



مطالعه تجربی اتصال آلومینیم به فولادهای ساده کربنی و گالوانیزه به روش ترکیبی جوشکاری - لحیم کاری

مهدی ضرونی¹، رضا اسلامی فارسانی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* صندوق پستی 19395-1999، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 14 اردیبهشت 1394
پذیرش: 18 خرداد 1394
ارائه در سایت: 07 تیر 1394

کلید واژگان:

فلزات غیرمشابه
جوشکاری - لحیم کاری
لایه ترکیب بین فلزی
حرارت ورودی

چکیده

امروزه تقاضا برای اتصال فلزات غیرمشابه آلومینیم و فولاد، به منظور کاهش وزن در صنایع خودروسازی، هوافضا و صنایع کشتی سازی، به سرعت در حال افزایش است. در این تحقیق آلیاژ آلومینیم 5083 از طریق روش ترکیبی جوشکاری - لحیم کاری، با به کار بردن پرکننده های پایه آلومینیم 4043 و 4047، به فولاد گالوانیزه و فولاد ساده کربنی اتصال داده شد. لایه ترکیب بین فلزی ترد شکل گرفته در فصل مشترک فولاد - فلز جوش تأثیر اساسی روی استحکام اتصال دارد. نتایج نشان داد که افزایش حرارت ورودی منجر به افزایش ضخامت لایه ترکیب بین فلزی می شود. اندازه ضخامت لایه ترکیب بین فلزی که از تصاویر ریزساختاری اندازه گیری شد، در یک محدوده 2-6 میکرومتری بود. نتایج بدست آمده از مشاهده های ریز ساختاری نشان داد که در حرارت ورودی مشابه، ضخامت لایه ترکیب بین فلزی ترد برای اتصال ایجاد شده با پرکننده 4047 تقریباً نصف ضخامت این لایه در اتصال ایجاد شده با پرکننده 4043 است. بالاترین استحکام حاصل شده (170 مگاپاسکال) مربوط به اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده 4047 بود. علاوه بر آن، در این نوع اتصال شکست در فلز جوش رخ داد، در حالی که برای اتصال آلومینیم به فولاد ساده کربنی این پدیده در ناحیه فصل مشترک فولاد - فلز جوش به وقوع پیوست. نتایج آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس، حضور ترکیب بین فلزی آهن - آلومینیم با نسبت اتمی 3/1 را در لایه ترکیب بین فلزی، برای اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه نشان داد. این نتیجه همچنین به وسیله آنالیز پراش پرتو ایکس انجام شده بر سطح شکست، اثبات شد.

An Experimental study of joining aluminum to galvanized and plain carbon steels using the welding-brazing hybrid method

Mehdi Zarooni, Reza Eslami-Farsani*

Department of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.Box. 19395-1999, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 04 May 2015
Accepted 08 June 2015
Available Online 28 June 2015

Keywords:
Dissimilar Metals
Welding-Brazing
Intermetallic Compound Layer
Heat Input

ABSTRACT

Today, the demand for joining dissimilar metals of aluminium and steel to reduce the vehicle weight in the automotive, aerospace and shipbuilding industries has witnessed a rapid growth. In the present study, 5083 aluminium alloy was joined to galvanized steel and plain carbon steel with 4043 and 4047 filler metals by using the welding-brazing hybrid method. The brittle intermetallic compound (IMCs) layer formed in the interface of steel-weld seam was found to have a significant influence on the joint strength. The results also indicated that increasing heat input enhanced the thickness of IMCs layer. The thickness of IMCs layers, as measured from microstructural images, was in a range of 2-6 μm . Further, the results obtained from microstructural observation showed that with equal weld heat input, the thickness of IMCs layer for the joint produced with 4047 filler metal was approximately half of that obtained for the joint produced with 4043 filler metal. The highest mechanical resistance (of about 170 MPa) was obtained for aluminum to galvanized steel joint with 4047 filler metal. Moreover, in this joint, the failures occurred in the welded seam and for aluminum to plain carbon steel joint, it was in the interface of steel-weld seam. The results obtained by Energy dispersive x-ray spectrometry analysis of IMCs layer for aluminum to galvanized steel joint showed the presence of the FeAl_3 intermetallic compound. This was confirmed by x-ray diffraction analysis of the fracture plane.

1- مقدمه

این وجود، اتصال مستقیم آلومینیم به فولاد از طریق جوشکاری قوسی به خاطر دلایلی همچون، اختلاف گسترده بین دمای ذوب دو فلز، حلالیت خیلی پایین آهن در آلومینیم و شکل گیری ترکیبات بین فلزی ترد¹ با ریخت

تقاضای رو به رشدی برای سازه های ترکیبی آلومینیم و فولاد در صنایع خودرو سازی، هوافضا و صنایع دریایی، به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی (از طریق کاهش وزن سازه ها) و ترکیب خواص این دو فلز، به وجود آمده است. با

1- Fe_2Al_5 , FeAl_3

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ترکیب بین فلزی مشاهده کردند.

چندین فرآیند اتصالی شامل، جوشکاری انفجاری، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، جوشکاری آلتراسونیک، پیوند چسبی و اتصال زوج فلزی²، برای اتصال آلومینیم به فولاد به کار گرفته شده است. با این وجود این فرآیندها به دلیل هزینه‌ی بالا و همچنین منحصر به فرد بودن شکل و ابعاد قطعات مورد اتصال، محدود می‌شوند. بنابراین استفاده از یک روش جوشکاری سریع و کم هزینه که آلومینیم را مستقیماً به فولاد متصل کند، برای صنایع مطلوب است [5.4].

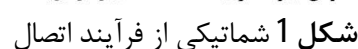
2-آزمایش تجربی

رشد لایه ترکیب بین فلزی⁴ توسط نفوذ اتم‌های آهن جامد در آلومینیم مذاب کنترل می‌شود. به منظور کاهش ضخامت لایه بین فلزی و در عین حال ایجاد اتصال با استحکام بالا، باید توزیع دمایی و تغییرات آن با زمان، نزدیک ناحیه فصل مشترک فولاد- فلزجوش کنترل شود. فاکتورهایی همچون، سرعت جوشکاری و به کار بردن پشت بند جوشکاری می‌تواند در کنترل کردن جریان حرارت و سیکل حرارتی موثر باشد [۷،۸].

طرح اتصال استفاده شده برای اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه، یک طرح اتصال لب به لب با خصوصیت دوگانه شامل، یک پخ 30 درجه یک طرفه در طرف آلومینیم و یک طرح نیم دایره‌ای در طرف فولاد است. طرح اتصال انتخاب شده برای اتصال آلومینیم به فولاد ساده کربنی یک پخ 30 درجه یک طرفه در طرف آلومینیم است.

دانگ و همکارانش [9] از طریق روش جوشکاری تیگ - لحیم کاری و با استفاده از پرکننده های فلزی آلومینیم - سیلیسیم، آلومینیم - مس، آلومینیم - سیلیسیم - مس و آلومینیم - روی، آلومینیم را به فولاد گالوانیزه متصل کردند و گزارش نمودند که حداکثر استحکام کششی برابر با 136 مگاپاسکال، برای اتصال های ساخته شده با پرکننده 4047^{5} به دست آمد.

یک فلاکس غیرخورنده، مخصوص لحیم کاری آلیاژهای آلومینیم (با ترکیب شیمیایی عمده پتاسیم - آلومینیم - فلور¹⁶)، در حلال استون حل شد. سوسپانسیون بدست آمده به طور همگن و با ضخامت 0/5 میلی متر، روی سطوح رویی و پشتی فولاد در محدوده‌ی شیار پخ، مالیده شد. علاوه بر آن، یک صفحه پشت بند مسی دارای یک شیار مرکزی با ابعاد 8×0/5 میلی متر مربع، به عنوان چاه حرارتی استفاده شد. ورق‌ها مطابق پارامترهای جوشکاری جدول 2 به هم متصل شدند. نمونه‌ها، از مقطع عرضی اتصال‌ها تهیه شد.



