E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 7, Number 2, 2021



Effect of interlayer composition on the microstructure and mechanical properties of 1050 aluminum to St14 carbon steel joint via resistance spot welding method

A. Alimoradi, H. Sabet*, R. Tahavori

Department of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

Received 10 April 2021 ; Accepted 20 September 2021

Abstract

In this study, the bonding of 1050 aluminum alloy to St14 carbon steel was investigated by resistance spot welding. The variable parameters in this process were the holding time of the jaws, the power of the device and the type of interface layer to be placed between the two alloys. Aluminum powder was used as the interface layer. After welding, appearance check, shear test, microstructure and microhardness were performed. results of EDS analysis in the weld zone showed that different intermetallic compounds were observed. The thickness of the intermetallic layers that created depended on the duration of the welding process and also the intensity of the applied current in the process. The results of shear test showed that the highest shear strength among all joined sample was related to the joined sample in 7 seconds with a power of 2.5 kW and the interface layer containing 0.1% boron. The results of microhardness test showed that the highest amount of microhardness in the welding center was related to the joined sample in 7 seconds and the power of 2.5 kW was 116.9 Vickers.

Keywords: Spot resistance welding, 1050 aluminum, St14 steel.

Corresponding Author: h-sabet@kiau.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.1.4]

شاپا:2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هفتم، شماره2، پاییز و زمستان 1400



بررسی اثر نوع لایه واسط بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلومینیوم 1050 به فولاد ساده کربنی St14 از روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای

علی علی مرادی، حامد ثابت*، رامین تهوری

گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

دریافت مقاله: 1400/01/21 ؛ پذیرش مقاله: 1400/06/29

چکیده

در این پژوهش اتصال آلیاژ آلومینیوم 1050 به فولاد ساده کربنی St14 از روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای متغیر در این فرایند زمان نگه‌داری فک‌ها، توان دستگاه و نوع لایه واسط قرار گیرنده بین دو آلیاژ بود. از پودر آلومینیوم به عنوان لایه واسط استفاده شد. پس از جوشکاری، بررسی ظاهری، آزمون برش، بررسی ریزساختار و میکروسختی انجام شد. بررسی آنالیز EDS در منطقه جوش نشان داد که ترکیبات بین فلزی مختلفی مشاهده شد. ضخامت لایه‌های بین فلزی ایجاد شده به مدت زمان فرایند جوشکاری و همچنین شدت جریان اعمالی در فرایند بستگی داشت. نتایج آزمون برش نشان داد که بیشترین استحکام برشی در بین تمام نمونه‌های اتصال یافته مربوط به نمونه اتصال یافته در زمان 7 ثانیه و توان 2/5 کیلووات و لایه واسط حاوی 0/1 درصد بور بوده است. نتایج آزمون میکروسختی نشان داد که بیشترین مقدار میکروسختی در مرکز جوش، مربوط به نمونه اتصال یافته در مدت زمان 7 ثانیه و توان 2/5 کیلووات به مقدار 116/9 ویکرز بوده است.

کلمات کلیدی: جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، آلومینیوم 1050، فولاد St14.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: h-sabet@kiau.ac.ir

1- مقدمه

جوشکاری مقاومتی نقطه ای، نوعی فرایند جوشکاری است که در آن سطوح تماس بوسیله یک یا چند نقطه جوش به هم اتصال می‌یابند. این نقطه جوش‌ها از طریق گرمای حاصل از مقاومت در برابر عبور جریان الکتریسیته از میان قطعات ایجاد می‌شوند. سطوح تماس در منطقه تمرکز جریان توسط یک پالس لحظه‌ای (بسیار کوتاه مدت) از جریانی با ولتاژ کم و آمپراژ زیاد گرم می‌شوند تا دکمه جوش مذاب به وجود آید[1]. جوشکاری مقاومتی‌نقطه‌ای به طور گسترده‌ای در بدنه خودروها، وسایل خانگی، اثاثیه منزل، تولیدات ساختمانی و به میزان محدودی در ساخت قطعات هواپیما به کار برده شده است. مزیت‌های این فرایند، سرعت عملیات بالا و مناسب بودن آن

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.1.4]

برای خودکارسازی یا روباتیک سازی و امکان وارد کردن آن در خطوط تولید به همراه دیگر فرایندهای تولید است. با کنترل خودکار آمپراژ، زمان و نیروی الکترود، می‌توان نقطه جوش‌های سالم را با سرعت بالا و هزینه کارگری کم به کمک کارگران نیمه ماهر تولید کرد[1].

آلیاژ 1050 آلومینیوم به عنوان آلیاژ ساخته شده برای استفاده در انواع پروفیل‌های آلومینیومی ساخته شده به روش اکستروژن و سیستم رولینگ کاربرد دارد. این آلیاژ به سبب مقاومت بالا در برابر خوردگی و همچنین هدایت الکتریکی بالا بیشتر در صنایع الکترونیکی و شیمیایی کاربرد دارد. این دسته از آلیاژهای آلومینیوم، دارای خواص مکانیکی ضعیفی بوده و با کرنش سختی، سخت می‌شود و عملیات حرارتی ناپذیر است[2]. فولاد St14 از جمله فولادهای ساده کربنی می‌باشد که جهت مصارف کششی و شکل‌دهی ورق‌ها در بدنه خودروها، لوازم خانگی، لوازم الکتریکی کاربرد دارد[3].

اتصال فولاد و آلومینیوم کاربرد وسیعی در صنایعی همچون خودروسازی، کشتی سازی و در کاربردهایی که مقاومت به خوردگی و استحکام بالا نیاز است کاربرد دارد. اتصال این دو فلز به دلیل تفاوت زیاد در نقطه ذوب و خواص مکانیکی دارای مشکلات زیادی می باشد. روش‌های رایج ذوبی مانند قوس الکتریکی به دلیل ذوب دو فلز، باعث ایجاد ساختارهای بین فلزی و همچنین به دلیل دمای بالا سبب تغییر در ساختار و خواص مواد و همچنین ایجاد تنش باقیمانده در ناحیه جوش می‌شود. این تغییر در خواص و ساختارهای بین فلزی سبب تردی و شکنندگی ناحیه اتصال می‌شود. یکی از راه‌های غلبه بر مشکلات فوق، استفاده از لایه واسط به منظور همخوانی متالورژیکی جوش با فلزات پایه است[4].

Kanglong و همکاران [4] در مورد اتصال فولاد DP600 به آلیاژ آلومینیوم 5052 از روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مطالعاتی انجام دادند. لایه واسط در نظر گرفته شده در این پژوهش Zn بود که با ضخامت 50 میکرومتر مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده عبارتند از: ترکیبات بین فلزی آهن-آلومینیوم مثل Fe_4Al_{13}, Fe_2Al_5, $Fe_{11}Zn_{40}$ در فصل مشترک اتصال دیده شد که باعث افت استحکام برشی شد. بیشترین استحکام برشی به مقدار 7 کیلو نیوتون بوده است. ریزساختار به شدت وابسته به دمای ایجاد شده بوده است که دما نیز تابع توان دستگاه و زمان نگه داری فک‌ها می‌باشد.

