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

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

Volume 10, Number 1, 2024



Investigation of the Joint Interface in Explosive Welding of Austenitic Stainless Steel 321 - Aluminum 1050 - Aluminum 5083 after Heat Treatment

Gh. Khalaj[1*], J. Khalaj[2], F. Soleymani[3]

1- Department of Materials Engineering, Saveh Branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran.
2- Tehran Safety Services and Fire Fighting Organization, Tehran, Iran.
3- Department of Engineering, Payame Noor Unvierstiy, Tehran, Iran.

Received 10 June 2024 ; Accepted 5 August 2024

Abstract

In this study, the microstructure of the joint interface in three-layer explosive welding of austenitic stainless steel 321 - aluminum 1050 - aluminum 5083 was examined before and after heat treatment. The welded samples were subjected to heat treatment at temperatures of 250°C and 350°C for durations of 1000, 3000, and 10000 seconds. Microstructural analysis was performed using optical microscopy and scanning electron microscopy. The results revealed that under all conditions, the Joint Interface of aluminum 5083 - aluminum 1050 exhibited a flat and defect-free structure. With increasing standoff distance, the Joint Interface of stainless steel 321 - aluminum 1050 transitioned from a smooth to a wavy pattern, and the average layer thickness increased from 4.95 µm to 6.7 µm. During heat treatment, the layer thickness in the Joint Interface increased proportionally to the diffusion kinetics, reaching maximum values of 18.56 µm and 15.02 µm for samples with standoff distances of 6.75 mm and 6 mm, respectively. The activation energies for diffusion were calculated as 46.6 kJ/mol and 42.4 kJ/mol, and the diffusion constants were 142.2 ms-1 and 45.3 ms-1 for the same samples.

Keywords:Heat treatment, explosive welding, Joint Interface, standoff distance, reaction layer, diffusion.

Corresponding Author: Gh. Khalaj, gh.khalaj@srbiau.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.23]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دهم، شماره1، بهار و تابستان 1403

بررسی فصل مشترک اتصال انفجاری فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 321 - آلومینیوم 1050 - آلومینیوم 5083 پس از عملیات حرارتی

غلامرضا خلج[1*]، جلال خلج[2]، فرزاد سلیمانی[3]

1- گروه مهندسی مواد، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران

2- سازمان آتش‌نشانی و خدمات ایمنی شهرداری تهران، ایران

3- گروه فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

دریافت مقاله: 1403/03/21 ؛ پذیرش مقاله: 1403/05/15

چکیده

در این پژوهش ریزساختار فصل‌مشترک اتصال جوشکاری انفجاری سه لایه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 321- آلومینیوم 1050 - آلومینیوم 5083 با دو فاصله توقف 6 و 6/75 میلی‌متر، قبل و بعد از عملیات‌حرارتی بررسی شد. عملیات‌حرارتی نمونه‌های جوشکاری شده در دماهای 250°C و 350 برای زمان‌های1000، 3000 و 10000 ثانیه، انجام شد. بررسی ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. نتایج نشان داد که در همه شرایط فصل‌مشترک آلومینیوم 5083- آلومینیوم 1050 به صورت مسطح و با ساختار بدون نقص است. با افزایش فاصله توقف، فصل‌مشترک فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 321- آلومینیوم 1050 از حالت صاف به حالت موجی تبدیل شده و همچنین متوسط ضخامت لایه فصل‌مشترک از 4/95 به 6/7 میکرون افزایش می‌یابد. در حین عملیات حرارتی، ضخامت لایه فصل‌مشترک متناسب با سینتیک نفوذ افزایش می‌یابد و در بیشترین مقدار به 18/56 و 15/02 میکرون به‌ترتیب برای نمونه با فاصله توقف 6/75 و 6 میلی‌متر می‌رسد. برای نمونه با فاصله توقف 6/75 و 6 میلی‌متر مقادیر انرژی محرکه نفوذ به‌ترتیب 46/6 و kJ/mol 42/4 و مقادیر ثابت نفوذ به ترتیب 142/2و ms-1 45/3 محاسبه شد.

کلمات کلیدی: عملیات‌حرارتی، جوشکاری انفجاری، فصل‌مشترک، فاصله توقف، لایه واکنشی، نفوذ.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: غلامرضا خلج، gh.khalaj@srbiau.ac.ir

1- مقدمه

جوشکاری آلومینیوم با فولاد از مزایای فنی بالایی مانند چگالی کم، خواص حرارتی عالی، استحکام بالا و هزینه کم برخوردار است[1و2]. با این حال، تفاوت در خواص حرارتی- فیزیکی و ویژگی‌های متالورژیکی این دو فلز، اتصال آن‌ها را با روش‌های معمولی جوشکاری ذوبی دشوار می‌کند. تلاش‌هایی برای اتصال این آلیاژها به یکدیگر از طریق جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [3-5]، اتصال نورد سرد [6]، جوشکاری با پرتو لیزر [7]، جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای [8،9]، لحیم‌کاری [10،11] و جوشکاری پالس مغناطیسی [12] انجام شده است.

جوشکاری انفجاری یک فرایند جوشکاری حالت جامد است که با برخورد مورب با سرعت بالا بین دو ماده از طریق انفجار کنترل شده یک ماده منفجره انجام می‌شود [13]. این روش به‌عنوان گزینه مناسبی برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم و فولاد در

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.23]

نظر گرفته می‌شود زیرا می‌تواند از ذوب بیش از حد، حتی برای اتصالات با اندازه بزرگ جلوگیری کند [14،15]. یک ویژگی متمایز اتصالات جوشی انفجاری، فصل‌مشترک‌های موجی است. کهرمان و همکاران [16] دریافتند که فصل‌مشترک با افزایش گرمای ورودی ناشی از ماده منفجره از مورفولوژی صاف به مورفولوژی موجی تغییر می‌کند. در نتیجه، درفصل‌مشترک، دانه‌های بسیار تغییرشکل یافته، ذوب موضعی مواد و حتی تشکیل فازهای جدید اغلب مشاهده می‌شود. مطالعات زیادی برای مشخص کردن ریزساختارها در فصل‌مشترک اتصالات جوش انفجاری انجام شده است [17-20]. ساراوانان و همکاران [17] تاثیر لایه‌های واسط مختلف را در اتصال صفحات آلومینیوم 5052 و فولاد زنگ نزن 316 بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که سختی و استحکام در اتصال با لایه واسط بیشتر از حالت اتصال بدون لایه واسط است. سونگ و همکاران [18] ریزساختارهای سلسله مراتبی، از جمله مورفولوژی موج (مقیاس مزوسکوپی)، ترکیبات بین‌فلزی (مقیاس میکرو) و دانه‌هایی در اندازه نانو (مقیاس نانو) را در فصل‌مشترک نشان دادند. به‌خوبی پذیرفته شده است که ریزساختار و ویژگی مناطق بین‌فلزی ممکن است نقش غالب در عملکرد مکانیکی کلی یک اتصال ایفا کند [19،20]. برای اتصالات آلومینیوم-فولاد، ضخامت بیش از حد لایه ذوب‌شده و ترکیبات بین فلزی شکننده Fe-Al در فصل‌مشترک تأثیر قابل توجهی بر کیفیت اتصال دارند [21].