- 1- Morphology
- 2- Bimetal Joining
- 3- Tungsten Inert Gas (TIG)
- 4- Intermetallic Compound Layer
- 5- Al-12Si
- 6- Metal Inert Gas(MIG)
- 7- Fe_2Al_5
- 8- 5A02-H34
- 9- Zn-15Al
- 10- Q235B

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم 5083، فولاد گالوانیزه، فولاد ساده کربنی و فلزات پرکننده 4043 و 4047 (درصد وزنی)

فلز پرکننده 4047	فلز پرکننده 4043	فولاد ساده کربنی	فولاد گالوانیزه	آلومینیم 5083
آهن 0/8	آهن 0/8	آهن پایه	آهن 99/2	آهن 0/25
مس 0/3	مس 0/3	کربن 0/134	کربن 0/073	منیزیم 3/95
سیلیسیم 11-13	سیلیسیم 4/5 - 5	سیلیسیم 0/1	سیلیسیم 0/015	سیلیسیم 0/29
منگنز 0/15	منگنز 0/5	منگنز 0/766	منگنز 0/38	منگنز 0/3
منیزیم 0/1	منیزیم 0/5	فسفر 0/008	فسفر 0/017	کروم 0/136
روی 0/2	روی 0/1	گوگرد 0/004	گوگرد 0/02	نیکل 0/033
آلومینیم پایه	آلومینیم پایه	نیکل 0/03	نیکل 0/059	آلومینیم پایه

جدول 2 پارامترهای جوشکاری - لحیم کاری آلومینیم به فولاد گالوانیزه و فولاد ساده کربنی

نمونه	نوع اتصال	ولتاژ (V)	سرعت جوشکاری (mm/s)	جریان (A)	حرارت ورودی (J/mm)
1		11	2/67	120	247/5
2	آلومینیم به فولاد گالوانیزه و پرکننده 4043	12	2/25	140	373/3
3		14	2/5	150	420
4		15	2/52	155	461/3
5	آلومینیم به فولاد گالوانیزه و پرکننده 4047	15	2/55	155	455/9
6		15	2/6	155	447/1
7	آلومینیم به فولاد ساده کربنی و پرکننده 4043	16	2/7	160	474
8		16	2/75	170	494/5

جوشکاری بهینه شده، شامل جریان 150 آمپر و سرعت جوشکاری 2/5 میلی متر بر ثانیه، بعد از تمیز کردن سرباره جوش به وسیله یک برس سیمی از جنس فولاد زنگ نزن را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، پخش شدن فلز جوش روی سطوح رویی و زیرین ورق فولادی به خوبی صورت پذیرفته و اتصال‌ها با ظاهر مناسب ایجاد شده‌اند. حضور شکاف در پشت بند مسی باعث شد تا سطح زیرین اتصال نیز با فلز جوش پوشانده شود. هیچ ترکی روی سطوح قطعات مشاهده نشد.

شکل 3 مقاطع عرضی مربوط به اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه و فولاد ساده کربنی را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در هر دو اتصال، فولاد اصلاً ذوب نشده و فقط با فلز جوش پوشانده شده است (اتصال لحیم کاری)، در حالی که فلز آلومینیم به دلیل نقطه ذوب پایین ذوب شده و اتصال جوشکاری ایجاد شده است. در اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه عیوبی همچون ذوب ناقص در طرف آلومینیم، و یا لحیم ناقص در طرف فولاد مشاهده نشد.

این نمونه‌ها در یک زمینه رزین اپوکسی محکم شده و تا حصول یک سطح آینه‌ای پولیش شدند.

سپس نمونه‌ها در یک محلول کلر¹ (با ترکیب شیمیایی: یک میلی‌لیتر اسید فلوریک - یک ونیم میلی‌لیتر اسید کلریک - دو ونیم میلی‌لیتر اسید نیتریک - نود و پنج میلی‌لیتر آب) و به مدت 3-5 ثانیه حکاکی (اچ)² شدند. ریز ساختار اتصال‌ها از طریق میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. گاز محافظ مورد استفاده، گاز آرگون با جریان 9 لیتر بر دقیقه بود. زوایای عرضی و طولی الکتروود با سطح قطعه کار، به ترتیب 20 و 30 درجه انتخاب شد. نوع جریان جوشکاری متناوب بوده و الکتروود تنگستنی با قطر 3 میلی‌متر و از جنس آلیاژ تنگستن-زیرکونیم انتخاب شد. میزان حرارت ورودی جوش مطابق معادله (1) محاسبه شد:

$$Q = \frac{\eta UI}{V} \quad (1)$$

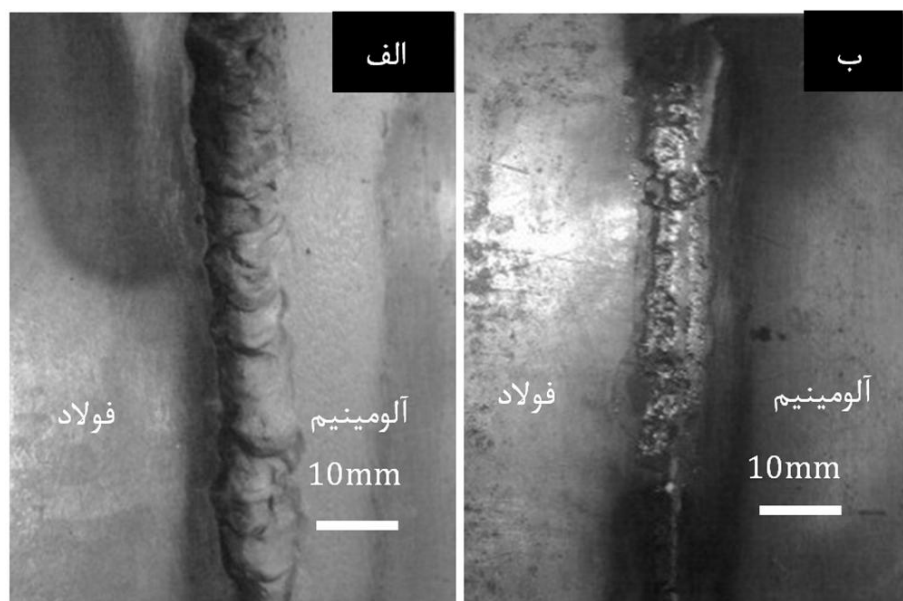
که در آن، Q میزان حرارت ورودی، U ولتاژ جوشکاری، I جریان، V سرعت جوشکاری و η بازدهی قوس می‌باشد. بازدهی قوس فرایند 0/6 است.

جهت مشخص شدن ترکیب شیمیایی لایه ترکیب بین فلزی، آنالیزهای نقطه‌ای طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس انجام گرفت. به‌منظور مشخص شدن فازها در صفحات شکست، آنالیز پراش پرتو ایکس نیز انجام شد. همچنین، جهت بررسی خواص استحکامی اتصال‌ها، نمونه‌های آزمون کشش مطابق استاندارد آزمون کشش برای ورق‌های تحت لحیم کاری³، تهیه شدند و آزمون‌های کشش انجام شد.

3- نتایج و بحث

3-1- درشت ساختار⁴ اتصال‌ها

شکل 2 ظاهر اتصال ایجاد شده بین آلومینیم و فولاد گالوانیزه با پارامترهای



شکل 2 ظاهر اتصال‌های جوشکاری تیگ - لحیم کاری

(الف) سطح رویی، (ب) سطح زیرین

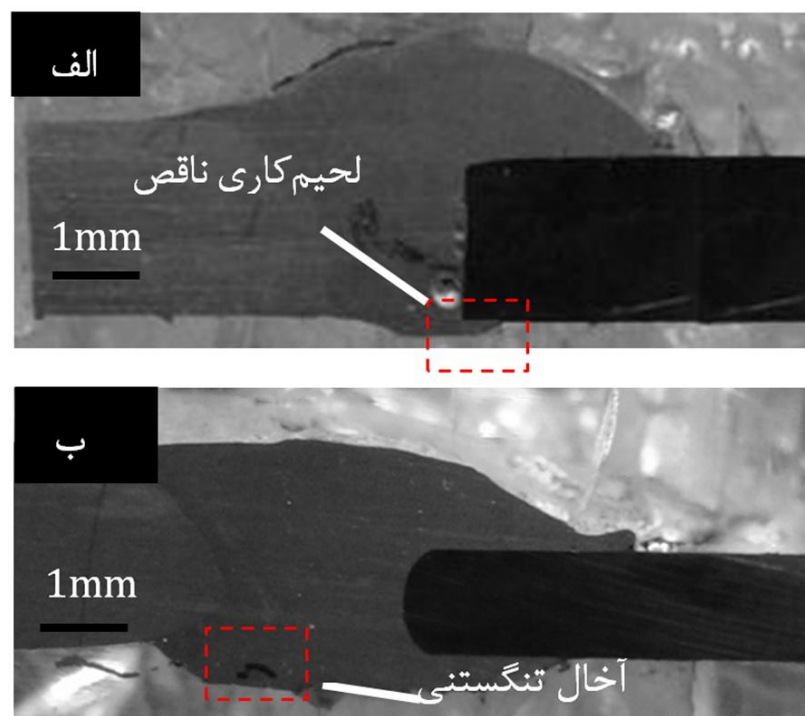
- 1- Keller
- 2- Etching
- 3- AWS C3.2M.C3.2
- 4- Macrostructure

فیلم فلاکس مذاب شده، به وسیله سانگ و همکارانش توضیح داده شده است [2].

عدم ایجاد پخ برای فولاد ساده کربنی منجر به لحیم کاری ناقص در قسمت زیرین اتصال، برای اتصال آلومینیم به فولاد ساده کربنی شد. این مورد به خاطر نوع طرح اتصال فولاد گالوانیزه و نداشتن هیچ گونه زاویه در سطح فولادی، برای اتصال های آلومینیم به فولاد گالوانیزه دیده نشد.