Wang و همکاران [5] در مورد اتصال فولاد کم کربن گالوانیزه شده به آلیاژ آلومینیوم 6022 از روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مطالعاتی انجام دادند. آن‌ها دریافتند که سطح شکست در لایه بین فلزی به وجود آمده ترد بوده و سطح شکست در منطقه HAZ آلومینیوم نرم بوده است. بهترین جوش‌ها در اتصالات با زمان کوتاه به دست آمده بود. افزایش عرض منطقه جوش در آلومینیوم باعث افزایش استحکام برشی شده بود. Arghavani و همکاران [6] در مورد اتصال آلیاژ آلومینیوم 5052 به فولاد گالوانیزه شده St12 از روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مطالعاتی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد در حالی‌که فولاد در منطقه اتصال ذوب نشده است اما آلومینیوم در منطقه اتصال ذوب شده است و تغییر فرم داده است. افزایش جریان عبوری باعث افزایش ضخامت لایه بین فلزی شده است. اگرچه افزایش بیش از حد جریان باعث کاهش ضخامت لایه بین فلزی شده است. زمانی‌که جریان کمتر از 12 کیلو آمپر بوده است، استحکام برشی کم بوده است. به طور کلی، تغییر در جریان عبوری، باعث تغییر در تنش برشی شده است. در پژوهشی که توسط Sun و همکاران [7] انجام شد، فولاد کربن متوسط 1008 به آلیاژ آلومینیوم 5182 از روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای اتصال داده شد. آن‌ها شرایط بهینه عملیات جوشکاری از جمله شدت جریان و زمان جوشکاری و همچنین نقش نوع الکترود را در ایجاد جوش عاری از عیب مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها مشخص نمود که یک ناحیه ذوب شده در قسمت آلومینیومی اتصال به وجود آمده است که این ناحیه سبب کاهش استحکام نمونه اتصال یافته گردید. همچنین نتایج نشان داد که یک لایه نازک از ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال پدید آمده است که ضخامت این لایه وابسته به حرارت ورودی بود. آن‌ها نشان دادند که با انتخاب پارامترهای مناسب جوشکاری، می‌توان آلومینیوم را با حداقل عیب از

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.1.4]

روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای اتصال داد. در پژوهشی که توسط Cui و همکاران [8] صورت گرفت، فولاد کربن متوسط Q235 به آلیاژ آلومینیوم 6061 با استفاده از جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای انجام شد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که مقدار شدت جریان جوشکاری، تاثیر مستقیمی بر اندازه دکمه جوش و همچنین میزان استحکام شکست نمونه‌ها داشت.

نتایج نشان داد که میزان استحکام شکست جوش و همچنین اندازه قطر دکمه جوش با افزایش شدت جریان جوشکاری افزایش یافت. اما پس از مقداری مشخص این استحکام کاهش یافت. بیشترین نیروی تحمل شده توسط جوش 1500 نیوتن بود که در شدت جریان جوشکاری 12 کیلو آمپر به دست آمد. ضخامت لایه برهم کنش یافته، با حرکت از مرکز دکمه جوش به سمت فلزات پایه، کاهش یافت.

پورانوری [9] در مورد مشکلات اتصال فولاد و آلومینیوم به طور کلی مطالعاتی انجام داد. او دریافت که در اتصال بین فولاد و آلومینیوم، میزان تشکیل فاز Al_5Fe_2 بسیار اهمیت داشت. این فاز حیاتی و مهم، خود به میزان حرارتی که در فرایند به قطعه وارد می شود بستگی داشت. با افزایش حرارت ورودی، تا مقداری مشخص استحکام شکست اتصال افزایش یافته و پس از آن کاهش یافت. افزایش حرارت ورودی سبب افزایش قطر دکمه جوش شد که سبب افزایش استحکام شد. از طرفی با افزایش بیشتر حرارت ورودی، رشد ترکیبات بین فلزی خصوصا Al_5Fe_2، سبب کاهش استحکام جوش شد. هدف او از ایجاد اتصال بین فولاد و آلومینیوم، کاربرد این اتصال در خودروسازی بود.در این پژوهش اتصال آلیاژ آلومینیوم 1050 به فولاد ساده کربنی St14 از روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای متغیر در این فرایند زمان و فشار نگه‌داری فک‌ها، توان دستگاه و نوع لایه واسط قرار گیرنده بین دو فلز بود. سپس ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال مورد بررسی قرار گرفت.

2- روش تحقیق

برای انجام پژوهش، از ورق‌های آلومینیوم 1050 و فولاد St14 استفاده شد. ورق آلومینیومی دارای ضخامت 3 میلی‌متر و ورق فولادی دارای ضخامت2 میلی‌متر بودند. به منظور تطبیق ترکیب شیمیایی فولاد و آلومینیوم با ترکیب شیمیایی مورد نظر، از هرکدام از ورق‌ها، آزمون اسپکتروسکوپی نشر نوری گرفته شد. ترکیب شیمیایی آلومینیوم 1050 و فولاد St14 به ترتیب در جدول (1و2) ارائه شده است.

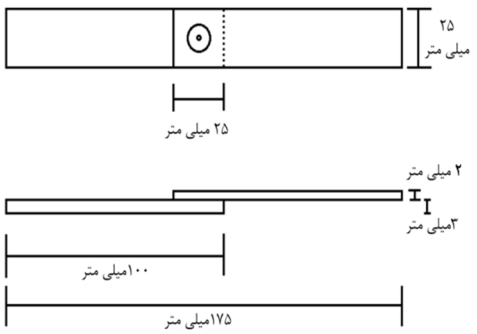
جدول 1- ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) آلومینیوم 1050.

عنصر آلیاژی	درصد
Al	99/50
Si	0/24
Fe	0/39
Cu	0/05
Mn	0/05
Mg	0/05
Ti	0/02
V	0/04
Zn	0/05

جدول 2- ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) فولاد St14.

Fe	C	S	P	Mn
99/50	0/07	0/02	0/03	0/38

به منظور انجام عملیات جوشکاری، ورق‌ها به ابعاد 100×25 میلی‌متر مطابق با استاندارد AWS D10.6 (شکل 1) تهیه شدند به نحوی‌که در مجموع تعداد 54 قطعه از هرکدام از آلیاژهای فولاد و آلومینیوم توسط گیوتین برش داده شد.



شکل 1- ابعاد قطعه مورد استفاده برای انجام جوشکاری بر اساس استاندارد AWS D10.6.

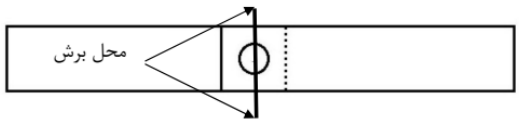
به منظور انجام جوشکاری، نمونه‌ها مطابق با جدول(5) کدگذاری شدند. لازم به ذکر است که لایه‌های واسط به دلیل

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.1.4]

همخوانی متالورژیکی با فلزات پایه، ریخته‌گری و استفاده شدند. بدین ترتیب که ابتدا مذابی با ترکیب مد نظر تهیه شد و پس از ریخته گری با استفاده از آسیاب تبدیل به پودر شده و پودر آن به عنوان لایه واسط استفاده شد. دستگاه جوشکاری مورد استفاده MTT-30 بود که دارای توان حداکثر 30 کیلوولت بود و الکترودهایی مسی با قطر 8 میلی‌متر داشت. پس از انجام جوشکاری، بررسی ظاهری از نمونه‌ها به عمل آمد. از آنجا که تعدادی از نمونه‌ها پس از جوشکاری و قبل از آزمون برش شکسته شدند، دوباره با همان شرایط جوشکاری شدند. اما شکست مجدد آن‌ها سبب شد تا این نمونه‌ها در بررسی ظاهری مردود اعلام شوند. به منظور آماده سازی نمونه‌ها برای انجام متالوگرافی، از استاندارد ASTM E3 استفاده گردید. برای انجام بررسی ریز ساختار اتصال، نمونه‌ها از محل دکمه جوش، به صورت عرضی بریده شدند بعد از برش قطعات و پس از انجام آماده‌سازی سطحی شامل سوهان زنی، سنباده‌زنی (به ترتیب از 100، 400، 600، 800، 1000، 1500، 2000، 2500و 3000) و سپس پولیش (با محلول پودر آلومینا و آب به نسبت 1 به 20)، قطعات جهت انجام حکاکی با محلول ماربل آماده شدند و بررسی ریزساختار با کمک یک دستگاه میکروسکوپ نوری مدل Meiji انجام شد.