استفاده از اتصال غیرهمجنس آلومینیوم-فولاد، در صنایعی همچون کشتی‌سازی، صنایع شیمیایی، ساخت مخازن تحت فشار و مبدل‌های حرارتی رو به گسترش است [22، 23]. بنابر نوع کاربردهای این نوع اتصالات و امکان جوشکاری‌های مجدد بر روی آن‌ها به‌عنوان مثال اتصالات انتقال ساختاری و یا عبور مواد با درجه حرارت بالا[24]، بررسی عملیات حرارتی این اتصالات‌ضروری است. ساماردزیچ وهمکاران[25]، تاثیرعملیات حرارتی بر خواص و ساختار اتصال فولاد ساده کربنی به آلیاژ Al-Mg با لایه واسطه آلومینیوم را مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند در دمای بالای 300 درجه‌سلسیوس، در نتیجه نفوذ آلومینیوم، ترکیبات بین فلزی ترد در محل اتصال تشکیل می‌شود. این امر منجربه تشکیل ترک و کاهش استحکام برشی فصل‌مشترک اتصال می‌شود. اکبری موسوی و همکاران[26] اتصال آلومینیوم - فولاد با فاصله توقف 5 و 10 میلی‌متر را در دماهای از 320 تا 460 درجه‌سلسیوس برای 3 ساعت مورد عملیات‌حرارتی قرار دادند. نتایج نشان داد که در فاصله توقف بالا، فصل‌مشترک موجی با لایه واکنشی مذاب تشکیل می‌شود. با افزایش دما، مکانیزم نفوذ فعال شده و باعث رشد ضخامت لایه واکنشی و تشکیل ترکیب بین فلزی می‌شود. آن‌ها گزارش دادند که با افزایش دمای عملیات‌حرارتی، استحکام برشی کاهش می‌یابد. تریکاریکو و همکاران[27]، در بررسی اتصال فولاد ASTM A516 به آلومینیوم 5083 با لایه واسط آلومینیوم 1050، با عملیات حرارتی از 5 تا 30 دقیقه در دماهای از100 تا 500- درجه سلسیوس، نشان دادند که با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی، ضخامت لایه فصل مشترک افزایش و سختی و استحکام کاهش می‌یابد. خانزاده و همکاران[22] با عملیات حرارتی اتصال آلومینیوم 1230 به فولاد زنگ نزن 321 در فاصله توقف‌های از 1 تا 2/5 میلی‌متر، در دماهای 350 و 450 درجه سلسیوس برای زمان‌های 6 و 8 ساعت، کاهش استحکام و سختی اتصال با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی، را به دلیل حذف عیوب خطی و نقطه‌ای و تنش باقی‌مانده ناشی از عبور امواج شوک جوشکاری و آنیل نمونه‌ها دانسته‌اند. این فرایند در تقابل با نفوذ عناصر در فصل‌مشترک و افزایش ترکیبات بین‌فلزی همراه با افزایش ضخامت فصل‌مشترک است. از طرفی استحکام برشی اتصال در فاصله توقف بالاتر، قبل و بعد از عملیات‌حرارتی، بیشتر از استحکام اتصال در فاصله توقف کمتر است. این به‌دلیل تغییرشکل پلاستیک بیشتر و افزایش موجی شدن و افزایش استحکام پیوند در فصل مشترک است. با وجود مقالاتی‌که در زمینه جوشکاری انفجاری آلومینیوم به فولاد چاپ شده‌اند [21-25]، مقالات کمی به اتصال فولادهای زنگ‌نزن به آلومینیوم پرداخته‌اند[26-36] و از این تعداد آن‌هایی که به عملیات‌حرارتی این اتصالات پرداخته‌اند بسیار کم هستند. با توجه به اهمیت و کاربرد این

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.23]

اتصالات در سازه‌های دریایی، بررسی تاثیرات دما و زمان عملیات حرارتی بر خواص متالورژیکی فصل مشترک اتصال آلومینیوم به فولاد مساله مهمی است. در تحقیق حاضر، عملیات حرارتی اتصال لوله سه لایه آلومینیوم 5083- فولادزنگ نزن 321 با لایه واسط آلومینوم 1050 با جوش انفجاری در فاصله توقف6 و 6/75 صورت گرفت. براساس دما و زمان عملیات-حرارتی، تغییر ضخامت لایه فصل‌مشترک مطالعه شد. همچنین تاثیر دما و زمان عملیات‌حرارتی بر تغییرساختار و ترکیب شیمیایی فصل مشترک مورد بررسی قرار گرفت.

جدول 1- نامگذاری نمونه‌ها براساس شرایط اتصال، دما و زمان عملیات حرارتی.

سری	فاصله توقف (mm)	شماره نمونه	دمای عملیات حرارتی (°C)	زمان عملیات حرارتی (s)
A	6.75	A0	جوشکاری شده	
		A1	250	1000
		A2	250	3000
		A3	250	10000
		A4	350	1000
		A5	350	3000
		A6	350	10000
B	6	B0	جوشکاری شده	
		B1	250	1000
		B2	250	3000
		B3	250	10000
		B4	350	1000
		B5	350	3000
		B6	350	10000

2- مواد و روش تحقیق

آلیاژهای مورد استفاده در فرایند جوشکاری انفجاری جهت ایجاد لوله، فولاد زنگ نزن آستنیتی 321 و آلومینیوم 5083 با لایه واسط آلومینیوم 1050 بود. پس از آماده‌سازی، لوله‌های پرنده آلومینیوم 1050 و آلومینیوم 5083 و لوله مادر فولادی 321 در یک مرحله اتصال داده شدند. سیستم تنظیمی جوشکاری انفجاری مشابه کار قبلی [35] بود. در فرایند جوشکاری، دو فاصله توقف 6/75 و 6 میلی‌متر در نظر گرفته شد. در این تحقیق، براساس مطالعه منابع [22-25] و نوع کارکرد این اتصالات، دماهای 350 و 250 درجه‌سلسیوس و زمان‌های 1000، 3000 و 10000 ثانیه برای عملیات حرارتی، انتخاب شدند. جدول(1) نامگذاری نمونه‌ها بر اساس شرایط اتصال، دما و زمان عملیات حرارتی را نشان می‌دهد. به منظور بررسی ریزساختار؛ نمونه‌هایی با ابعاد 6×10×10 میلی‌متر تهیه شدند. نمونه‌ها در جهت عمود بر سطح جوشکاری شده، بریده و سپس مانت شدند. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل (TESCAN-MIRA) مجهز به سیستم طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (EDS) استفاده شد. تصاویر میکروسکوپی با فاصله کاری 6/4 تا 15 میلی‌متر و شناساگر الکترون برگشتی گرفته شد.