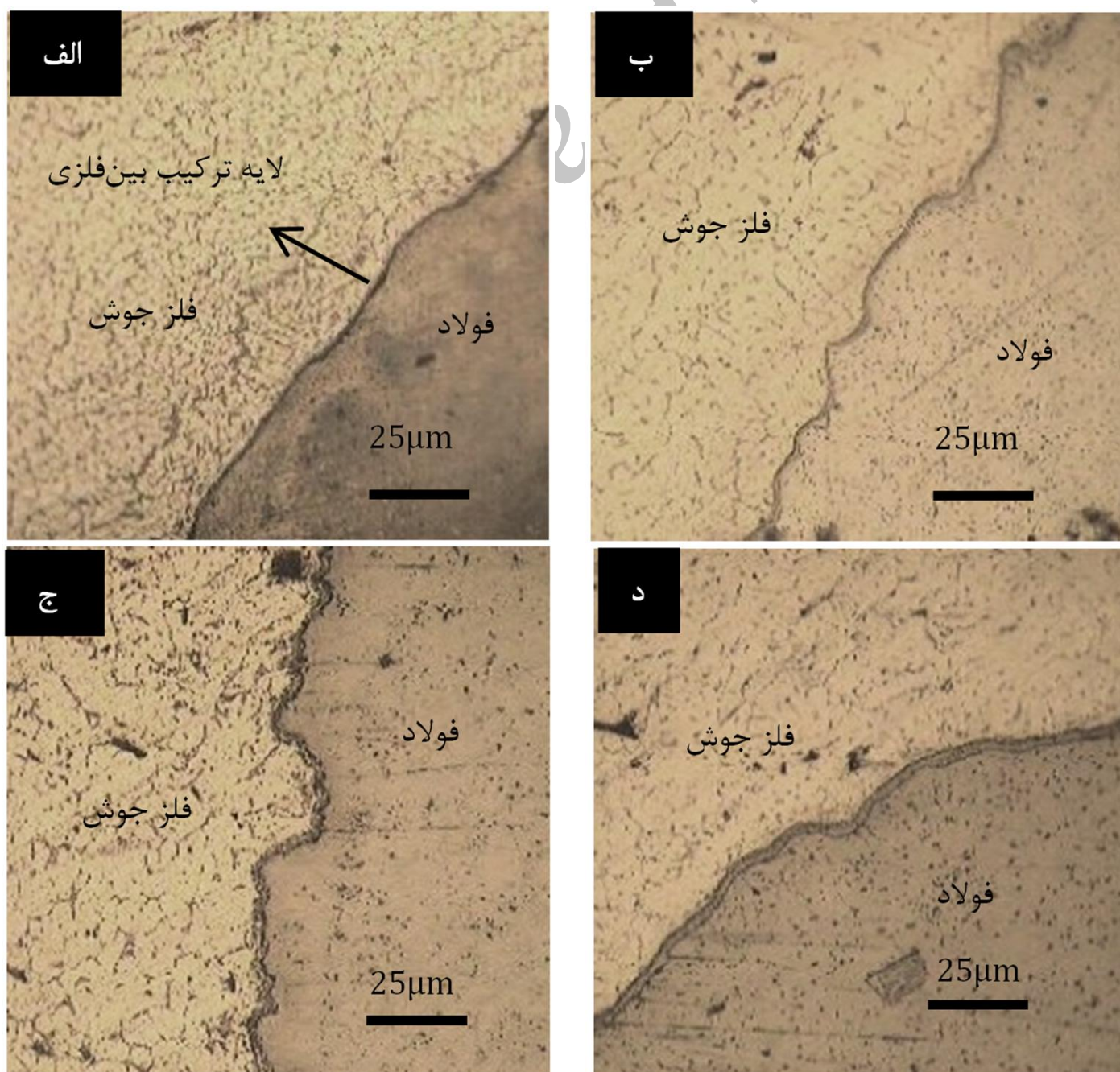
3-2- ریز ساختار اتصال

شکل 4 تصاویر میکروسکوپ نوری در ناحیه فصل مشترک فولاد- فلز جوش را، برای اتصال های آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده 4043 و در حرارت های ورودی متفاوت، نشان می دهد. همان طور که مشخص است، افزایش حرارت ورودی منجر به افزایش ضخامت لایه ترکیب بین فلزی شده است. ضخامت اندازه گیری شده در یک محدوده 2-6 میکرونی است. کاهش حرارت ورودی و استفاده از یک صفحه پشت بند مسی، زمان حضور مذاب را کاهش داد که در نتیجه، لایه ترکیب بین فلزی با ضخامت کم ایجاد شد. همچنین یکنواخت بودن لایه ترکیب بین فلزی نشان می دهد ایزو ترم های دمایی با صفحه فصل مشترک فولاد- فلز جوش موازی بوده است. مقطع بودن ایزو ترم های دمایی با صفحه فصل مشترک، باعث می شود تا دمای پیک در نقاط مختلف فصل مشترک متفاوت بوده و در نتیجه، به علت تفاوت میزان نفوذ اتمی، لایه ترکیب بین فلزی با ضخامت های متفاوت، در امتداد فصل مشترک ایجاد می شود [12].



شکل 3 مقطع عرضی جوش؛ نمونه های اتصال آلومینیم به الف- فولاد ساده کربنی و ب- فولاد گالوانیزه

لایه سوسپانسیون فلاکس حل شده در استون که به طور یکنواخت روی سطوح فولاد مالیده شد، از طریق کم کردن انرژی فصل مشترک بین سطوح فولاد و فلز مذاب و کشیدن مذاب به قسمت های بالایی سطوح، گرده جوش با شکل مناسب را ایجاد نمود. پوشش روی مربوط به فولاد گالوانیزه از طریق سد کردن تماس مستقیم آلومینیم و فولاد، منجر به کاهش ضخامت لایه ترکیب بین فلزی می شود [11]. عمل پخش کنندگی فلز مذاب توسط



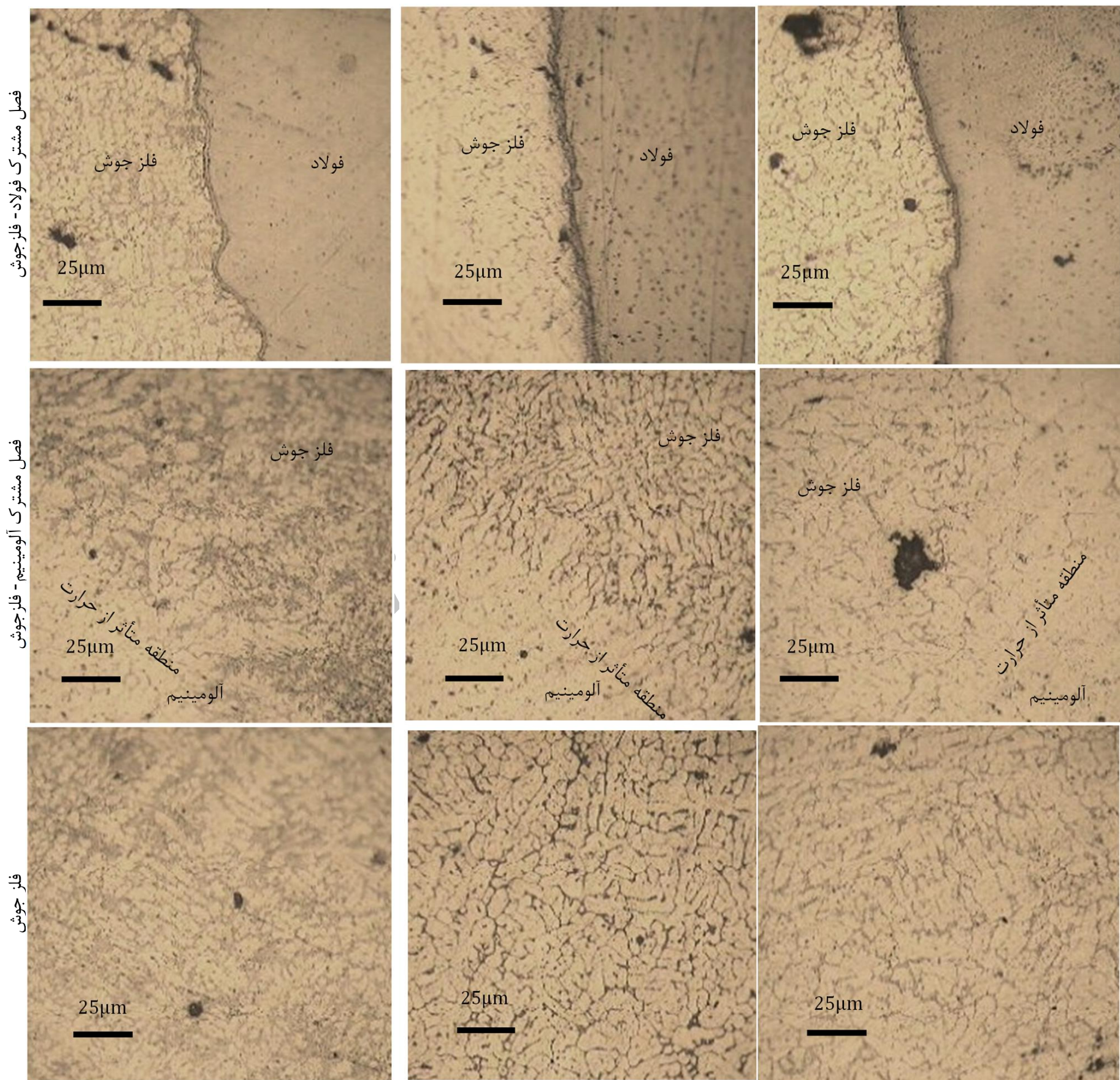
شکل 4 تصاویر ریز ساختاری میکروسکوپ نوری از ناحیه فصل مشترک فولاد گالوانیزه-فلز جوش؛ الف- حرارت ورودی 247/5 J/mm، ب- حرارت ورودی 373/3 J/mm، ج- حرارت ورودی 420 J/mm و د- حرارت ورودی 461/3 J/mm

آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده 4047 است. در واقع در اتصال‌های آلومینیم به فولاد گالوانیزه، در حرارت ورودی یکسان، پرکننده فلزی 4047 که مقادیر سیلیسیم بالاتری دارد اتصال با ضخامت لایه ترکیب بین فلزی باریک‌تری را ایجاد نموده است. علت این پدیده آن است که حضور اتم‌های سیلیسیم در مناطق فصل مشترکی، تمایل ترکیبی اتم‌های آهن با آلومینیم را کاهش داده و همچنین انرژی فعال‌سازی نفوذ آهن در آلومینیم را افزایش می‌دهد که در این حالت سرعت رشد لایه بین فلزی کاهش می‌یابد [9].

به دلیل حرارت ورودی یکسان، اندازه ساختار دندریتی اتصال‌ها، تفاوت چندانی با هم ندارند. برای تمامی اتصال‌ها، ریزساختار فلز جوش شامل، دندریتهای محلول جامد غنی از آلومینیم به همراه فاز یوتکتیک آلومینیم-سیلیسیم توزیع شده در مرز دانه‌های این دندریتهای است.

روش‌هایی همچون، افزودن سرعت جوشکاری، استفاده از پشت‌بند جوشکاری با هدایت حرارتی بالا، کنترل حرارت ورودی و کم کردن آن، از طریق کاهش دادن دمای پیک و زمان حضور مذاب و در نتیجه ممانعت از نفوذ اتم‌های آهن در فلز جوش، ضخامت لایه بین فلزی را کاهش می‌دهند [13,7].

تصاویر میکروسکوپ نوری در نواحی مختلف اتصال‌های آلومینیم به فولاد گالوانیزه و فولاد ساده کربنی و برای پرکننده‌های فلزی 4047 و 4043 در حرارت ورودی یکسان، در شکل 5 نشان داده شده است. ضخامت لایه ترکیب بین فلزی شکل گرفته در فصل مشترک فولاد-فلز جوش، برای اتصال‌های آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده فلزی 4047، آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده فلزی 4043 و آلومینیم به فولاد ساده کربنی با پرکننده فلزی 4043 به ترتیب 3، 6 و 4 میکرون است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، کمترین ضخامت لایه ترکیب بین فلزی، مربوط به اتصال



اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با

پرکننده فلزی 4047

اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با

پرکننده فلزی 4043

اتصال آلومینیم به فولاد ساده کربنی با

پرکننده فلزی 4043

شکل 5 تصاویر ریزساختاری میکروسکوپ نوری از نواحی مختلف اتصال آلومینیم به فولاد با حرارت ورودی حدود 460 J/mm

یک قسمت تشکیل شده است.

همچنین توجه به شکل 6- ر برای اتصال آلومینیم به فولاد ساده کربنی با پرکننده فلزی 4043 نشان می‌دهد که لایه ترکیب بین فلزی فقط از یک قسمت تشکیل شده و تفکیکی صورت نگرفته است. بنابراین تفکیک شدن یا نشدن لایه بین فلزی به نوع پرکننده فلزی و فلزات تحت اتصال بستگی دارد [11].

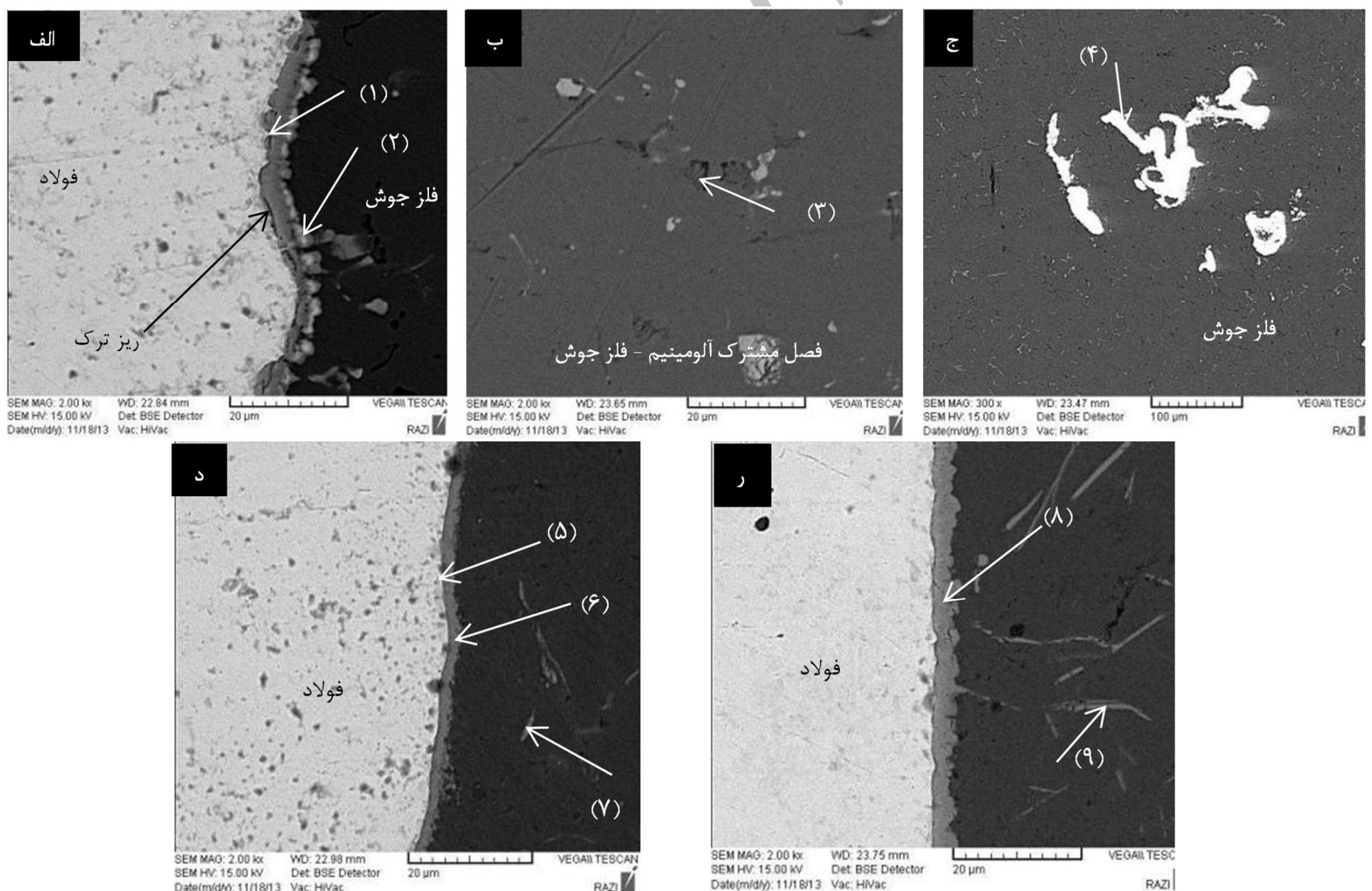
مطابق شکل 6- الف، بخش ضخیم تر لایه بین فلزی که با رنگ تیره مشخص شده است دارای ریخت شناسی صفحه مانند است، در حالی که بخش روشن یک ریخت شناسی سوزنی گسسته دارد. تعدادی ریز ترک نیز در فصل مشترک فولاد- لایه ترکیب بین فلزی دیده می‌شود. تاثیر ترکیبی تنش های حرارتی و اختلاف بین ضریب انبساط حرارتی فولاد و لایه بین فلزی می‌تواند عامل ایجاد چنین ریز ترک‌هایی باشد.