شکل (2) شماتیک محل برش نمونه‌ها و جدول (3) ترکیب شیمیایی محلول حکاکی مورد استفاده را ارائه می‌دهد. جهت بررسی دقیق‌تر ریزساختار حاصل در محل اتصال، بررسی به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل SEM SERON TECH Ais2300c با مود تصویربرداری الکترون ثانویه و ولتاژ کاری30KV انجام شد. همچنین، آنالیز خطی از نمونه‌ها تهیه شد. جهت آزمون برش (کشش)، از دستگاه کشش C-100 SANTAM مطابق با استاندارد AWS D10.6 استفاده شد (شکل3). سرعت کشش دستگاه روی 2 میلی‌متر بر دقیقه تنظیم گردید. برای آزمون کشش تعداد 2 نمونه در نظر گرفته شد. متوسط استحکام به عنوان استحکام کششی-برشی برای آن شرایط در نظر گرفته شد.

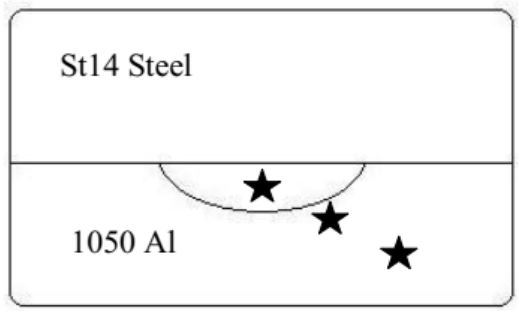
آزمون میکروسختی نیز مطابق استاندارد ASTME384 با دستگاه HVS-1000 و قابلیت اندازه‌گیری سختی برحسب معیار ویکرز انجام شد. برای هر نمونه، آزمون میکروسختی بر روی 3 نقطه از مرکز دکمه جوش به سمت فلز پایه انجام شد. لازم به ذکر است که مقدار نیروی اعمالی (F) 100 گرم و زمان اثر (T) نیز 10 ثانیه تنظیم گردید. شکل (3) شماتیک نقاط برای آزمون میکروسختی را نشان می دهد.



شکل 2- محل نمونه برداری از قطعات برای بررسی‌های میکروسکوپی.

جدول 3- ترکیب شیمیایی محلول حکاکی مورد استفاده (ماربل).

نوع ماده مصرفی	CuSO4	HCl	آب
مقدار مصرف	gr10	ml 50	ml50



شکل 3- شماتیک نقاط میکروسختی گرفته شده.

3- نتایج و بحث

همانطور که گفته شد، تعدادی از نمونه‌ها پس از انجام جوشکاری شکسته شدند و استحکام کافی برای رسیدن به آزمون برش را نداشتند. جدول (4) نمونه‌های معیوب را ارائه می‌دهد.جدول (5) نتایج آزمون کشش (برش) برای نمونه‌های مختلف را ارائه می‌دهد.

به منظور مقایسه بهتر نمونه‌ها، نمودار مقایسه‌ای استحکام نمونه‌ها برحسب زمان‌های مختلف ارائه شده است. شکل (4) نمودار مقایسه‌ای استحکام نمونه‌های اتصال یافته در زمان 4 ثانیه را ارائه می‌دهد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.1.4]

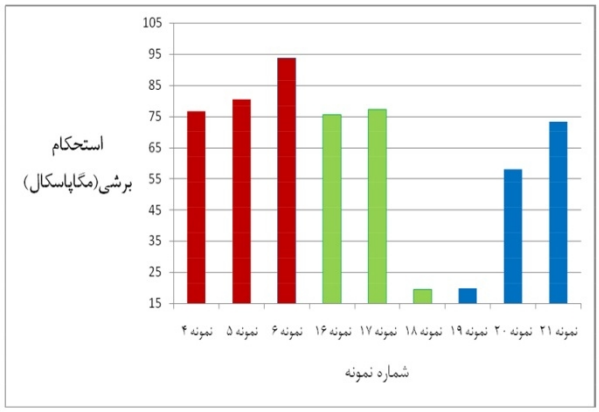
جدول 4- نمونه‌های معیوب در بررسی ظاهری.

کد	توان (کیلو	زمان	لایه واسط	نتیجه
9	2/5	7	- Cu- %4/5Al	مردود
11	7/5	5	- Cu -%4/5Al	مردود
14	2/5	5	- Cu -%4/5Al	مردود
25	7/5	7	-	مردود
26	7/5	7	- Cu -%4/5Al	مردود
27	7/5	7	- Cu- %4/5Al	مردود

جدول 5- نحوه کدگذاری نمونه‌ها و نتایج آزمون کشش (برش) برای نمونه‌های مختلف.

کد نمونه	توان (کیلو وات)	زمان (ثانیه)	لایه واسط	قطر جوش (mm)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	استحکام برشی (MPa)
۱	۵	۵	-	۴	۳۳۱/۱±۰/۱	۶۶۲/۲±۰/۱	۵۲/۷±۰/۱
۲	۵	۵	Al -٪۴/۵ Cu - ٪۰/۱ B	۴	۴۰۵/۷±۰/۱	۸۰۹/۳±۰/۱	۶۴/۴±۰/۱
۳	۵	۵	Al - ٪۴/۵ Cu - ٪۰/۵ B	۴	۳۰۰/۴±۰/۱	۸۷۰/۶±۰/۱	۶۹/۳±۰/۱
۴	۷/۵	۴	-	۴	۶۶۳/۷±۰/۱	۹۶۲/۶±۰/۱	۷۶/۶±۰/۱
۵	۷/۵	۴	Al -٪۴/۵ Cu - ٪۰/۱ B	۴	۵۰۸/۹±۰/۱	۱۰۱۱/۷±۰/۱	۸۰/۵±۰/۱
۶	۷/۵	۴	Al - ٪۴/۵ Cu - ٪۰/۵ B	۴	۵۸۸/۶±۰/۱	۱۱۷۷/۲±۰/۱	۹۳/۷±۰/۱
۷	۷/۵	۵	-	۴	۶۸۶/۷±۰/۱	۱۳۶۷/۳±۰/۱	۱۰۸/۸±۰/۱
۸	۲/۵	۷	Al -٪۴/۵ Cu - ٪۰/۱ B	۴	۷۷۸/۷±۰/۱	۱۵۵۷/۳±۰/۱	۱۲۳/۹±۰/۱
۹	۲/۵	۷	Al - ٪۴/۵ Cu - ٪۰/۵ B	۴	-	-	-
۱۰	۲/۵	۷	-	۴	۷۳۵/۸±۰/۱	۱۴۶۵/۴±۰/۱	۱۱۶/۶±۰/۱
۱۱	۷/۵	۵	Al -٪۴/۵ Cu - ٪۰/۱ B	۴	-	-	-
۱۲	۷/۵	۵	Al - ٪۴/۵ Cu - ٪۰/۵ B	۴	۳۰۶/۶±۰/۱	۷۱۱/۲±۰/۱	۵۶/۶±۰/۱
۱۳	۲/۵	۵	-	۴	۴۱۶/۹±۰/۱	۸۲۷/۷±۰/۱	۶۵/۸±۰/۱
۱۴	۲/۵	۵	Al -٪۴/۵ Cu - ٪۰/۱ B	۴	-	-	-
۱۵	۲/۵	۵	Al - ٪۴/۵ Cu - ٪۰/۵ B	۴	۳۹۲/۴±۰/۱	۷۷۸/۷±۰/۱	۶۱/۹±۰/۱
۱۶	۵	۴	-	۴	۴۷۲/۱±۰/۱	۹۵۰/۳±۰/۱	۷۵/۶±۰/۱
۱۷	۵	۴	Al -٪۴/۵ Cu - ٪۰/۱ B	۴	۴۸۴/۴±۰/۱	۹۶۸/۷±۰/۱	۷۷/۱±۰/۱
۱۸	۵	۴	Al - ٪۴/۵ Cu - ٪۰/۵ B	۴	۴۲/۹±۰/۱	۲۴۵/۳±۰/۱	۱۹/۵±۰/۱
۱۹	۲/۵	۴	-	۴	۶۷/۴±۰/۱	۲۴۹/۳±۰/۱	۱۹/۸±۰/۱
۲۰	۲/۵	۴	Al -٪۴/۵ Cu - ٪۰/۱ B	۴	۳۶۱/۷±۰/۱	۷۲۹/۶±۰/۱	۵۸/۰±۰/۱
۲۱	۲/۵	۴	Al - ٪۴/۵ Cu - ٪۰/۵ B	۴	۴۵۹/۸±۰/۱	۹۱۹/۷±۰/۱	۷۳/۲±۰/۱
۲۲	۵	۷	-	۴	۵۵۷/۹±۰/۱	۱۱۱۵/۹±۰/۱	۸۸/۸±۰/۱
۲۳	۵	۷	Al -٪۴/۵ Cu - ٪۰/۱ B	۴	۵۸۲/۵±۰/۱	۱۱۷۱/۱±۰/۱	۹۳/۲±۰/۱
۲۴	۵	۷	Al - ٪۴/۵ Cu - ٪۰/۵ B	۴	۷۱۷/۴±۰/۱	۱۴۳۴/۷±۰/۱	۱۱۴/۲±۰/۱
۲۵	۷/۵	۷	-	۴	-	-	-
۲۶	۷/۵	۷	Al -٪۴/۵ Cu - ٪۰/۱ B	۴	-	-	-
۲۷	۷/۵	۷	Al - ٪۴/۵ Cu - ٪۰/۵ B	۴	-	-	-