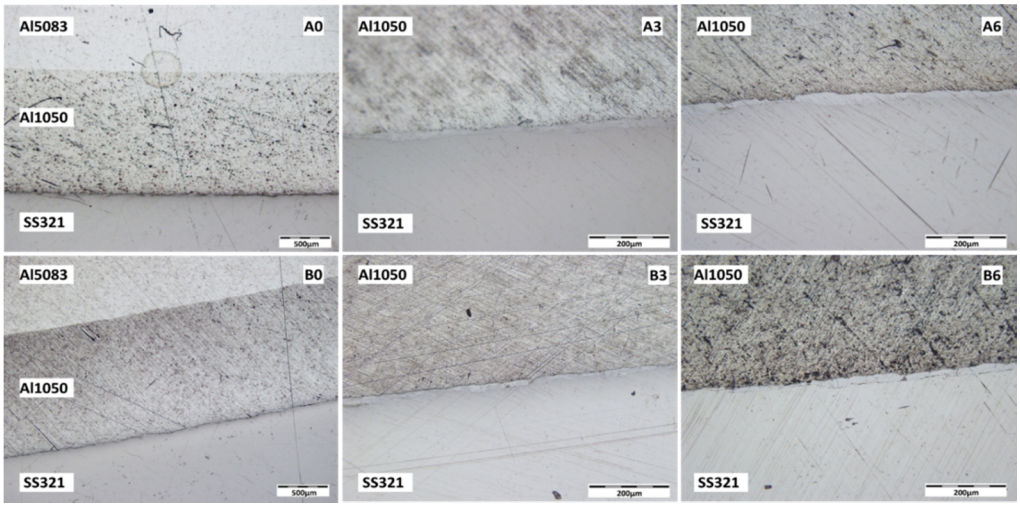
3- نتایج و بحث

3-1- بررسی ساختار فصل‌مشترک اتصال

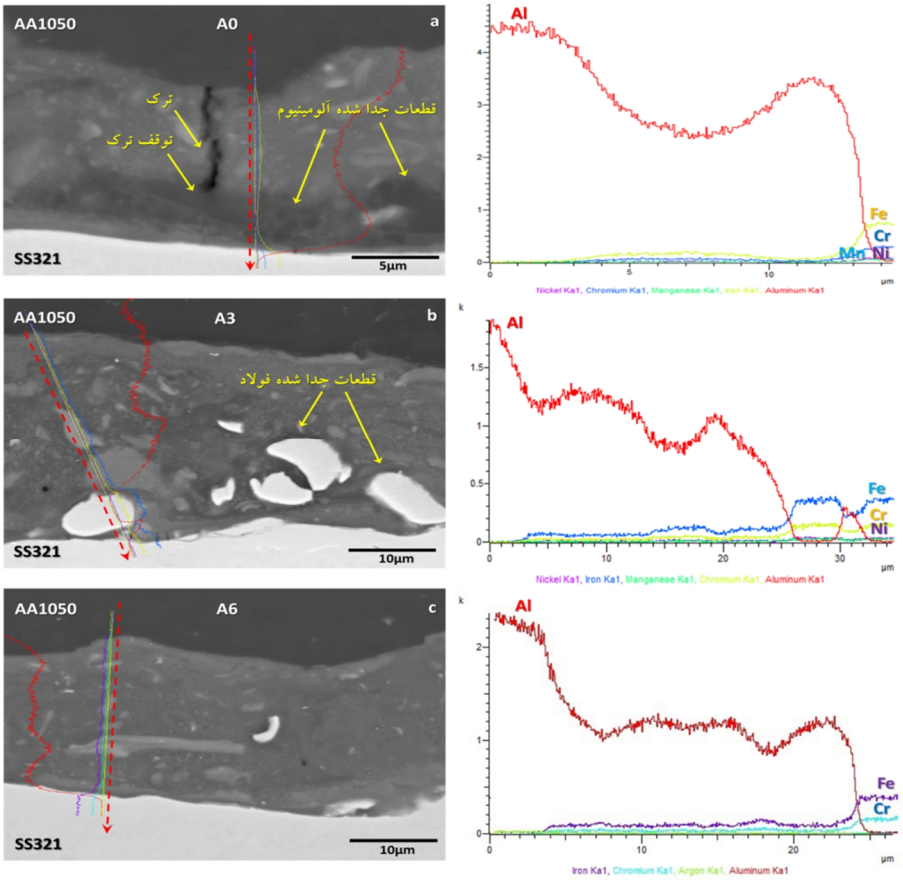
در شکل(1) تصویر میکروسکوپ نوری فصل‌مشترک اتصال 3 لایه نمونه‌های سری A و B نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، فصل مشترک آلومینیوم5083- آلومینیوم 1050 مسطح و بدون تشکیل لایه واکنشی است. شکل کلی فصل‌مشترک آلومینیوم 1050- فولاد 321 نامسطح است و لایه واکنشی در فصل‌مشترک حالتی نامنظم دارد و ضخامت آن متغیر است. در شکل(2) تصاویر میکروسکوپ الکترونی و توزیع عنصری در لایه واکنشی فصل مشترک اتصال آلومینیوم/ فولاد مشاهده می‌شود. براساس شکل(2-الف) ، تکه‌هایی از آلومینیوم از فلز مادر جدا شده و در لایه واکنشی محبوس شده است و ترک‌های ریز عرضی در لایه واکنشی فصل‌مشترک وجود دارد که با گزارشات محققان در سایر کارها مطابقت دارد [29]. میدان‌های تنشی حرارتی و کرنش پسماند ناشی از اختلاف ضریب هدایت حرارتی دو فلز، موجب تشکیل ترک در لایه فصل‌مشترک شده است[25]. رشد این ترک‌ها گاهی در برخورد با تکه‌های آلومینیوم جدا شده از زمینه، متوقف یا منحرف می‌شود. در شکل (2-ب) تکه‌هایی از فولاد از فلزمادر جداشده و در لایه واکنشی محبوس شده است. ابعاد این تکه‌های جداشده گاهی به چند ده میکرون می‌رسد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.23]



شکل1-تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های سری A و B.



شکل2- تصویر میکروسکوپ الکترونی و توزیع خطی عناصر در لایه واکنشی در فصل مشترک اتصال 3 لایه Al1050-SS312 نمونه‌های سری A (فاصله کاری A0، A3 و A6 به ترتیب 14/5، 12/9 و 13/0میلی متر، شناساگر الکترون برگشتی)

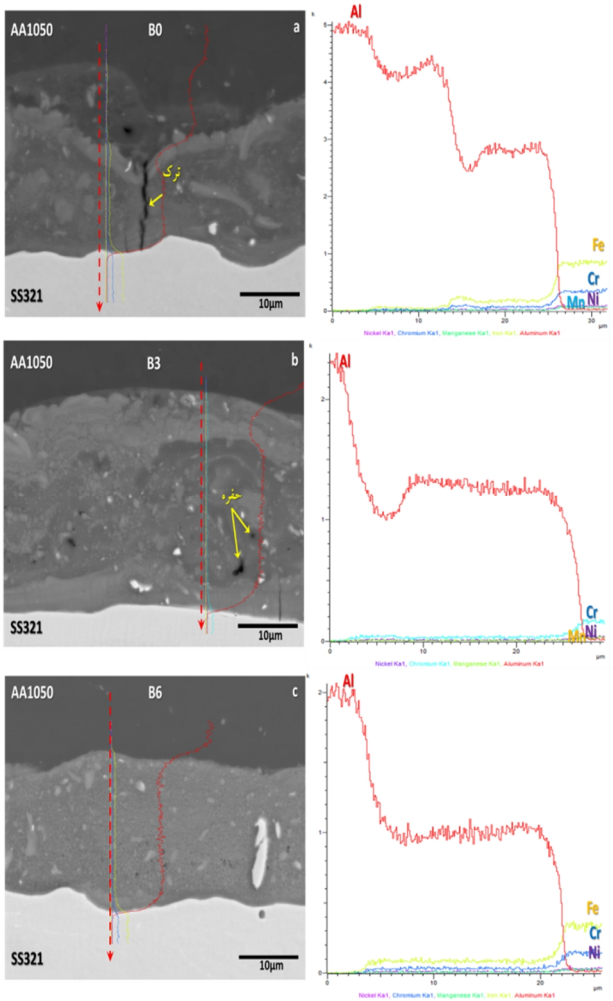
در تصویر میکروسکوپ الکترونی از لایه واکنشی تغییر رنگ اجزاء از طیف روشن تا تیره به درصد فولاد و آلومینیوم، به ترتیب، بستگی دارد. (شکل2-ج). وجود حفره در وسط لایه واکنشی و عبور ترک عرضی از میان لایه واکنشی در شکل(3) نشان داده شده است. توزیع آلومینیوم در لایه واکنشی، متغیر است و درصد آلومینیوم در نمونه‌های سری A بیشتر از نمونه‌های سری B است. توزیع عناصر آلیاژی با انجام عملیات‌حرارتی تا حدی تعدیل می‌شود (شکل 2 و 3).