این پدیده همان‌طور که در شکل های 6- د و 6- ر مشخص است، در اتصال ایجاد شده با پرکننده 4047 و همچنین اتصال آلومینیم به فولاد ساده کربنی با پرکننده فلزی 4043، دیده نشد که می‌تواند عامل افزایش استحکام این اتصال‌ها باشد. استفاده از عناصر اضافه شونده‌ای همچون سیلیسیم، روی و مس از طریق تغییر دادن شرایط ترمودینامیکی و جایگزینی فازهای سه تایی با سرعت رشد پایین به جای فازهای دوتایی، منجر به کاهش ضخامت لایه بین فلزی می‌شود [9]. در غیاب عنصر سیلیسیم، اتم‌های آهن جامد به

مراجعه به دیاگرام دوتایی آلومینیم- سیلیسیم [14]، نشان می‌دهد که در سیستم‌های آلیاژی با سیلیسیم بالاتر، میزان فاز یوتکتیک بالاتری تشکیل می‌شود. این موضوع همچنین در اتصال‌های آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده 4047، با مقادیر بالاتر سیلیسیم نسبت به پرکننده 4043، مشاهده شد. ریزساختار فلز جوش در اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده فلزی 4047 نسبت به اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده فلزی 4043 ریزتر می‌باشد. همان‌طور که از شکل 5 مشخص است، ریزساختار فلز جوش اتصال‌های آلومینیم به فولاد گالوانیزه و آلومینیم به فولاد ساده کربنی با پرکننده فلزی 4043 به دلیل یکسان بودن پرکننده فلزی و میزان حرارت ورودی جوش تقریباً یکسان است.

بلورهای ستونی در ناحیه فصل مشترک آلومینیم- فلز جوش جوانه زده و به درون فلز جوش رشد می‌کنند. طول و پهنای بلورهای ستونی در اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده فلزی 4047 کمتر است.

مناطق متأثر از حرارت به دلیل کم بودن زمان حاکای نمونه‌ها به خوبی مشخص نشده است. شکل 6 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی را برای اتصال‌های جوشکاری تیگ - لحیم کاری آلومینیم به فولاد گالوانیزه و فولاد ساده کربنی نشان می‌دهد. مقایسه شکل‌های 6- الف و 6- د نشان می‌دهد که در اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه لایه ترکیب بین فلزی برای اتصال به وجود آمده با پرکننده 4043 از دو قسمت با دو ریخت متفاوت تشکیل شده است، در حالی که این لایه در اتصال حاصل شده با پرکننده 4047 تنها از



شکل 6 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی الف - فصل مشترک فولاد- فلز جوش در اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده 4043، ب- فصل مشترک آلومینیم- فلز جوش در اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده 4043، ج- فلز جوش در اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده 4043، د- فصل مشترک فولاد- فلز جوش در اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده 4047، ر- فصل مشترک فولاد- فلز جوش در اتصال آلومینیم به فولاد ساده کربنی با پرکننده 4043

بررسی نتایج آنالیز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس در نقاط (5) و (6) واقع بر شکل 6، و همچنین دیاگرام سه تایی آلومینیم - آهن - سیلیسیم نشان داد که همانند نمونه های اتصال یافته با پرکننده 4043 فاز نزدیک به فولاد در اتصال های ایجاد شده با پرکننده 4047 فاز دوتایی (1) و فاز نزدیک به فلز جوش شامل رسوبات آهن - سیلیسیم⁵ و فاز سه تایی (1) می باشد. مطابق جدول 3، افزایش عنصر سیلیسیم در این ترکیبات نسبت به نمونه های اتصال یافته با پرکننده 4043، کاملاً مشهود است. افزایش این عنصر باعث افزایش سختی ترکیبات می شود.

در ناحیه فلز ذوب، نزدیک فصل مشترک فولاد - فلز جوش، فاز سه تایی (2) که نسبت به فاز سه تایی (1) دارای مقادیر سیلیسیم بالاتر است و همچنین فازهای محلول جامد آلومینیم و سیلیسیم تشکیل شده اند. نتایج آنالیز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس در نقطه (7) و بررسی دیاگرام سه تایی آلومینیم - آهن - سیلیسیم، این موضوع را نشان می دهد [2].

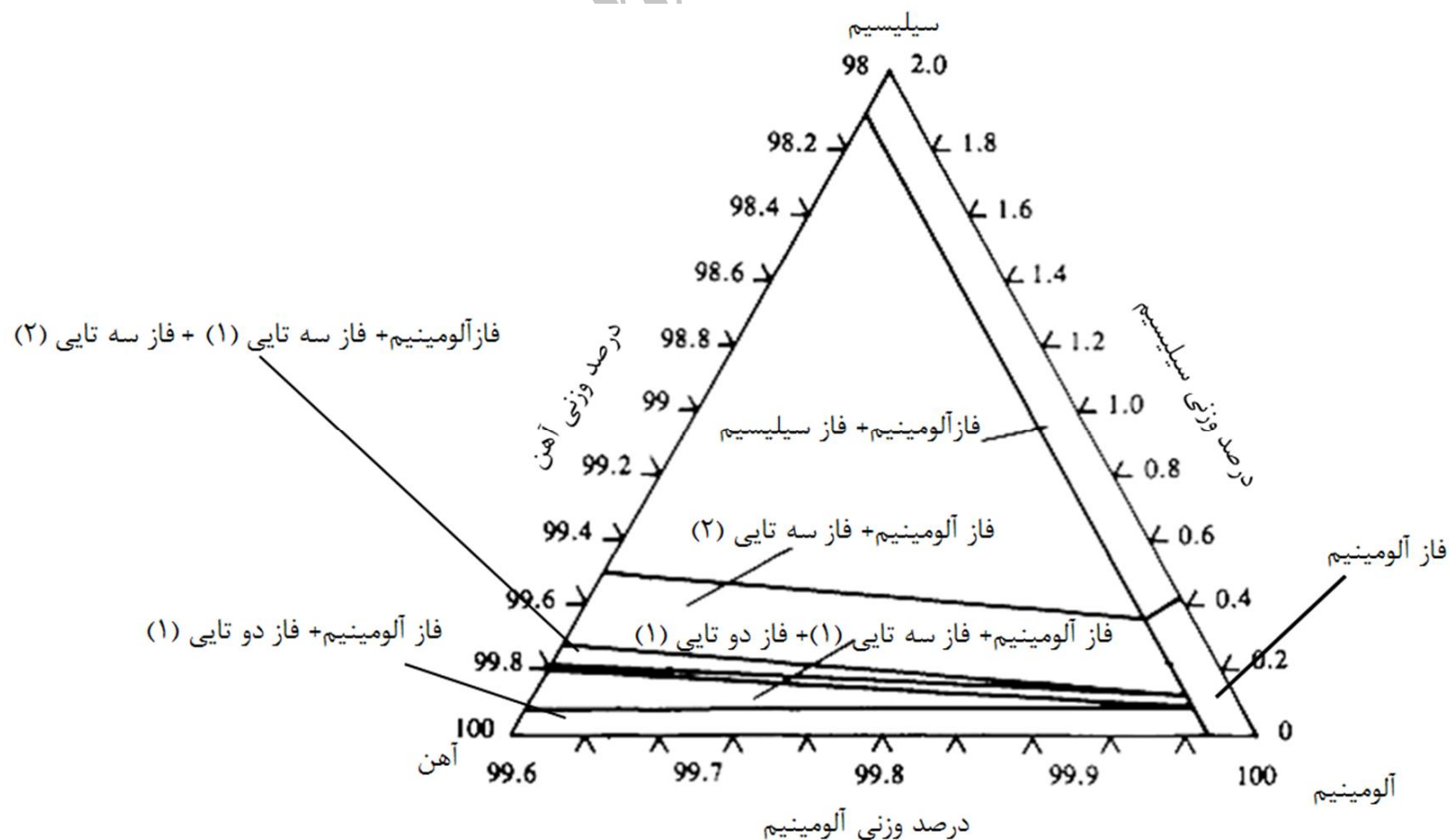
زانگ و همکارش [4] همچنین شکل گیری فاز سه تایی (2) را در نواحی فلز جوش، نزدیک فصل مشترک فولاد - فلز جوش، با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری اثبات نمودند. افزایش حضور عنصر سیلیسیم در مناطق فصل مشترک فولاد - فلز جوش باعث می شود تا تمایل اتم های آهن برای قرارگیری در این مناطق کاهش یابد.

این موضوع با مراجعه به نتایج آنالیز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس اثبات می شود. در موقعیت های (1) و (2) واقع بر شکل 6 (که مربوط به اتصال های ایجاد شده با پرکننده 4043 است)، نسبت به نقاط (5) و (6) که مربوط به اتصال های ایجاد شده با پرکننده 4047 است، میزان درصد اتمی آهن بیشتر است. هر چه غلظت اتم های آهن کم تر باشد، مطابق دیاگرام تعادلی سه تایی آلومینیم - آهن - سیلیسیم تمایل به تشکیل فازهای بین فلزی از فاز دوتایی (2)⁶ به فاز دوتایی (1) و از آن به فازهای سه تایی (1) و (2) انتقال می یابد. بنابراین حضور عنصر سیلیسیم ضمن آنکه باعث می شود فاز دوتایی

سرعت در آلومینیم مذاب نفوذ کرده و فازهای دوتایی آهن - آلومینیم¹ در فصل مشترک فولاد - فلز جوش تشکیل شده و به سمت فلز جوش رشد می کنند. شکل 7 یک ایزوترم از دیاگرام سه تایی آلومینیم - آهن - سیلیسیم را، نشان می دهد.