پارامترهای موثر بر ریز ساختار ناحیه اتصال و همچنین میزان حرارت ورودی‌بر این ناحیه، به طور مستقیم برخواص مکانیکی ناحیه جوش تاثیرگذار است. همانطورکه در شکل (4) دیده می‌شود، در نمونه‌های اتصال یافته در مدت زمان 4 ثانیه و توان 7/5 کیلووات (نمونه‌های شماره 4 تا 6)، با افزایش درصد عنصر بور استحکام برشی افزایش یافته است. علت افزایش استحکام ناشی از ریزتر شدن دانه‌ها در اثر افزایش عنصر بور است. عنصر بور در آلیاژ آلومینیوم سبب افزایش ریزدانگی می‌شود[10].



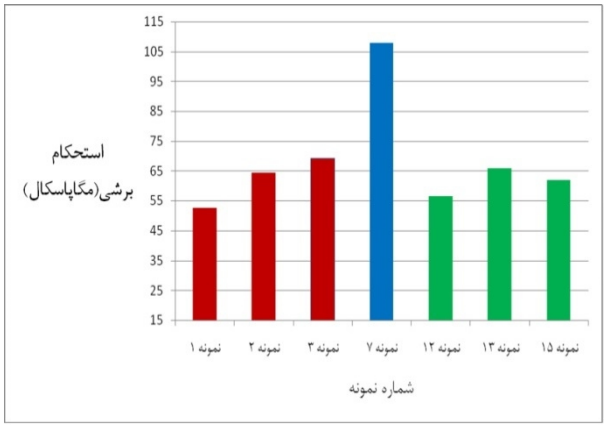
شکل 4- نمودار مقایسه‌ای استحکام نمونه‌های اتصال یافته در زمان 4 ثانیه.

در مورد نمونه‌های اتصال یافته در زمان 4 ثانیه و توان 5 کیلووات (نمونه‌های شماره 16 تا 18)، مقدار استحکام برشی نسبت به نمونه‌های شماره 1 تا 3 کاهش داشته است. این بدان معنی است که در زمان یکسان 4 ثانیه، نمونه‌های اتصال یافته با توان 7/5 کیلووات، استحکام برشی بهتری از خود نشان دادند. در نمونه‌های اتصال یافته در مدت زمان 4 ثانیه و توان 2/5 کیلووات (نمونه‌های شماره 19 تا 21)، استحکام برشی نسبت به هر دو توان 5 و 7/5 کاهش داشته است. همچنین در نمونه‌های‌جوشکاری شده در زمان 4 ثانیه و توان 2/5 کیلووات، با افزایش درصد عنصر بور، استحکام برشی به طرز چشمگیری افزایش یافته است. به طور کلی در نمونه‌های اتصال یافته در زمان 4 ثانیه، بهترین استحکام برشی مربوط به نمونه اتصال یافته حاوی لایه واسط 0/5 درصد بور و توان 7/5 کیلووات (نمونه6) به مقدار 93/7 مگاپاسکال بوده است. کمترین استحکام برشی در نمونه‌های اتصال یافته در زمان 4 ثانیه، مربوط به نمونه اتصال یافته با لایه واسط حاوی 0/5 درصد بور و توان 5 کیلووات (نمونه 18) به مقدار 19/5 مگاپاسکال بوده است. می‌توان این نتیجه را گرفت که برای اتصال نمونه‌ها در زمان 4 ثانیه، بهترین توان مقدار 7/5 کیلووات می‌باشد.

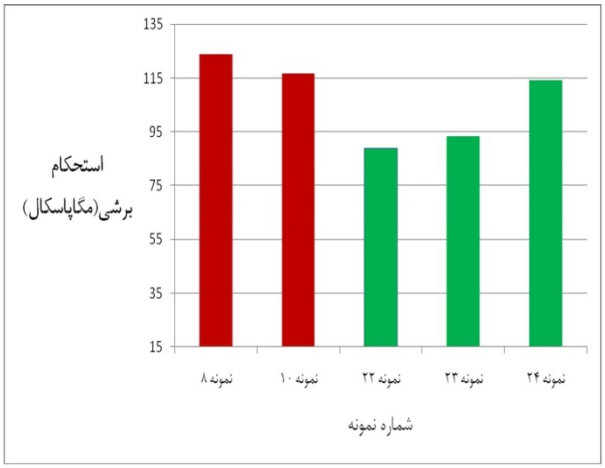
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.1.4]

شکل(5) نمودار مقایسه‌ای استحکام نمونه‌های اتصال یافته در زمان 5 ثانیه را ارائه می‌دهد.



شکل 5- نمودار مقایسه‌ای استحکام نمونه‌های اتصال یافته در زمان 5 ثانیه.



شکل 6- نمودار مقایسه ای استحکام نمونه‌های اتصال یافته در زمان 7 ثانیه.

همانطورکه در شکل (5) دیده می‌شود، بیشترین استحکام برشی در نمونه‌های اتصال یافته در زمان 5 ثانیه، مربوط به نمونه اتصال یافته با توان 7/5 کیلووات و بدون لایه واسط به مقدار 108/8 مگاپاسکال می‌باشد. در مورد نمونه‌های اتصال یافته در زمان 5 ثانیه و توان 5 کیلووات (نمونه‌های شماره 1 تا3)، همانطور که دیده می‌شود، افزایش درصد عنصر بور سبب شده تا استحکام برشی بهبود یابد. مقدار استحکام برشی برای نمونه شماره 1 (بدون لایه واسط)، 52/7 مگاپاسکال بوده است در حالی‌که با افزایش میزان بور در لایه واسط به 0/1 و 0/5 درصد، مقدار استحکام برشی برای نمونه‌های شماره 2 و3 به 64/4 و 69/3 رسیده است. دو نمونه شماره 11 و 14 در این گروه مردود شده و به آزمون کشش نرسیده‌اند. در مورد نمونه‌های اتصال یافته در زمان 5 ثانیه و توان 7/5 کیلووات (نمونه‌های شماره 13 تا 15)، نمونه شماره 13 دارای استحکام برشی به مقدار 65/8 مگاپاسکال بوده است که با افزایش درصد عنصر بور به 0/5 درصد در لایه واسط (نمونه شماره 15)، استحکام برشی به 61/9 کاهش پیدا کرده است. شکل (6) نمودار مقایسه‌ای استحکام نمونه‌های اتصال یافته در زمان 7 ثانیه را ارائه می‌دهد.