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.23]

در مقایسه تصاویر میکروسکوپی الکترونی نمونه‌های سری A و B مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله توقف، فصل مشترک با لایه واکنشی نامنظم‌تری تشکیل شده است. تغییر شکل فصل مشترک مرتبط با افزایش کرنش پلاستیک ناشی از برخورد بوده است، همچنین مشاهده می‌شود که اندازه امواج با سرعت و زاویه برخورد مرتبط بوده و تغییر در طول موج‌ها ناشی از تغییر زاویه برخوردی است. عامل تغییرات کرنش پلاستیک که هر دو عامل زاویه برخورد و سرعت برخورد را در نظر می‌گیرد، همراه تنش برشی به عنوان عامل تغییر شکل فصل مشترک ذکر شده است[18]. ضخامت لایه واکنشی فصل‌مشترک نمونه‌های سری A بیشتر از نمونه‌های سری B است. این افزایش، به دلیل افزایش فاصله توقف و ضخامت بار انفجاری، سرعت صفحه پرنده بالاتر و تغییر شکل پلاستیک بیشتر در فصل مشترک است[5]. همچنین با افزایش انرژی جنبشی برخورد، شکل فصل مشترک نامنظم‌تر شده است[6].

با افزایش سرعت برخورد، فشار برخوردی افزایش یافته و زاویه دینامیکی برخورد و انرژی جنبشی مصرفی در نقطه برخورد نیز زیاد شده است. قسمتی از انرژی جنبشی مصرفی در فصل مشترک به انرژی پتانسیل تبدیل شده و باعث می‌شود که ورق‌ها در طول سطح برخورد تغییر شکل داده، با افزایش انرژی جنبشی مصرفی، تغییر شکل پلاستیکی بیشتری در فصل مشترک ایجاد شده و با این افزایش، رفتار ماده به سیالیت بیشتری میل نموده که در نهایت منجر به ایجاد موج‌هایی با طول موج و دامنه بیشتر در فصل مشترک شده است[4]. افزایش فاصله توقف و افزایش زاویه دینامیکی برخورد باعث افزایش تغییر شکل صفحه پرنده در حین برخورد شده و تغییر شکل در فصل مشترک ایجاد شده است. افزایش سرعت برخورد باعث بالارفتن فشار از استحکام تسلیم دو فلز در نقطه برخورد شده است. سرعت حرکت صفحه پرنده با افزایش فاصله توقف و بار انفجاری افزایش یافته و هم چنین به دلیل وجود تفاوت در چگالی و سرعت حرکت موج در فلزات، مومنتم فشاری در دو سمت فصل مشترک با افزایش سرعت حرکت صفحه پرنده تغییر نموده و در نتیجه نقطه برخورد در هنگام اتصال دچار نوسان شده است. این نوسانات با افزایش سرعت برخورد افزایش یافته و مواد در مجاورت نقطه برخورد در حجم بزرگ‌تری استحکام خود را از دست داده و رفتار پلاستیک شبه سیال از خود نشان داده‌اند، در نتیجه طول موج در فصل‌مشترک اتصال به تدریج با افزایش سرعت برخورد افزایش یافته است[14، 15].تصاویر میکروسکوپ الکترونی بیان‌گر وجود ترک در لایه واکنشی فصل‌مشترک است.

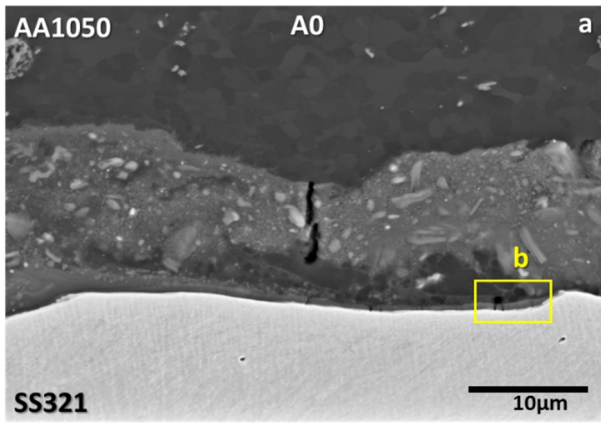


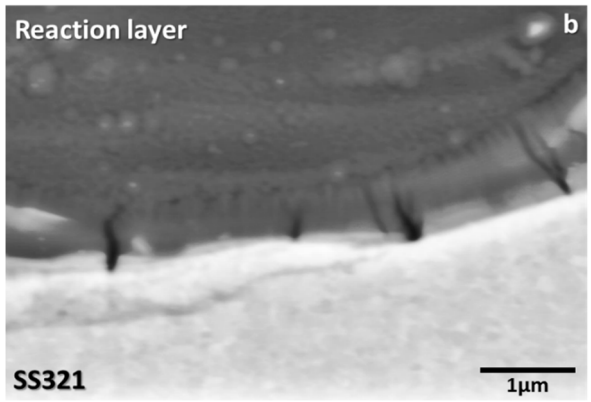
شکل3- تصویر میکروسکوپ الکترونی و توزیع خطی عناصر در لایه واکنشی در فصل مشترک اتصال3 لایه Al1050-SS312 نمونه‌های سری B (فاصله کاری B0، B3 و B6 به‌ترتیب 14/3، 12/9 و 6/4 میلی‌متر، شناساگر الکترون برگشتی)

علاوه بر تشکیل ترک‌های عرضی و طولی در مقیاس میکرو، وجود ترک‌های در مقیاس زیرمیکرون به صورت باند تیره رنگ بین لایه واکنشی و سطح اتصال فولاد زنگ نزن مشهود است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.23]

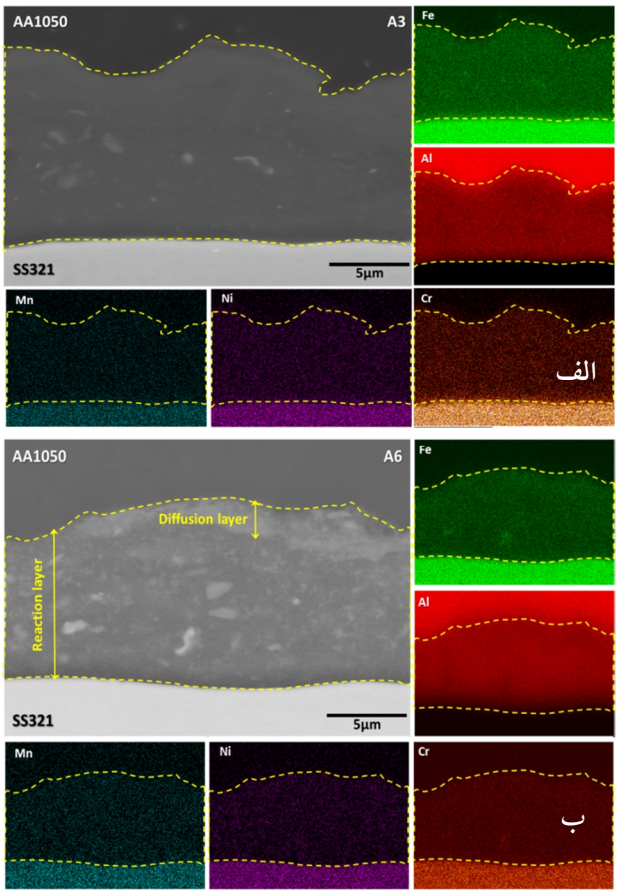




شکل 4- تصویر میکروسکوپ الکترونی ریزترک‌ها در مرز فولاد با لایه واکنشی(فاصله کاری 7/9 میلی‌متر، شناساگر الکترون برگشتی)

در شکل(4-ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی از همان منطقه لایه واکنشی شکل(4-الف) با بزرگنمایی بالاتر دیده می‌شود. ریزترک‌ها از مرز فولاد با لایه واکنشی شروع شده و داخل لایه واکنشی ادامه یافته و در محدوده مشخصی حداکثر از 1 تا 2 میکرون در لایه واکنشی ختم می‌شود. ایجاد ریزترک‌ها علاوه بر تردی ذاتی لایه واکنشی، می‌تواند به تفاوت ضریب انبساط حرارتی و استحکام لایه واکنشی با فولاد و همچنین کرنش موضعی در حین جوشکاری ارجاع شود.