با ورود عنصر سیلیسیم، شرایط برای جوانه زنی و رشد فازهای سه تایی شامل، فاز سه تایی (1)² و فاز سه تایی (2)³ که آنتالپی تشکیل استاندارد آن ها (مطابق داده های ترمودینامیکی و دیاگرام های سه تایی) نسبت به فازهای دوتایی کمتر است، فراهم می شود [15، 1]. بررسی نتایج آنالیز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس در نقاط (1) و (2) واقع در شکل 6، و همچنین دیاگرام سه تایی آلومینیم - آهن - سیلیسیم (شکل 7) نشان داد که در اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده فلزی 4043، لایه تیره دارای ترکیب احتمالی فاز دوتایی (1)⁴ و لایه روشن دارای ترکیب فاز سه تایی (1) می باشد. حضور عنصر سیلیسیم باعث می شود تا از طریق جایگزین شدن این عنصر با عنصر آلومینیم در ساختار منظم ترکیب فاز دوتایی (1)، سختی این فاز افزایش یابد. فاز سه تایی (1) دارای سختی بالاتر نسبت به فاز دوتایی (1) می باشد [15]. همان طور که از شکل 6 - د مشخص است لایه ترکیب بین فلزی در اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده فلزی 4047، یک لایه با ضخامت تقریباً ثابت با ریخت ورقه ای است. این لایه در طرف فولادی دارای سطح هموار و در طرف فلز جوش دارای سطح ناهموار (سوزن های ریز) می باشد.

همان طور که مشخص است افزایش ورود عنصر سیلیسیم به مذاب باعث شده تا سرعت رشد لایه بین فلزی کاهش یافته و ضخامت لایه ترکیب بین فلزی در نمونه های اتصال یافته با پرکننده 4047 نسبت به ضخامت این لایه در نمونه های اتصال داده شده با پرکننده 4043 کمتر باشد. کاهش ضخامت لایه بین فلزی باعث افزایش استحکام اتصال در نمونه های اتصال داده شده با پرکننده 4047 می شود [16].



شکل 7 دیاگرام سه تایی آلومینیم - آهن - سیلیسیم در دمای 600 درجه سانتی گراد [14]

- 1- Fe_2Al_5 , FeAl_3
- 2- $\text{Al}_{17}\text{Fe}_{17}\text{Si}$
- 3- $\text{Al}_9\text{Si}_2\text{Fe}_2$
- 4- FeAl_3

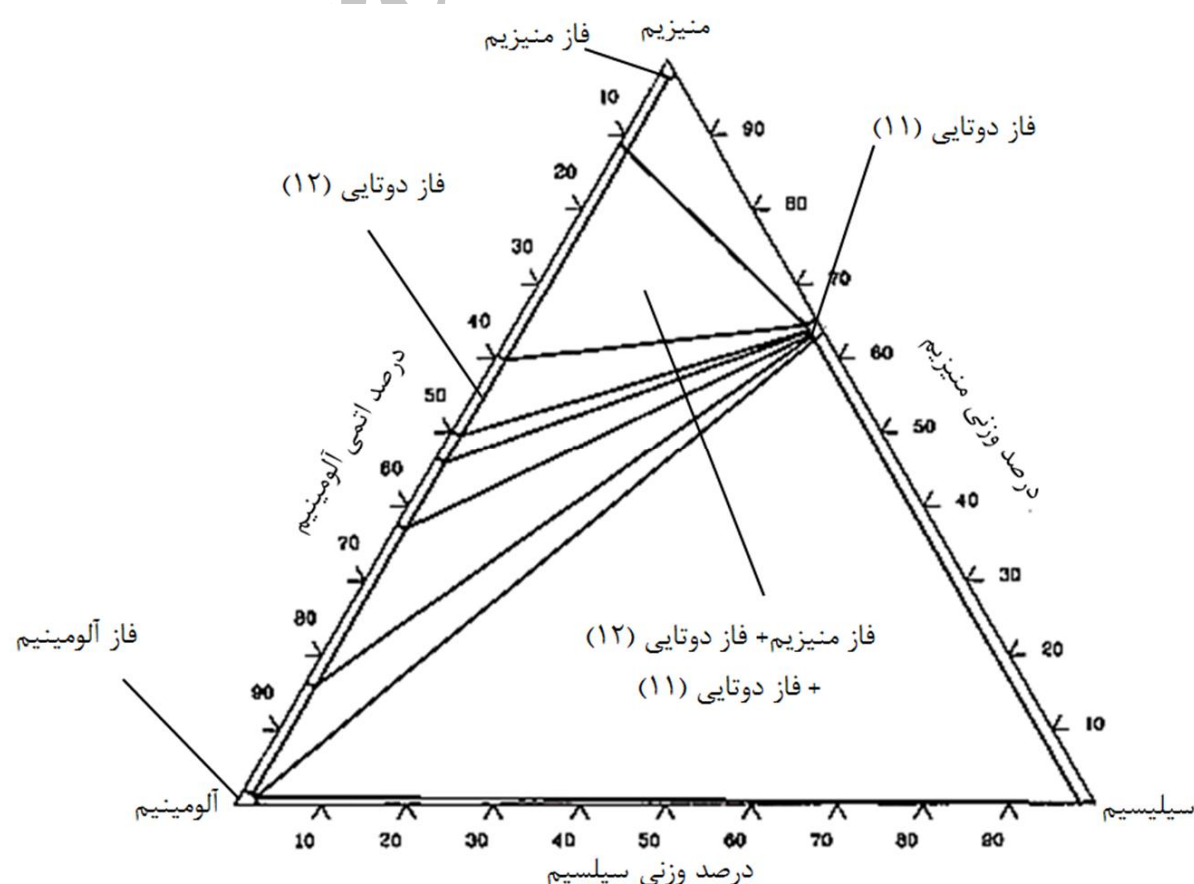
5- FeSi_2
6- Fe_2Al_5

جدول 3 نتایج آنالیز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس مربوط به نقاط مشخص شده در شکل 6 (درصد اتمی)

موقعیت	آلومینیم	آهن	سیلیسیم	منیزیم	تنگستن
(1)	69/95	26/55	3/51	0	0
(2)	70/55	16/48	12/97	0	0
(3)	86/62	0	6/40	6/97	0
(4)	76/58	0	0/36	0	23/06
(5)	67/47	21/90	10/62	0	0
(6)	72/38	13/95	13/67	0	0
(7)	84/67	4/70	10/62	0	0
(8)	69/62	25/70	4/68	0	0
(9)	69/88	10/19	18/20	1/73	0

روشن (موقعیت (4) در شکل 6) که دارای 23/06 درصد اتمی تنگستن است، و همچنین مراجعه به دیاگرام دوتایی آلومینیم - تنگستن حضور فاز بین فلزی آلومینیم - تنگستن با نسبت اتمی $^{3/1}(1/9)$ را به عنوان آخال تنگستنی، نشان می‌دهد [14]. مقایسه شکل‌های 6- ر و 6- د نشان می‌دهد که در اتصال‌های آلومینیم به فولاد ساده کربنی با پرکننده 4043 نسبت به اتصال‌های آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده 4047، سوزن‌های بین فلزی شکل گرفته در جلوی لایه ترکیب بین فلزی، تعدد بیشتری دارند. میزان غلظت عنصر آهن مطابق نتایج آنالیز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس برای نقاط (7) و (9) به ترتیب 4/70 و 10/19 است. در واقع نفوذ اتم‌های آهن تا مسافت‌های دور، در اتصال آلومینیم به فولاد ساده کربنی باعث شده است تا ترکیب‌های بین فلزی با ریخت شناسی سوزنی بیشتری در این نوع اتصال ایجاد شود. بررسی نتایج آنالیز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس برای نقاط (7) و (9) و همچنین، دیاگرام سه‌تایی آلومینیم - آهن - سیلیسیم حضور فاز ترکیب بین فلزی سه‌تایی (2) را نشان داد.

(2) که نسبت به فاز دوتایی (1) سخت‌تر است تشکیل نشود، همچنین با ورود به ساختار فاز ترکیب بین فلزی سرعت رشد آن را کاهش داده و به این صورت استحکام اتصال ایجاد شده را افزایش می‌دهد. در موقعیت (1) در شکل 6، میزان عنصر سیلیسیم در ترکیب بین فلزی 3/51 درصد اتمی است. افزایش این عنصر در موقعیت (5) به 10/62 درصد اتمی منجر به کاهش ضخامت ترکیب بین فلزی فاز دوتایی (1) حاوی سیلیسیم¹ می‌شود. میزان درصد اتمی 4/70 برای اتم‌های آهن در موقعیت (7)، واقع بر شکل 6، نشان می‌دهد که اتم‌های آهن تا مسافت‌های جلوی لایه ترکیب بین فلزی نفوذ نموده‌اند. درصد اتمی آهن در موقعیت‌های (3) و (4) که مربوط به نواحی فلز جوش هستند و از مناطق فصل مشترکی دورند، صفر است. موقعیت (3) که مربوط به فصل مشترک آلومینیم - فلز جوش است، دارای 6/97 درصد اتمی منیزیم است. بررسی دیاگرام سه‌تایی آلومینیم - منیزیم - سیلیسیم (شکل 8) و ترکیب به دست آمده از آنالیز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس در این نقطه، حضور فاز دوتایی (11)² را نشان می‌دهد. علاوه بر آن، نتیجه آنالیز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس از فاز



شکل 8 دیاگرام سه‌تایی آلومینیم - منیزیم - سیلیسیم در دمای 450 درجه سانتی‌گراد [14]

3- Al₃W

1- Fe (Al,Si)₃
2- Mg₂Si

زمان کافی برای نفوذ، به صورت فوق اشباع در ساختار فاز باقی بماند و جدایش این عنصر، شرایط را برای ایجاد فازهای بین فلزی دیگر شامل فازهای آهن-سیلیسیم² به صورت موضعی، فراهم کند [2].