همانطورکه در شکل (6) دیده می‌شود، نمونه‌های اتصال یافته در زمان 7 ثانیه و 2/5 کیلووات (نمونه‌های شماره 8 تا 10)، استحکام بالایی را از خود نشان داده‌اند. به‌جز نمونه شماره 9 که حاوی 0/5 درصد بور در لایه واسط بوده است. بیشترین استحکام برشی در بین این گروه و همچنین در بین تمام نمونه‌های اتصال یافته مربوط به نمونه اتصال یافته در زمان 7 ثانیه و توان 2/5 کیلووات و لایه واسط حاوی 0/1 درصد بور (نمونه شماره 8) بوده است.

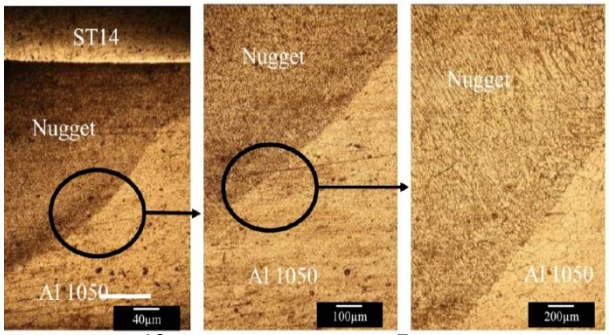
در مورد نمونه‌های اتصال یافته در مدت زمان 7 ثانیه و توان 5 کیلووات (نمونه‌های شماره 22 تا 24)، نمونه اتصال یافته بدون لایه واسط دارای استحکام برشی 88/8 مگاپاسکال بود که با افزایش درصد عنصر بور در لایه واسط در نمونه‌های شماره 23 و 24، مقدار استحکام برشی به 93/2 و 114/2 مگاپاسکال رسید. تمام نمونه‌های اتصال یافته در مدت زمان 7 ثانیه و با توان 7/5 کیلووات، چه با لایه واسط و چه بدون لایه واسط مردود شدند.

در توضیح علت مردودی این نمونه‌ها می‌توان گفت که با افزایش توان دستگاه و زمان جوشکاری (و به تبع آن افزایش حرارت ورودی)، وسعت ناحیه متاثر از حرارت گسترش یافته و در نتیجه ناحیه فرا پیر شده در بخش آلومینیوم ایجاد می‌شود که دارای خواص مکانیکی ضعیف‌تری نسبت به سایر نواحی است[11]. از سمت دیگر با افزایش بیش از حد حرارت ورودی، ضخامت لایه ترکیب بین فلزی ایجاد شده نیز افزایش‌یافته و در نتیجه این ناحیه که ترد و شکننده است سبب ضعف ساختار و افت خواص مکانیکی شده است [12].

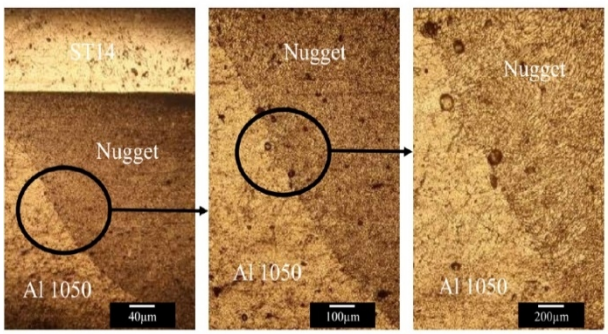
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.1.4]

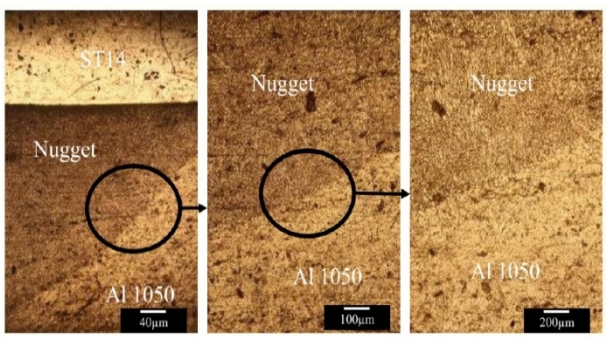
شکل‌های (7تا12)ریزساختار نمونه‌های منتخب را نشان می‌دهد. همانطورکه در شکل‌های (7 تا 12) دیده می‌شود، اندازه دکمه جوش و اندازه و شکل دانه در دکمه جوش نمونه‌ها با یکدیگرمتفاوت است. هرچه اندازه دکمه جوش بزرگتر باشد، استحکام افزایش خواهد یافت اما این افزایش استحکام تا یک مقدار مشخص می‌باشد. پس از آن به دلیل افزایش حرارت ورودی اندازه دانه‌ها بزرگ شده که سبب افت استحکام خواهد شد[13].



شکل 7- ریزساختار نمونه شماره 10.

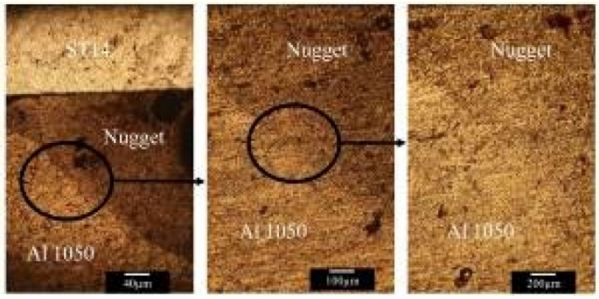


شکل 8- ریزساختار نمونه شماره 19.

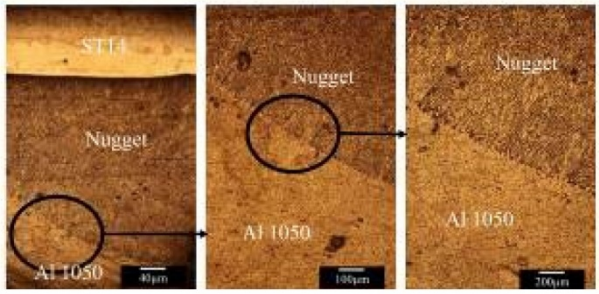


شکل 9- ریزساختار نمونه شماره 8.

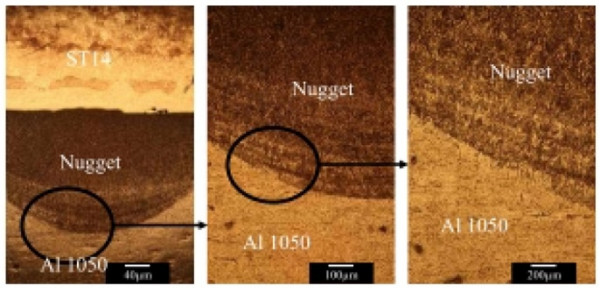
شکل‌های (13 و 14) نتایج آزمون آنالیز خطی برای دو نمونه منتخب به ترتیب شماره 8 و 24 را نشان می‌دهد.