در اندازه‌گیری آنالیز عنصری EDS در تصاویر SEM به خوبی مشاهده می‌شود که در لایه واکنشی فصل مشترک، فازهای مختلفی وجود دارد. لایه فصل‌مشترک علاوه بر تکه‌های جدا شده از آلومینیوم و فولاد، که به ترتیب به صورت کاملا تیره و روشن دیده می‌شوند، شامل ترکیبات بین فلزی است که با رنگ متمایز از زمینه لایه واکنشی مشاهده می‌شوند. شکل، اندازه و توزیع این ترکیبات بین فلزی بسیار متغیراست. در اثر عملیات حرارتی، مشخصات شکل، اندازه و توزیع ترکیبات بین‌فلزی تغییر می‌کند(شکل5). در مقایسه توزیع عنصری در نمونه A3 و A6 مشاهده می‌شود که توزیع عناصرAl (رنگ قرمز در نقشه توزیع) و Cr (رنگ قهوه‌ای در نقشه توزیع) در A6 کمی نرمال‌تر شده است و اختلاف عناصر در فصل مشترک آلومینیوم- لایه واکنشی کاهش یافته است. تشکیل لایه نفوذی در داخل لایه واکنشی در هر دو سمت آلومینیوم و فولاد مشاهده می‌شود که نمود این لایه نفوذی در سمت آلومینیوم بیشتر است (شکل 5-ب).



شکل5- توزیع عنصری در نمونه‌های A3 و A6

در شکل(6) توزیع عناصر آلومینیوم، آهن، کروم، نیکل و منگنز در فصل‌مشترک لایه واکنشی با فولاد نشان داده شده است. تغییرات تدریجی ترکیب عناصر، بیانگر نفوذ متقابل در یکدیگر در حین اتصال انفجاری یا عملیات‌حرارتی بعد از جوش است. در نتایج حاصله مشاهده شد که حتی در زمان 3000 ثانیه و در دمای 250 درجه (نمونهA2) ترکیب لایه فصل‌مشترک قبل و

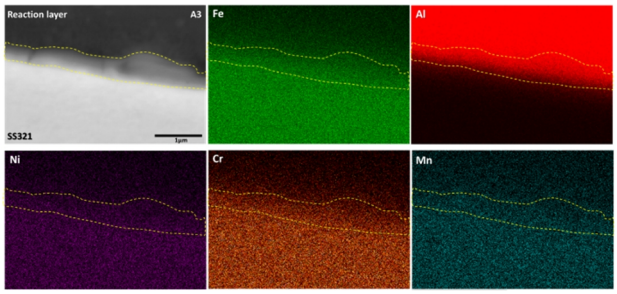
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.23]

بعد از انجام عملیات حرارتی تغییر کرده است. پس از انجام عملیات حرارتی مقدار آلومینیوم در لایه فصل مشترک افزایش و مقدار آهن، نیکل و کروم کاهش پیدا کرده است. با توجه به بیشتر بودن ضریب نفوذ آلومینیوم نسبت به آهن[30]، مشاهده می‌شود که در وسط لایه فصل مشترک، درصد وزنی آلومینیوم از کمتر از 85 درصد در نمونه A0 به بیش از 90 درصد در نمونه A6 می‌رسد. در همین حال، درصد وزنی آهن از بیشتر از 10 درصد در نمونه A0 به کمتر از 5 درصد در نمونه A6 می‌رسد. با توجه به نمودار فازی آهن- آلومینیوم، مقادیر فوق درمحدوده حلالیت آهن در آلومینیوم و تا حدی ترکیب بین فلزی $FeAl_3$ است. در موارد خاصی در نزدیک قطعات جدا شده از زمینه فولاد و بعد از عملیات‌حرارتی، احتمال تشکیل ترکیبات بین فلزی نسبتاً غنی از آهن مانند Fe_2Al_5 و $FeAl_2$ وجود دارد.

نکته قابل توجه در مقدار نیکل و کروم در نمونه جوشکاری شده و تغییرات آن‌ها حین عملیات‌حرارتی است. باتوجه به ترکیب اولیه فولاد 321 که دارای 18 درصد کروم و 10/5 نیکل است، مشاهده می‌شود که متوسط درصد وزنی کروم و نیکل به ترتیب 4 و 2/5 است. با انجام عملیات حرارتی در دمای 350 درجه و زمان 10000 ثانیه این دو ترکیب به مقدار تقریبا برابر 1/6 می‌رسند. در همه موارد تاثیر دمای عملیات حرارتی بیشتر از زمان عملیات است، چنان که تغییرات در ترکیب شیمیایی عناصر برای نمونه A4 با ماندن 1000 ثانیه در دمای 350 درجه، برابر یا بیشتر از نمونه A3 با ماندن 10000 ثانیه در دمای 250 درجه است.

افزایش دما و زمان عملیات‌حرارتی منجر به افزایش ضخامت لایه فصل‌مشترک شده است. مطالعات قبلی نیز نشان داد که در اتصال انفجاری آلومینیوم به فولاد با افزایش دما و زمان عملیات‌حرارتی عرض لایه واکنشی فصل‌مشترک گسترش می‌یابد [19،21،23]. تغییرات ضخامت و ترکیب شیمیایی در نمونه A بسیار بیشتر از نمونه B است، زیرا در نمونه A، نیروی محرکه بیشتر ناشی از فرایند جوشکاری منجر به اختلاف بیشتری در غلظت قبل و بعد از عملیات‌حرارتی می‌شود. این مطلب را می‌توان به فضای بیشتر ساختار شبکه دارای چگالی بالا از عیوب نقطه‌ای و خطی نسبت داد که در اثر عبور موج تنش ضربه‌ای ایجاد شده هنگام جوشکاری انفجاری به‌وجود آمده است. این عیوب باعث می‌شود که عناصر از طریق این مسیرهای نفوذ سریع به فصل‌مشترک نفوذ کنند[15]. مقدار نفوذ با دما افزایش می‌یابد و بنابراین عرض لایه واکنشی را افزایش می‌دهد. تغییر لایه واکنشی از عواملی چون مقدار نفوذ عناصر اصلی، تنش‌های باقی‌مانده ناشی از جوشکاری که منجر به ایجاد کرنش در منطقه نفوذ می‌شود، ایجاد کرنش ناشی از اختلاف خواص فیزیکی مواد در هنگام عملیات حرارتی و نرم شدن زمینه فلزپایه در اثر تخریب کامل عیوب ساختاری تاثیر می‌پذیرد [3و10]. تغییر در ترکیب شیمیایی لایه واکنشی فصل مشترک با توجه به آنالیز آن‌ها مشابه گزارش محققان است[8و9].