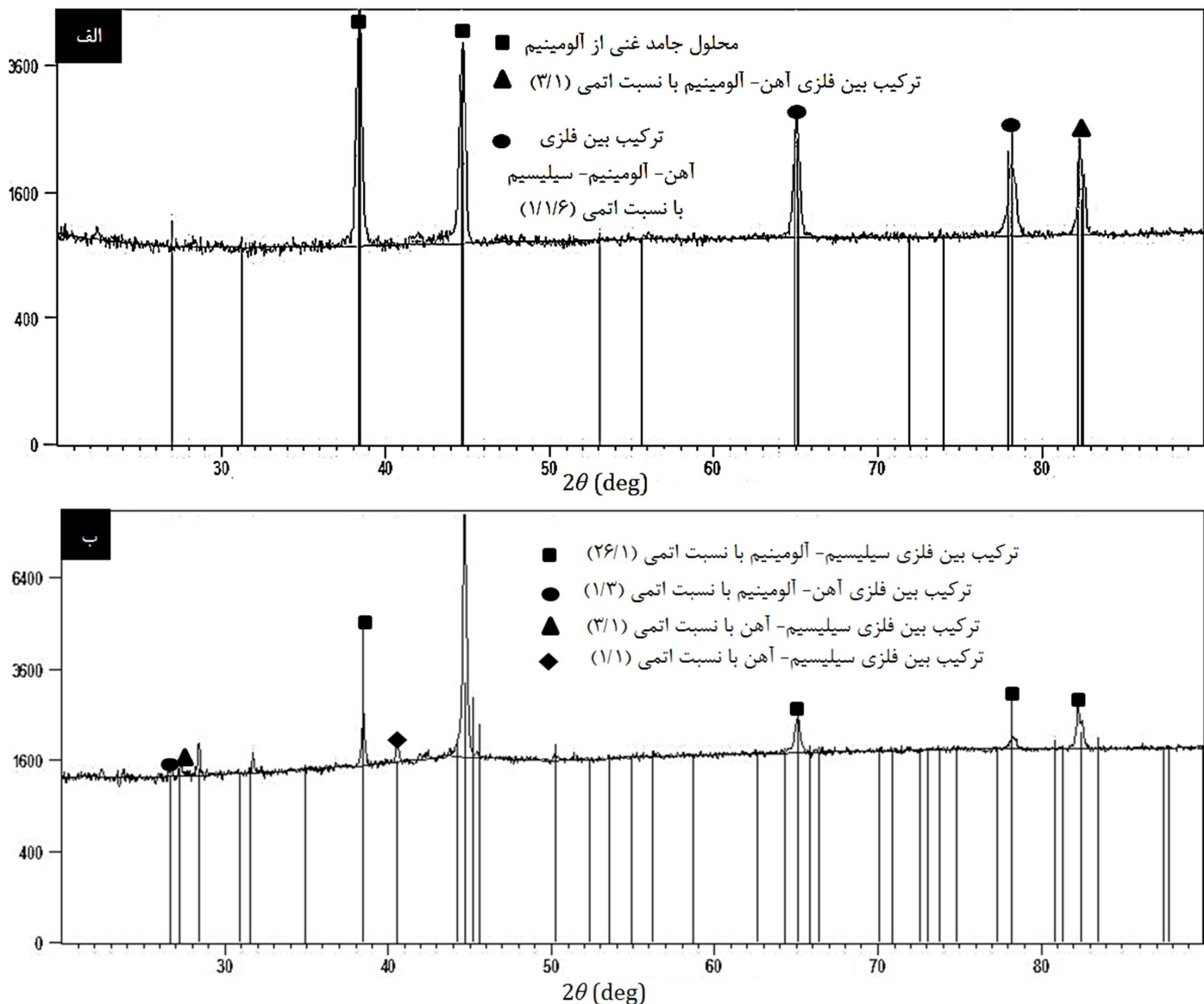
شکل 9- ب نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس را برای اتصال آلومینیم به فولاد ساده کربنی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است فاز دوتایی آهن-آلومینیم³ که انرژی آزاد گیبس آن از فازهای دوتایی (1) و (2) بیشتر است [18]، تشکیل شده است.

4- خواص مکانیکی اتصال‌ها

شکل 10 مقطع شکست نمونه‌های اتصال را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، به جز برای نمونه اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده 4047، که مسیر شکست در حوضچه جوش دور از فصل مشترک فولاد-فلز جوش بوده است، برای دیگر نمونه‌ها، شکست در ناحیه فلز جوش و از محل فصل مشترک فولاد-فلز جوش (محل لایه ترد بین فلزی و بحرانی ترین ناحیه اتصال) شروع شده است و پس از ادامه یافتن، منجر به شکست نمونه‌ها شده است. در نمونه شکل الف، مسیر پیشروی ترک در گرده جوش

شکل 9 نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس را روی صفحه شکست، در طرف فولادی، برای اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه و فولاد ساده کربنی نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل 9- الف مشخص است، حضور فاز دوتایی (1) که قبلاً تشکیل شدنش توسط بررسی نتایج آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و دیاگرام‌های سه تایی آلومینیم-آهن-سیلیسیم پیش بینی شده بود، توسط آنالیز پراش پرتو ایکس اثبات شد. این نتیجه همچنین در مرجع [17] آمده است. فازهای دیگر شامل محلول جامد آلومینیم و فاز ترکیب بین فلزی سه تایی آهن-آلومینیم-سیلیسیم¹ نیز به عنوان فازهای موجود در صفحه شکست، تشخیص داده شد. این نتایج همچنین به عنوان نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس سطح شکست توسط سانگ و همکارانش [15] بدست آمده است.

باید توجه شود که شرایط غیرتعادلی در جوشکاری و سرعت سرد شدن بالای مذاب، می‌تواند شرایط تعادلی دیاگرام‌های سه تایی را تغییر داده و بنابراین فازهایی غیر از آنچه انتظار می‌رود، تشکیل شود. به عنوان مثال سرعت بالای تشکیل فاز ترکیب بین فلزی، باعث می‌شود تا عنصر سیلیسیم که میزان حل شدنش در فاز ترکیب بین فلزی محدود است، به علت نداشتن



شکل 9 نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس در طرف فولادی مسیر شکست، الف- اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه، ب- اتصال آلومینیم به فولاد ساده کربنی