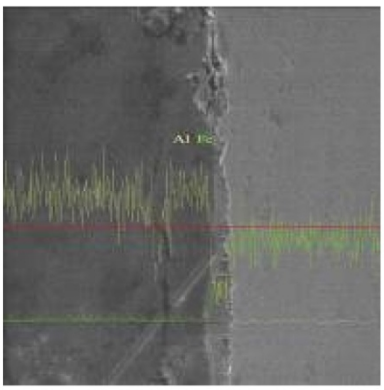
شکل 10- ریزساختار نمونه شماره 20.



شکل 11- ریزساختار نمونه شماره 24.



شکل 12- ریزساختار نمونه شماره 18.



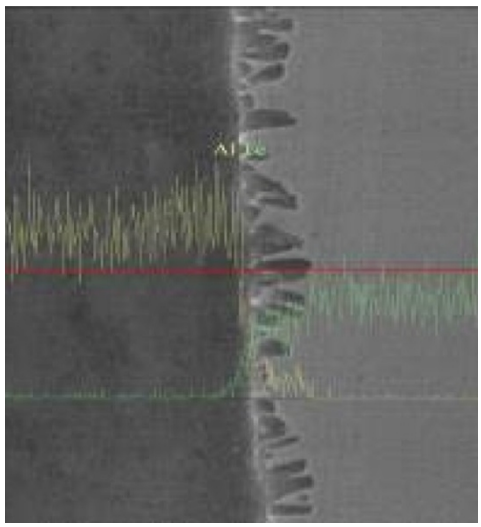
شکل 13- نتایج آزمون آنالیز خطی برای نمونه شماره 8.

همانگونه که در آزمون آنالیز خطی گرفته شده از فصل مشترک جوش نمونه شماره 8 (شکل 13) مشاهده می‌گردد، یک لایه شکل‌های (13 و 14) نتایج آزمون آنالیز خطی برای دو نمونه منتخب به ترتیب شماره 8 و 24 را نشان می‌دهد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.1.4]

همانگونه که در آزمون آنالیز خطی گرفته شده از فصل مشترک جوش نمونه شماره 8 (شکل 13) مشاهده می‌گردد، یک لایه واکنشی به صورت مشهود در مرز بین دو زیرلایه Al و Fe مشاهده می گردد، در سمت چپ زیرلایه Al و در سمت راست زیرلایه Fe و در فصل مشترک با توجه به دیاگرام فازی و میل ترکیبی بالای بین آهن و آلومینیوم، احتمال تشکیل یک لایه واکنش (ترکیب بین فلزی FeYAlX) وجود دارد. تشکیل این لایه از سویی سبب خواهد شد تا استحکام اتصال افزایش یابد. ولی با توجه به ماهیت ترد بودن ترکیبات بین فلزی، وسعت این ناحیه اهمیت دارد. وسعت بالای این ناحیه منجر به کاهش خواص مکانیکی خواهد شد. در این تحقیق وجود عنصر مس و همچنین بور در ترکیب لایه واسط موجب خواهد شد تا با توجه به تغییرات ساختاری در ترکیب بین فلزی، میزان تردی ساختار کاهش یابد و استحکام آن افزایش یابد. در نمونه شماره 24 (شکل 14) نیز وجود ترکیب بین فلزی و تغییرات ترکیب در فصل مشترک مشاهده می‌گردد که نشان دهنده تشکیل لایه ترکیب بین فلزی در فصل مشترک است. جدول(6) مقدار اندازه دانه و عرض دکمه جوش را برای نمونه‌های منتخب ارائه می‌دهد.



شکل 14- نتایج آزمون آنالیز خطی برای نمونه شماره 24.

همانطورکه در جدول (6) مشاهده می‌شود، بیشترین عرض دکمه جوش مربوط به نمونه شماره 24 به مقدار 1065 میکرومتر و کمترین عرض دکمه جوش مربوط به نمونه 18 به مقدار 575 میکرومتر بوده است. مقدار عرض دکمه جوش به طور مستقیم به حرارت ورودی وابسته است[14]. با افزایش توان و زمان جوشکاری، عرض دکمه جوش افزایش می یابد که در استحکام دهی اتصال مطلوب است. اما از طرفی اندازه دانه‌ها در ناحیه دکمه جوش نیز در استحکام موثر است. هرچه اندازه دانه در ناحیه اتصال کوچکتر باشد، استحکام جوش بالاتر خواهد بود[15]. در جدول (6) مشاهده می‌شود که کمترین اندازه دانه در دکمه جوش مربوط به نمونه شماره 24 به مقدار 19 میکرومتر و بیشترین اندازه دانه در دکمه جوش مربوط به نمونه شماره 19 به مقدار 28 میکرومتر می‌باشد. افزایش عنصر بور در لایه واسط نمونه 24 سبب ریزترشدن دانه‌ها در این نمونه شد که سبب بهبود استحکام این نمونه شد.

جدول 6- مقدار اندازه دانه و عرض دکمه جوش برای نمونه‌های منتخب.

کد نمونه	توان (کیلو وات)	زمان (ثانیه)	لایه واسط	قطر دکمه جوش (mm)	عرض دکمه جوش (µm)	اندازه دانه در دکمه جوش (µm)
۸	۲/۵	۷	Al -٪۴/۵ Cu - ٪۰/۱ B	۴±۰/۱	۹۴۵±۱	۲۴±۰/۱
۱۰	۲/۵	۷	-	۴±۰/۱	۹۲۰±۱	۲۵±۰/۱
۱۸	۵	۴	Al - ٪۴/۵ Cu - ٪۰/۵ B	۴±۰/۱	۵۷۵±۱	۲۶±۰/۱
۱۹	۲/۵	۴	-	۴±۰/۱	۷۴۰±۱	۲۸±۰/۱
۲۰	۲/۵	۴	Al -٪۴/۵ Cu - ٪۰/۱ B	۴±۰/۱	۷۸۵±۱	۲۷±۰/۱
۲۴	۵	۷	Al - ٪۴/۵ Cu - ٪۰/۵ B	۴±۰/۱	۱۰۶۵±۱	۱۹±۰/۱

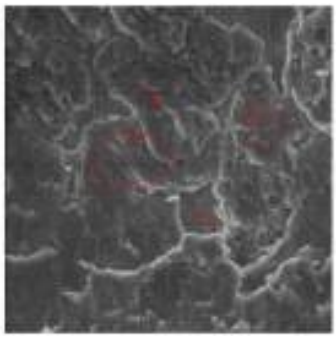
یکی از مهمترین موارد پیش رو در اتصال دهی فولاد و آلومینیوم، ایجاد ترکیبات بین فلزی ترد و شکننده بین آهن و آلومینیوم است که منجر به افت استحکام و مقاومت به ضربه اتصال خواهد شد. در شرایط دمایی و ترکیبی متفاوت که بواسطه نفوذ عناصر آلیاژی در فصل مشترک حین فرایند جوشکاری مقاومتی در حال ذوب یا ذوب جزیی آلومینیوم بوجود می‌آید، ترکیبات بین فلزی متفاوتی به صورت Fex Aly نظیر Fe3Al و FeAl بوجود می آید. ترکیبات بین فلزی بوجود آمده ماهیت بسیار ترد و شکننده دارد و دارای سختی بالایی است[16]. شکل‌های (15 تا 17) نتایج آنالیز نقطه‌ای برای نمونه‌های مختلف را ارائه می‌دهد.