شکل6- توزیع عنصری در مرز لایه واکنشی با فولاد.

جدول2- تغییرات ضخامت لایه واکنشی فصل مشترک در دما و زمان‌های متفاوت عملیات حرارتی.

شماره نمونه	میانگین ضخامت فصل مشترک (µm)	اختلاف ضخامت قبل و بعد از عملیات حرارتی (µm)
A0	6.7	--
A1	8.50	1.8
A2	9.05	2.35
A3	12.64	5.94
A4	13.87	7.18
A5	14.45	7.75
A6	18.56	11.86
B0	4.95	--
B1	6.71	1.76
B2	9.04	4.09
B3	9.37	4.42
B4	8.43	3.48
B5	13.33	8.38
B6	15.02	10.08

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.23]

3-2- محاسبه سینتیک نفوذ در لایه واکنشی فصل مشترک آلومینیوم- فولاد

تعیین ضخامت میانگین لایه واکنشی فصل مشترک در فصل مشترک آلومینیوم- فولاد به علت عدم یکنواختی، با خطای زیادی همراه است. براین اساس، برای اندازه‌گیری متوسط ضخامت لایه فصل مشترک از روش مساحت‌سنجی استفاده شد که نتایج اندازه‌گیری در جدول(2) نشان داده شده است.

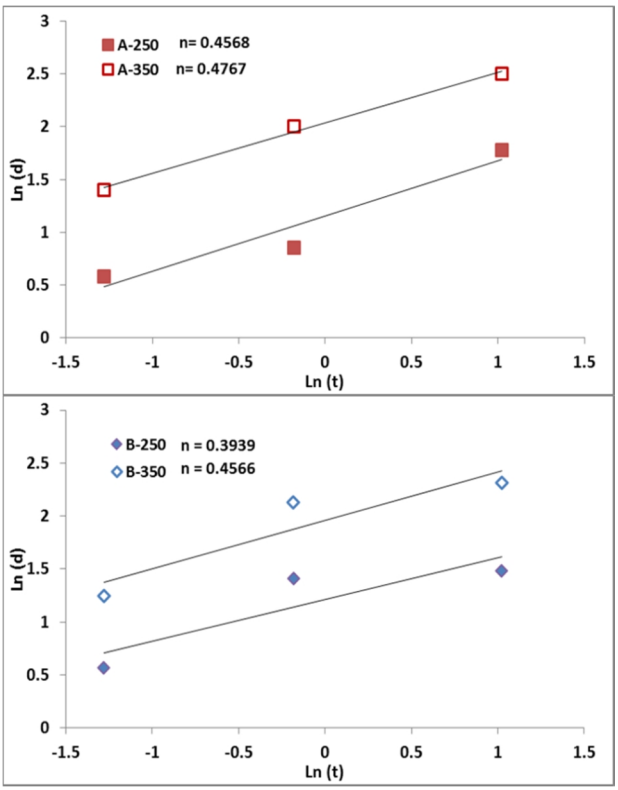
مشاهده می‌شود که با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی، افزایش ضخامت فصل‌مشترک به صورت غیرخطی است و به خصوص در نمونه سری B در دمای ثابت، باگذشت زمان، نرخ تغییر ضخامت کاهش می‌یابد و حالت مجانب مانند پیدا می‌کند. اندازه‌گیری‌های انجام شده در هر دو نمونه سری Aو B نشان داد که با افزایش دما و زمان، لایه واکنشی گسترش یافته‌اند که این نتایج در تحقیقات محققان قبلی نیز اعلام شده بود[11، 36]. افزایش ضخامت لایه فصل مشترک فولاد و آلومینیوم از قوانین نفوذ تبعیت می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که رشد لایه واکنشی فصل مشترک از رابطه سینتیکی زیر پیروی می‌کند:

$$d = k \cdot t^n \quad (1)$$

در این رابطه d ضخامت لایه فصل مشترک، t زمان فرایند، k و n به ترتیب ثابت رشد و نمای سینتیکی می‌باشند. در رابطه یاد شده چنانچه n نزدیک به 0/5 باشد (قانون کلاسیک سینتیک) آنگاه رشد لایه توسط نفوذ و چنانچه نزدیک به 1 باشد آنگاه رشد لایه توسط واکنش بین اجزا، کنترل می‌شود[16]. برای محاسبه انرژی فعال‌سازی، اگر از طرفین رابطه سینتیکی لگاریتم گیری شود رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Ln(d) = Ln(k) + n \cdot Ln(t) \quad (2)$$

از رابطه فوق برای محاسبه n استفاده می‌شود بدین ترتیب که چنانچه لگاریتم ضخامت لایه فصل مشترک برحسب لگاریتم زمان عملیات در یک دمای معین رسم گردد آنگاه شیب خط به دست آمده برابر با n است. این کار برای داده‌های این تحقیق انجام شده و نتایج آن در شکل(7) آورده شده است. ملاحظه می‌شود که تغییرات لگاریتم ضخامت با دما رفتار خطی داشته و شیب آن‌ها تقریباً برابر با 0/5 است. این بدان معناست که رشد لایه فصل‌مشترک بر روی اتصال آلومینیوم و فولاد توسط نفوذ عناصر سازنده آن کنترل شده و همچنین رشد آن از قانون سینتیک کلاسیک تبعیت می‌کند (رابطه 1). در این تئوری، عمق نفوذ (مجذور ضخامت لایه فصل‌مشترک) به عنوان تابعی از زمان فرایند در نظر گرفته می‌شود[26].



شکل 7- ارتباط لگاریتم تغییرات ضخامت لایه فصل مشترک با لگاریتم زمان برای دماهای مختلف

در رابطه کلاسیک، k ثابت سرعت رشد لایه فصل مشترک و وابسته به دما است. برای به دست آوردن مقدار k بایستی ابتدا نمودار مجذور ضخامت لایه فصل مشترک را برحسب زمان عملیات رسم نموده و سپس شیب منحنی را به دست آوریم (شکل 8).

دیمانسیون ثابت سرعت رشد لایه فصل مشترک برابر با L^2/t است که با دیمانسیون ضریب نفوذ عناصر یکسان است. در رابطه قانون اول فیک، دیمانسیون ضریب نفوذ و L^2/t یکسان است و ثابت سرعت رشد و ضریب نفوذ از یک جنس

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.23]

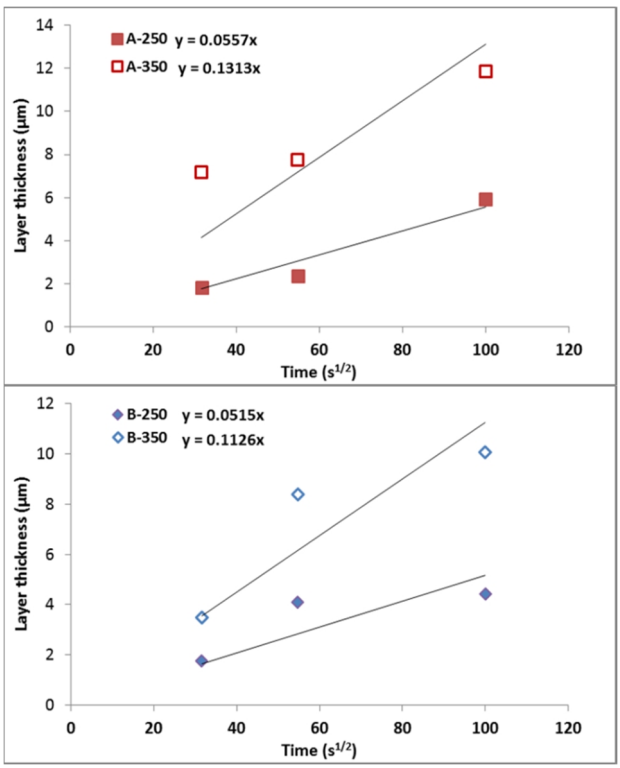
هستند؛ بنابراین ثابت سرعت رشد لایه فصل مشترک با دما رابطه آرنیوسی دارد[16]:

$$k = k_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (3)$$

در رابطه مذکور، T دما (کلوین)، R ثابت جهانی گازها (molK/J)، Q انرژی فعال‌سازی (mol/J) و k_0 یک ثابت است. چنانچه از طرفین رابطه (3) لگاریتم گرفته شود، رابطه (4) به دست خواهد آمد:

$$Ln(k) = Ln(k_o) - \frac{Q}{RT} \quad (4)$$

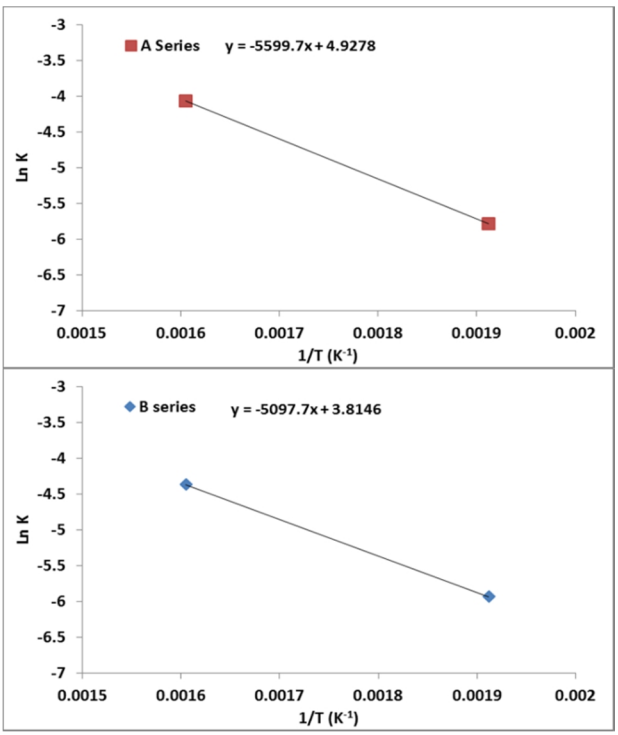
با رسم نمودار Ln(k) برحسب معکوس دما می‌توان انرژی فعال سازی لازم برای فرایند تشکیل لایه فصل مشترک را به دست آورد، (شکل8). مقدار انرژی فعال سازی و ثابت موجود درسرعت رشد لایه فصل مشترک از روی معادله خط محاسبه شده و در شکل(9) نشان داده شده است.



شکل 8- ارتباط تغییرات ضخامت لایه فصل‌مشترک با مجذور زمان عملیات برای دماهای مختلف

با به دست آمدن رابطه شیب خط و عرض از مبدا می‌توان مقادیر انرژی محرکه و ثابت نفوذ(Q و k_0) را محاسبه کرد.

مقادیر Q برای دو نوع اتصال A و B به ترتیب 46/6 و 42/4 kJ/mol و مقادیر k_0 به ترتیب 142/2وms^{-1} 45/3 است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اتصال A با فاصله توقف بیشتر، منجر به انرژی ذخیره شده بیشتر و دارای انرژی محرکه نفوذ بزرگتر از اتصال B است.



شکل 9- نمودار lnk برحسب معکوس دما (بر حسب کلوین)

4-نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر عملیات حرارتی بر ساختار و ضخامت لایه فصل مشترک اتصال فولاد آستنیتی 321-آلومینیوم 1050-آلومینیوم 5083 که با دو فاصله توقف 6 و 6/75 میلی‌متر جوشکاری انفجاری شده بود؛ انجام شد و نتایج زیر به دست آمد:

- با افزایش فاصله توقف در نمونه‌های سریA نسبت به نمونه‌های سری B (از 6 به 6/75 میلی‌متر) به تناسب تغییرشکل پلاستیک ناشی از انرژی جنبشی برخوردی در حین جوشکاری انفجاری، ضخامت لایه فصل‌مشترک در حالت بعد از جوش از 4/95 به 6/7میکرون افزایش می‌یابد با انجام عملیات‌حرارتی، ضخامت لایه فصل‌مشترک، متناسب با دما و زمان، افزایش می‌یابد و در دماهای 250 و 350 درجه سلسیوس برای زمان

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.23]

10000 ثانیه، در نمونه‌های سری A به 12/64و 18/56 میکرون و برای نمونه‌های سریB به 9/37 و 15/02 میکرون، به ترتیب، می‌رسد.

-عملیات حرارتی موجب افزایش غلظت آلومینیوم و کاهش آهن، نیکل و کروم در لایه فصل‌مشترک می‌شود. در نمونه A، در حین عملیات حرارتی غلظت میانگین آلومینیوم در لایه واکنشی فصل مشترک از 85 درصد تا بیش از 90 درصد افزایش یافته اما غلظت آهن از 10 درصد به کمتر از 5 درصد، کاهش یافته است.

-سینتیک نفوذ در لایه فصل مشترک از قوانین کلاسیک نفوذ پیروی می‌کند. با افزایش فاصله توقف، انرژی محرکه رشد لایه فصل مشترک در نمونه A نسبت به نمونه‌های سری B افزایش یافته است. برای نمونه A و B مقادیر Q به ترتیب 46/6 و 42/4 (kJ/mol) و مقادیر k_o به ترتیب 142/2و 45/3 (ms^{-1}) محاسبه شد.

-لایه واکنشی فصل مشترک، کامپوزیتی شامل زمینه محلول جامدی از آهن در آلومینیوم و ذرات ترکیبات بین فلزی است. در اثر عملیات‌حرارتی، علاوه بر افزایش ضخامت، غلظت عناصر و مشخصات ترکیبات بین‌فلزی در لایه واکنشی تغییر می‌کند و سبب افزایش ایجاد/ رشد ترک و کاهش استحکام اتصال می‌شود. به علت نفوذ بیشتر آلومینیوم، ترکیبات بین‌فلزی از آلومینیوم غنی‌تر می‌شوند و به سبب شکنندگی بیشتر این ترکیبات، انعطاف پذیری اتصال نیز کاهش می‌یابد.

منابع

1- Atabaki, M. M., Nikodinovski, M., Chenier, P., Ma, J., Harooni, M., & Kovacevic, R. (2014). Welding of aluminum alloys to steels: an overview. Journal for Manufacturing Science and Production, 14(2), 59-78.

2- Greenberg, B. A., Ivanov, M. A., Kuzmin, S. V., & Lysak, V. I. (2019). Explosive welding: processes and structures. CRC Press.

3- Gullino, A., Matteis, P., & D'Aiuto, F. (2019). Review of aluminum-to-steel welding technologies for car-body applications. Metals, 9(3), 315.

4- Ming, Y. A. N. G., Shen, Z. W., Chen, D. G., & Deng, Y. X. (2019). Microstructure and mechanical properties of Al-Fe meshing bonding interfaces manufactured by explosive welding. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 29(4), 680-691.

5- Wang, H., Qin, G., Geng, P., & Ma, X. (2020). Interfacial microstructures and mechanical properties of friction welded Al/steel dissimilar joints. Journal of Manufacturing Processes, 49, 18-25.