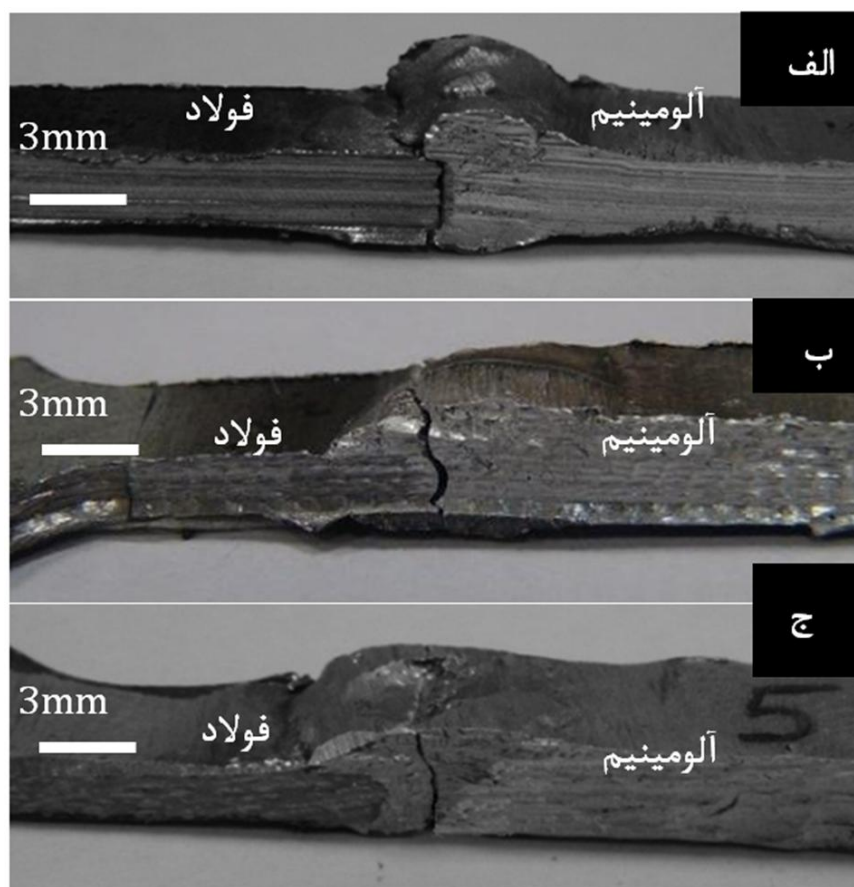
2- FeSi, FeSi₂
3- AlFe₃

1- Al_{0.5}Fe₃Si_{0.5}

- 1- اندازه ضخامت لایه بین فلزی در اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه، با تغییر پرکننده فلزی از 4043 به 4047 از 6 میکرون به 3 میکرون کاهش یافت.
- 2- برای اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه، در حرارت ورودی یکسان، اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده 4047 نسبت به اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده 4043، استحکام مکانیکی بالاتری را از خود نشان دادند. بالاترین استحکام اتصال‌های ایجاد شده با فلزات پرکننده 4047 و 4043 به ترتیب، مقادیر 170 و 120 مگاپاسکال بود.
- 3- در اتصال آلومینیم به فولاد ساده کربنی به علت طرح اتصال نامناسب، و همچنین، عدم وجود پوشش روی بر سطح فولاد، استحکام اتصال پایین، (حدود 80 مگاپاسکال) بدست آمد.
- 4- مسیر شکست برای اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده 4043 در فصل مشترک فولاد- فلز جوش که محل لایه بین فلزی ترد است، رخ داد، در حالی که این مسیر برای اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده 4047 در فلز جوش، نزدیک فصل مشترک آلومینیم- فلز جوش رخ داد.
- 5- حضور عنصر سیلیسیم در مناطق فصل مشترک فولاد- فلز جوش، تمایل اتم‌های آهن را برای حضور در این نواحی کاهش داد.
- 6- نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس حضور فاز دوتایی (1) را در صفحه شکست، اثبات نمود. علاوه بر آن فاز ترکیب بین فلزی آهن- سیلیسیم (که ناشی از فوق اشباع شدن سیلیسیم در ترکیب بین فلزی است)، نیز ایجاد شد.
- 7- نتایج آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس حضور فاز سه تایی (2) را در منطقه فلز جوش واقع در جلوی لایه ترکیب بین فلزی، نشان داد.

6-مراجع

- [1] 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*, No. 534, pp. 424- 435, 2012.
- [2] J. L. Song, S. B. Lin, C. L. Yang, G. C. Ma, H. Liu, Spreading behavior and microstructure characteristics of dissimilar metals TIG welding-brazing of aluminum alloy to stainless steel, *Materials Science and Engineering A*, No. 509, pp. 31-40, 2009.
- [3] H. Dong, L. Yang, C. Dong, S. Kou, Arc joining of aluminum alloy to stainless steel with flux-cored Zn-based filler metal, *Materials Science and Engineering A*, No. 527, pp. 7151- 7154, 2010.
- [4] H. Zhang, J. Liu, Microstructure characteristics and mechanical property of aluminum alloy/stainless steel lap joints fabricated by MIG welding-brazing process, *Materials Science and Engineering A*, No. 528, pp. 6179- 6185, 2011.
- [5] C. Dharmendra, L. Rao, J. Wilden, S. Reich, Study on laser welding-brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with azinc based filler, *Materials Science and Engineering A*, No. 528, pp. 1497-1503, 2011.
- [6] S. B. Lin, J. L. Song, C.L. Yang, C. L. Fan, D.W. Zhang, Brazability of dissimilar metals tungsten inert gas butt welding-brazing between aluminum alloy and stainless steel with Al-Cu filler metal, *Materials and Design*, No. 31, pp. 2637-2642, 2010.
- [7] J. Fan, C. Thomy, F. Vollertsen, Effect of thermal cycle on the formation of intermetallic compounds in laser welding of aluminium-steel overlap joints, *Phys. Procedia*, No. 12, pp. 134-141, 2011.
- [8] R. Borrisutthekul, T. Yachi, Y. Miyashita, Y. Mutoh, Suppression of intermetallic reaction layer formation by controlling heat flow in dissimilar joining of steel and aluminum alloy, *Materials Science and Engineering A*, No. 467, pp. 108-113, 2007.
- [9] 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*, No. 212, pp. 458- 464, 2012.
- [10] Y. Su, X. Hua, Y. Wu, Influence of alloy elements on microstructure and mechanical property of aluminium-steel lap joint made by gas metal arc welding, *J. Mater. Process. Technol.*, No. 14, pp. 750-755, 2014.
- [11] H. G. Dong, W. J. Hu, X. C. Zhang, Detachment of interfacial layers during arc-brazing of aluminium alloy to carbon steel with filler wire, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, No. 23, pp. 1583-1588, 2013.
- [12] S. Chen, L. Li, Y. Chen, J. Dai, J. Huang, Improving interfacial reaction



شکل 10 مقاطع شکست، الف - آلومینیم به فولاد ساده کربنی با پرکننده 4043، ب - آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده 4043، ج - آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده 4047

ادامه نیافته است، در حالی که این مسیر برای نمونه شکل ب در گرده جوش پیش رفته است. نتایج آزمون‌های کشش نشان داد که برای اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده 4043، بالاترین استحکام، حدود 120 مگا- پاسکال و برای اتصال ایجاد شده با پرکننده 4047 حدود 170 مگاپاسکال بدست آمد. حضور مقادیر بالاتر عنصر سیلیسیم در اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده 4047 نسبت به اتصال‌های ایجاد شده با پرکننده 4043، ضخامت لایه بین فلزی را (از 6 به 3 میکرومتر) کاهش داد، که در نتیجه استحکام افزایش یافت. همچنین بالاترین استحکام ایجاد شده برای اتصال آلومینیم به فولاد ساده کربنی با پرکننده 4043، حدود 80 مگاپاسکال به دست آمد. این استحکام پایین ناشی از طرح اتصال نامناسب و عدم لحیم کاری مناسب در طرف فولاد بود، ضمن آن که عدم وجود پوشش روی بر سطح فولاد ساده کربنی نیز در کاهش استحکام اتصال موثر بود. بنابراین می‌توان گفت که در فرآیند جوشکاری - لحیم کاری آلومینیم به فولاد علاوه بر ضخامت لایه بین فلزی، لحیم کاری مناسب در طرف فولاد نیز عامل مهم در استحکام اتصال بدست آمده می‌باشد. در این خصوص حرارت ورودی جوش می‌بایست به نحو بهینه‌ای کنترل شود طوری که ضمن کاهش ضخامت لایه بین فلزی، لحیم کاری مناسب در طرف فولاد و جوشکاری مناسب در طرف آلومینیم رخ دهد. بالاترین استحکامی که توسط دانگ و همکاران [9]، گزارش شده است، حدود 136 مگاپاسکال بوده است که نسبت به استحکام حاصل شده در این تحقیق (170 مگاپاسکال)، پایین تر است. می‌توان بیان نمود که استفاده از پرکننده 4047 در این نوع اتصال استحکام بالاتری را ایجاد نموده است.

5- نتیجه گیری و جمع بندی

در این تحقیق، جوشکاری تیگ - لحیم کاری آلیاژ آلومینیم 5083 به فولاد گالوانیزه و فولاد ساده کربنی، با دو پرکننده فلزی 4043 و 4047 انجام گرفت و ریزساختار اتصال‌ها و خواص مکانیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مهم ترین نتایج حاصل از مطالعه حاضر به شرح زیر است:

- [16] M. Pourjafari Kasmaee, M. Honarpisheh, Investigation of annealing treatment on the mechanical and metallurgical properties of explosive-welded Al/St/Al multilayer, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 397-402, 2015. (In Persian)
- [17] S. Nourouzi, M. Shakeri, M. Habibnia, Friction stir welding of dissimilar metal Al 5050 Aluminum alloy to AISI304 stainless steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 95-103, 2012. (In Persian)
- [18] J. L. Qin, Y. H. Su, S. J. Wang, Microstructures and properties of welded joint of aluminum alloy to galvanized steel by Nd:YAG laser + MIG arc hybrid brazing-fusion welding, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, No. 24, pp. 989-995, 2014.
- nonhomogeneity during laser welding-brazing aluminum to titanium, *Materials and Design*, No. 32, pp. 4408-4416, 2011.
- [13] 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*, No. 58, pp. 588-592, 2007.
- [14] ASM Handbook, *Alloy Phase Diagrams*, Vol 3, 8 Edition, 1998.
- [15] J. L. Song, S. B. Lin, C. L. Yang, C.L. Fan, Effects of Si additions on intermetallic compound layer of aluminum-steel TIG welding-brazing joint, *Journal of Alloys and Compounds*, No. 488, pp. 217-222, 2009.

Archive of SID