همانطورکه در شکل (15) دیده می‌شود، در نقطه شماره 3 این نمونه، درصد اتمی آلومینیوم حدود 22 درصد و درصد اتمی

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.1.4]

آهن حدود 61 درصد می‌باشد. این بدان معنی است که در این نمونه فاز Fe3Al وجود دارد. در شکل(16) هر سه نقطه آنالیز گرفته شده محلول جامد آلومینیوم را نشان می‌دهد و ترکیب بین فلزی تشکیل نشده است. در شکل(17) نیز دیده می‌شود که در نمونه شماره 24، با توجه به درصد اتمی تقریبا برابر آهن و آلومینیوم (حدود 48 درصد)، فاز FeAl تشکیل شده است. بررسی آنالیز EDS در منطقه جوش نشان می‌دهد که ترکیبات ایجاد شده در نزدیک لایه فولادی عمدتاً ترکیبات بین فلزی غنی‌تر از آهن و در قسمت نزدیک به آلیاژ آلومینیوم ترکیبات بین فلزی غنی‌تر از آلومینیوم هستند. ضخامت لایه‌های بین فلزی ایجاد شده به مدت زمان فرایند جوشکاری و همچنین شدت جریان اعمالی در فرایند بستگی دارد. به بیان دیگر عوامل یاد شده به‌طور مستقیم حرارت ورودی را در ناحیه اتصال افزایش داده و در نتیجه بر ضخامت لایه‌های ترکیبات بین فلزی ایجاد شده تاثیر گذار است. همانطور که از نتایج شکل‌های (15 تا 17) مشاهده می‌شود، با افزایش زمان جوشکاری، مدت زمان قرارگیری نمونه در دماهای بالاتر از نقطه ذوب آلومینیوم افزایش می‌یابد و در نتیجه این مساله بر روی ایجاد لایه‌های ترکیبات بین فلزی موثر است [17].

نحوه ایجاد اتصال بین فولاد و آلومینیوم را می‌توان در چند مرحله توضیح داد. در مرحله اول اتصال، ذوب آلومینیوم در دمایی حدود 915 الی 985 درجه سانتی‌گراد رخ می دهد که در فصل مشترک بین فولاد و آلومینیوم گسترش می‌یابد. در این مرحله نفوذ آلومینیوم و آهن در یکدیگر رخ می‌دهد. به سبب آنکه نفوذ اتم‌های آهن در آلومینیوم دارای انرژی اکتیواسیون کمتری است، آهن به سرعت در آلومینیوم پراکنده می شود. پس از آن به سبب افزایش غلظت آهن در آلومینیوم و رسیدن ترکیب شیمیایی به ترکیب مورد نیاز جهت تشکیل فازهای بین فلزی غنی از آهن، جوانه زنی در فصل مشترک آهن- آلومینیوم رخ می‌دهد. سپس ترکیبات بین فلزی ایجاد می شود که در آن جوانه‌ها رشد یافته و به هم متصل شده و در نتیجه فاز پیوسته ترکیب بین فلزی در فصل مشترک ایجاد می‌شود. در مرحله آخر زبانه‌های فاز بین فلزی در اثر نفوذ بیشتر اتم‌های آهن و آلومینیوم رخ می‌دهد که در این مرحله نفوذ آهن در آلومینیوم از طریق لایه بین فلزی در فصل مشترک رخ می‌دهد [18]. جدول (7) نتایج آزمون ریزسختی را ارائه می‌دهد.



Elt.	Atomic %	Conc
O	7.328	4.386
Al	90.612	91.453
Si	0.175	0.184
Fe	1.743	3.642
Cu	0.141	0.335
	100.000	100.000

Elt.	Atomic %	Conc
O	10.256	6.100
Al	86.167	86.420
Fe	3.379	7.014
Cu	0.197	0.466
	100.000	100.000

Elt.	Atomic %	Conc
O	9.954	6.003
Al	87.867	89.363
Fe	2.018	4.248
Cu	0.161	0.387
	100.000	100.000

Elt.	Atomic %	Conc
O	14.961	5.528
Al	22.911	14.277
Fe	61.801	79.714
Cu	0.327	0.480
	100.000	100.000

شکل 15- نتایج آنالیز نقطه ای برای نمونه شماره 8.

همانطورکه در جدول (7) دیده می‌شود، بیشترین مقدار ریزوسختی در مرکز جوش، مربوط به نمونه شماره 24 (نمونه اتصال یافته در مدت زمان 7 ثانیه و توان 5 کیلووات و لایه واسط 0/5 درصد بور) به مقدار 187/17 ویکرز بود. افزایش عنصر بور در این نمونه سبب شده تا دانه‌های ریزتری شکل بگیرد که سبب افزایش ریزسختی شده است. کمترین مقدار ریزوسختی در مرکز جوش، مربوط به نمونه شماره 19 (نمونه اتصال یافته در مدت زمان 4 ثانیه و توان 2/5 کیلووات) به مقدار 71/93 ویکرز بود. عدم وجود عنصر بور در این نمونه (که سبب افزایش ریزدانگی می‌شود)، سبب شده تا دانه‌های درشت‌تری تشکیل شود و مقدار ریزسختی این نمونه کاهش یابد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.1.4]

جدول 7- نتایج آزمون ریزسختی .

کد نمونه	توان (کیلو وات)	زمان (ثانیه)	لایه واسط	میکروسختی در مرکز جوش (ویکرز)	میکروسختی در HAZ آلومینیوم (ویکرز)	میکروسختی در فلز پایه (ویکرز)
۸	۲/۵	۷	Al -٪۴/۵ Cu - ٪۰/۱ B	۱۲۰/۱±۰/۱	۱۰۳/۵±۰/۱	۲۴/۷±۰/۱
۱۰	۲/۵	۷	-	۹۵/۶±۰/۱	۸۲/۸±۰/۱	۲۴/۶±۰/۱
۱۸	۵	۴	Al - ٪۴/۵ Cu - ٪۰/۵ B	۸۰/۴±۰/۱	۶۸/۶±۰/۱	۲۴/۶±۰/۱
۱۹	۲/۵	۴	-	۷۱/۹±۰/۱	۶۰/۵±۰/۱	۲۴/۹±۰/۱
۲۰	۲/۵	۴	Al -٪۴/۵ Cu - ٪۰/۱ B	۷۸/۵±۰/۱	۵۹/۱±۰/۱	۲۵/۵±۰/۱
۲۴	۵	۷	Al - ٪۴/۵ Cu - ٪۰/۵ B	۱۸۷/۱±۰/۱	۱۲۰/۱±۰/۱	۲۵/۰±۰/۱

4- نتیجه گیری

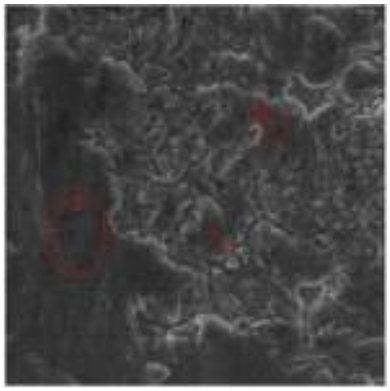
در تحقیق حاضر اثر نوع لایه واسط بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلومینیوم 1050 به فولاد ساده کربنی St14 از روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بررسی و نتایج ذیل حاصل گردید:

-یکی از مهمترین موارد پیش رو دراتصال‌دهی فولاد و آلومینیوم به یکدیگر ایجاد ترکیبات بین فلزی ترد و شکننده بین آهن و آلومینیوم است که منجر به افت استحکام و مقاومت به ضربه اتصال خواهد شد.

- بیشترین استحکام برشی در بین تمام نمونه‌های اتصال یافته مربوط به نمونه اتصال یافته در زمان 7 ثانیه و توان 2/5 کیلووات و لایه واسط حاوی 0/1 درصد بور (نمونه 8) به مقدار 123/90 مگاپاسکال بود. این نمونه بهترین نمونه از نظر استحکام بود.