6- Akramifard, H. R., Mirzadeh, H., & Parsa, M. H. (2014). Cladding of aluminum on AISI 304L stainless steel by cold roll bonding: Mechanism, microstructure, and mechanical properties. Materials Science and Engineering: A, 613, 232-239.

7- Murugan, S. P., Cheepu, M., Nam, D. G., & Park, Y. D. (2017). Weldability and fracture behaviour of low carbon steel/aluminium/stainless steel clad sheet with resistance spot welding. Transactions of the Indian Institute of Metals, 70, 759-768.

8- Deqing, W., Ziyuan, S., & Ruobin, Q. (2007). Cladding of stainless steel on aluminum and carbon steel by interlayer diffusion bonding. Scripta materialia, 56(5), 369-372.

9- Haddadi, F., & Abu-Farha, F. (2015). Microstructural and mechanical performance of aluminium to steel high power ultrasonic spot welding. Journal of Materials Processing Technology, 225, 262-274.

10- Li, Y., Liu, Y., & Yang, J. (2020). First principle calculations and mechanical properties of the intermetallic compounds in a laser welded steel/aluminum joint. Optics & Laser Technology, 122, 105875.

11- Yan, F., Zhang, K., Yang, B., Chen, Z., Zhu, Z., & Wang, C. (2021). Interface characteristics and reaction mechanism of steel/Al welds produced by magnetic field assisted laser welding-brazing. Optics & Laser Technology, 138, 106843.

12- Yu, H., Dang, H., & Qiu, Y. (2017). Interfacial microstructure of stainless steel/aluminum alloy tube lap joints fabricated via magnetic pulse welding. Journal of Materials Processing Technology, 250, 297-303.

13- Shargh, S. F., Saadat, A., Najafi, A., Gharehshiran, M. R. K., & Khalaj, G. (2020). Investigating the effect of post weld heat treatment on corrosion properties of explosive bonded interface of AA5083/AA1050/SS 321 tubes. Materials Research Express, 7(3), 036529.

14-Han, J. H., Ahn, J. P., & Shin, M. C. (2003). Effect of interlayer thickness on shear deformation behavior of AA5083 aluminum alloy/SS41 steel plates manufactured by explosive welding. Journal of Materials Science, 38, 13-18.

15- Aizawa, Y., Nishiwaki, J., Harada, Y., Muraishi, S., & Kumai, S. (2016). Experimental and numerical analysis of the formation behavior of intermediate layers at explosive welded Al/Fe joint interfaces. Journal of Manufacturing Processes, 24, 100-106.

16- Kahraman, N., Gülenç, B., & Findik, F. (2005). Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface. Journal of Materials Processing Technology, 169(2), 127-133.

17-Saravanan, S., & Raghukandan, K. (2022). Microstructure, strength and welding window of aluminum alloy– stainless steel explosive cladding with

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.23]

transition joints. Materials & Design, 30(7), 2693-2700.
28- Carvalho, G. H. S. F. L., Galvão, I., Mendes, R., Leal, R. M., & Loureiro, A. (2018). Formation of intermetallic structures at the interface of steel-to-aluminium explosive welds. Materials Characterization, 142, 432-442.
29- Elango, E., Saravanan, S., & Raghukandan, K. (2019). Microstructural and Mechanical Properties of Al 5052-SS 316 Explosive
30- Aceves, S. M., Espinosa-Loza, F., Elmer, J. W., & Huber, R. (2015). Comparison of Cu, Ti and Ta interlayer explosively fabricated aluminum to stainless steel transition joints for cryogenic pressurized hydrogen storage. International Journal of Hydrogen Energy, 40(3), 1490-1503.
31- Guo, X., Fan, M., Wang, L., & Ma, F. (2016). Bonding interface and bending deformation of Al/316LSS clad metal prepared by explosive welding. Journal of Materials Engineering and Performance, 25, 2157-2163.
32- Yang, M., Ma, H., Shen, Z., Huang, Z., Tian, Q., & Tian, J. (2020). Dissimilar material welding of tantalum foil and Q235 steel plate using improved explosive welding technique. Materials & Design, 186, 108348.
33- Muneshwar, P., Singh, S. K., Kumar, K. N., Pant, B., & Sreekumar, K. (2012, February). Metallurgical studies on explosive welded aluminium alloy-stainless steel bimetallic plates. In Materials Science Forum (Vol. 710, pp. 644-649). Trans Tech Publications Ltd.
34- Phengsakul, S., & Rodchanarowan, A. (2013). Effect of thermal treatment on intermetallic phases of Fe/Al structural transition joints. Energy Procedia, 34, 782-790.
36- Khalaj G, Fadaei A. Effect of post weld heat treatment on the structure and mechanical properties of explosive welding of austenitic steel 321 - aluminum 1050 - aluminum 5083. JWSTI 2023; 9 (1) :101-112.
37- Shiran, M. K. G., Khalaj, G., Pouraliakbar, H., Jandaghi, M., Bakhtiari, H., & Shirazi, M. (2017). Effects of heat treatment on the intermetallic compounds and mechanical properties of the stainless steel 321-aluminum 1230 explosive-welding interface. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 24, 1267-1277.
different interlayers. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 32(1), 91-103.
18- Song, J., A. Kostka, M. Veehmayer, D. Raabe. Hierarchical microstructure of explosive joints: Example of titanium to steel cladding. Materials Science and Engineering: A 528, no. 6 (2011): 2641-2647.
19- Amani, H., & Soltanieh, M. (2016). Intermetallic phase formation in explosively welded Al/Cu bimetals. Metallurgical and Materials Transactions B, 47, 2524-2534.
20- Chen, X., Inao, D., Tanaka, S., Mori, A., Li, X., & Hokamoto, K. (2020). Explosive welding of Al alloys and high strength duplex stainless steel by controlling energetic conditions. Journal of Manufacturing Processes, 58, 1318-1333.
21- Shiran, M. R. K. G., Bakhtiari, H., Mousavi, S. A. A. A., Khalaj, G., & Mirhashemi, S. M. (2017). Effect of stand-off distance on the mechanical and metallurgical properties of explosively bonded 321 austenitic stainless steel-1230 aluminum alloy tubes. Materials Research, 20, 291-302.
22- Kim, Y. K., Pouraliakbar, H., & Hong, S. I. (2020). Effect of interfacial intermetallic compounds evolution on the mechanical response and fracture of layered Ti/Cu/Ti clad materials. Materials Science and Engineering: A, 772, 138802.
23- Chu, Q., Xia, T., Zhao, P., Zhang, M., Zheng, J., Yan, F., Cheng, P., Yan, C., Liu, C., & Luo, H. (2022). Interfacial investigation of explosion-welded Al/steel plate: the microstructure, mechanical properties and residual stresses. Materials Science and Engineering: A, 833, 142525.
24- Carvalho, G. H. S. F. L., Galvão, G., Mendes, I., Leal, R., & Loureiro, A. (2020). Aluminum-to-steel cladding by explosive welding. Metals, 10(8), 1062.
25- Samardžić, I., Mateša, B., & Kladarić, I. (2011). The influence of heat treatment on properties of three-metal explosion joint: Almg-Al-steel. Metalurgija, 50(3), 159-162.
26- Akbari Mousavi, S. A. A., Dashti, A. A., & Halvaee, A. (2011). Effects of Operational Parameters and Heat Treatments on the Aluminum-Steel Explosively Welded Composite Plates. Advanced Materials Research, 264, 223-228.
27- Tricarico, L., Spina, R., Sorgente, D., & Brandizzi, M. (2009). Effects of heat treatments on mechanical properties of Fe/Al explosion-welded structural

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.23]