‌رسد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که شکست عمدتاً تحت تاثیر تنش نرمال حداکثر ( $\sigma_m$ ) در جوش قرار دارد.

#### 4- نتیجه گیری

در این پژوهش، ورق‌های آلیاژ آلومینیوم 5052 به ورق‌های فولادی St-12 روکش شده با آلومینیوم 1050 با طرح اتصال لبه روی هم به روش فرآیند قوسی الکتروود تنگستنی-گاز و با استفاده از فلز پرکننده ER-4047 متصل شدند. نتایج به دست آمده به صورت زیر می‌باشند:

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

2. در اثر افزایش جریان جوش کاری، فاصله بازوهای اولیه دندریتی  $\alpha$ -Al افزایش یافته و توزیع فازهای یوتکتیک‌های Al-Si در زمینه غیریکنواخت شده است. زیرا در اثر افزایش جریان جوش کاری، حرارت ورودی افزایش یافته



- [13] G. Sierra, P. Peyre, F. Deschaux Beume, 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.

تنش نرمال، (c) حداکثر تنش برشی و (d) حداکثر تنش موثر فون میز  
به 190 MPa~ رسید که 80٪~ استحکام کششی فلز پایه آلومینیوم H34-  
5052 می‌باشد.

5. شکست همه نمونه‌ها در حین آزمون کشش-برش از داخل فلز جوش و با زاویه 70° نسبت به سطح لایه پوشش آلومینیوم 1050 اتفاق افتاد. نتایج تجزیه و تحلیل شکست در جوش فیلت ساده با اندازه ساق نابرابر نشان داد که شکست جوش‌ها اساساً 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 Persian فارسی)
- [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 Persian فارسی)
- [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 galvanized 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.