-کمترین استحکام برشی در بین تمام نمونه‌های اتصال یافته مربوط به نمونه اتصال یافته در زمان 4 ثانیه و توان 5 کیلووات و لایه واسط حاوی 0/5 درصد بور (نمونه شماره 18) به مقدار 19/50 مگاپاسکال بود.

- بیشترین عرض دکمه جوش مربوط به نمونه اتصال یافته در زمان 7 ثانیه و توان 5 کیلووات و لایه واسط حاوی 0/5 درصد بور (نمونه شماره 24) به مقدار 1065 میکرومتر و کمترین عرض دکمه جوش مربوط به نمونه اتصال یافته در زمان 4 ثانیه و توان 5 کیلووات و لایه واسط حاوی 0/5 درصد بور (نمونه شماره 18) به مقدار 575 میکرومتر بود.

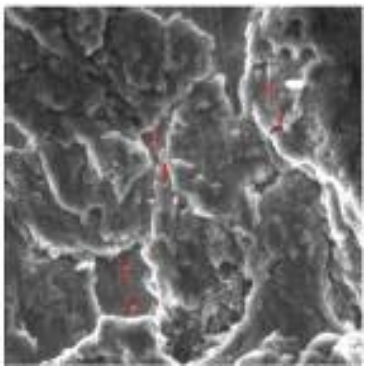


Elt.	Atomic %	Conc
O	3.300	1.946
Al	94.964	94.420
Fe	1.519	3.126
Cu	0.217	0.508
	100.000	100.000

Elt.	Atomic %	Conc
O	4.541	2.710
Al	94.361	94.966
Fe	0.972	2.026
Cu	0.126	0.298
	100.000	100.000

Elt.	Atomic %	Conc
O	15.850	5.528
Al	23.911	14.277
Fe	59.912	79.714
Cu	0.327	0.480
	100.000	100.000

شکل 16- نتایج آنالیز نقطه‌ای برای نمونه شماره 13.



Elt.	Atomic %	Conc
O	10.124	7.701
Al	86.212	86.401
Fe	3.469	5.011
Cu	0.195	0.617
	100.000	100.000

Elt.	Atomic %	Conc
O	14.963	5.531
Al	61.811	49.222
Fe	22.799	44.711
Cu	0.427	0.505
	100.000	100.000

Elt.	Atomic %	Conc
O	6.327	4.088
Al	89.613	91.757
Fe	3.645	3.642
Cu	0.239	0.333
	100.000	100.000

شکل 17- نتایج آنالیز نقطه‌ای برای نمونه شماره 24.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.1.4]

- بیشترین اندازه دانه در دکمه جوش مربوط به نمونه اتصال یافته در زمان 4 ثانیه و توان 2/5 کیلووات (نمونه شماره 19) به مقدار 28 میکرومتر و کمترین اندازه دانه در دکمه جوش مربوط به نمونه اتصال یافته در زمان 7 ثانیه و توان 5 کیلووات و لایه واسط حاوی 0/5 درصد بور (نمونه شماره 24) به مقدار 19 میکرومتر بود.

- بیشترین مقدار ریزوسختی در مرکز جوش، مربوط به نمونه اتصال‌یافته در مدت زمان 7 ثانیه و توان 5 کیلووات و لایه واسط 0/5 درصد بور (نمونه شماره 24) به مقدار 187/17 ویکرز و کمترین مقدار ریزوسختی در مرکز جوش، مربوط به نمونه اتصال یافته در مدت زمان 4 ثانیه و توان 2/5 کیلووات (نمونه شماره 19) به مقدار 71/93 ویکرز بود.

منابع

1-Wan, Z ,.et al.,"Characterization of intermetallic compound at the interfaces of Al-steel resistance spot welds", Journal of Materials Processing Technology, 2017, 242: p. 12–23.

2-Sun, D., et al., "Microstructures and mechanical properties of resistance spot welded joints of 16Mn steel and 6063-T6 aluminum alloy with different electrodes." Journal of materials and design,. In Pres, 2016..

3-Chen, J., et al, "Microstructure and mechanical properties of resistance-spot-welded joints for A5052 aluminum alloy and DP 600 steel". Materials Characterization,. 2016, 120: p. 45–52.

4- Jianbin Chen, Xinjian Yuan, Zhan Hu, Kanglong Wu, Ting Li, Ci Li, "Improvement of resistance-spot-welded joints for DP 600 steel and A5052 aluminum alloy with Zn slice interlayer", Journal of Manufacturing Processes 30, 2017, 396–405.

5- Nannan Chena, Hui-Ping Wangb, Blair E. Carlsonb, David R. Sigler b, Min Wanga, "Fracture mechanisms of Al/steel resistance spot welds in lap shear test", Journal of Materials Processing Technology 243, 2017,347–354.

6- M.R. Arghavani, M. Movahedi , A.H. Kokabi, "Role of zinc layer in resistance spot welding of aluminium to steel", Materials and Design 102, 2016, 106–114

7-Sun B. X., Stephens E. V., Khaleel M. A., Shao H., Kimchi M., "Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy to Steel with Transition Material From Process to Performance", Part I: Experimental Study, Welding Journal, 2004, 1, 3, 188-195.

8- Lihu Cui , Ranfeng Qiub, LongLong Hou, Zhongbao Shen, Qingzhe Li, "Resistance Spot Welding between Steel andAluminum Alloy", 5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering, 2015, 777-781.

9- Pouranvari Majid, "Critical Assessment 27: Dissimilar Resistance Spot Welding of Aluminium/Steel: Challenges and Opportunities, Materials Science and Technology, 2017, 33, 15, 1705-1712.

10- Ibrahim I, Ito R, Kakiuchi T, et al. "Fatigue behavior of Al/steel dissimilar resistance spot welds fabricated using Al-Mg interlayer". Sci Technol Weld Join. 2016;21:223–233.

11-Zhang W, Sun D, Han L, et al. "Interfacial microstructure and mechanical property of resistance spot welded joint of high strength steel and aluminium alloy with 4047 AlSi12 interlayer", Mater Des. 2014;57:186–194.

12- Alizadeh-Sh M, Pouranvari M, Marashi SPH. "Welding metallurgy of stainless steels during resistance spot welding part II – heat affected zone and mechanical performance",Sci Technol Weld Join. 2015;20: 512–521.

13- C. Choi, D. Kim, D. Nam, Y. Kim, Y. Park, "A hybrid joining technology for aluminum/zinc coated steels in vehicles", J. Mater. Sci. Technol. 26, 2010, 858–864.

14-R. Qiu, H. Shi, K. Zhang, Y. Tu, C. Iwamoto, S. Satonaka, "Interfacial characterization of joint between mild steel and aluminum alloy welded by resistance spot welding", Mater. Charact. 61, 2010, 684–688.

15- W. Zhang, X. Qiu, D. Sun, L. Han, "Effects of resistance spot welding parameters on microstructures and mechanical properties of dissimilar material joints of galvanised high strength steel and aluminium alloy", Sci. Technol. Weld. Join. 16, 2011, 153–161.

16- Y. Liu, X. Bian, K. Zhang, C. Yang, L. Feng, H.S. Kim, et al., "Interfacial microstructures and properties of aluminum alloys/galvanized low-carbon steel under highpressure torsion, Mater". Des. 64, 2014, 287–293.

17- L. Shao, Y. Shi, J. Huang, S.Wu, "Effect of joining parameters on microstructure of dissimilar metal joints between aluminum and galvanized steel", Mater. Des. 66, 2015, 453–458.

18- Miyamoto K, Nakagawa S, Sugi C, et al. "Seal spot welding of steel and aluminium alloy by resistance spot welding: dissimilar metal joining of steel and aluminium alloy by Zn insertion". Weld Int. 2016;30: 675–687.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.1.4]