نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره 1، بهار و تابستان1398، صفحه 50-45

بررسی خواص مکانیکی لحیم کاری بدون روانساز فوم آلومینیوم به ورق آلومینیوم

امیر ایزدپناهی، میثم مهدوی شهری، محمد صادق ابروی

گروه پژوهشی مواد نوین سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۱ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۰۷)

چکیده

پانل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی با توجه به ویژگی منحصر بفرد چگالی پایین و خواص مکانیکی مناسب، می توانند دارای کاربردهای متنوع و روزافزون باشند. تحقیق حاضر روشی نوین برای اتصال فوم آلومینیوم به ورق آلومینیومی با استفاده از لحیم کاری ارائه می‌نماید. در این شیوه، سطح فوم از لحیم آلیاژ پایه روی پوشانیده شده و صفحه آلومینیوم مورد نظر ضمن چرخش و حرارت دهی به سطح لحیم ذوب شده نزدیک شده و اتصال مطلوب مورد نظرایجاد می شود. استحکام کششی بهتری در مقایسه با نمونه های متصل شده از طریق استفاده از روانساز بدون اعمال چرخش، حاصل شد. در بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی و نوری نیز اتصال و نفوذ مناسب ورق/لحیم/فوم مشاهده شد.

کلمات کلیدی: لحیم کاری، پنل‌های ساندویچی آلومنیمی، فوم سلول بسته، بدون روانساز ، فوم آلومینیوم.

Investigation on Mechanical Behavior of Stir Soldering of Aluminum Foam Sandwich Panels

A. Izadpanahi, M. Mahdavi Shahri, M.S. Abravi

Materials Research Group, Iranian Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Mashhad Branch, Mashhad, Iran

(Received 1 January 2018 ; Accepted 28 June 2018)

Abstract

This paper introduces a novel soldering method for joining aluminum foams to aluminum plates. In this method, a rotating aluminum plate is soldered to the aluminum foam using zinc-based solder material. Rotation of the aluminum plate over the solder material drags the solder material and stirring it. Excellent tensile strength was obtained compared to those samples that are welded with the soldering flux but with no rotation involved. It was concluded that the stirring of the zinc-based solder material in the liquid state and just before the solidification break the oxide layers and help the

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: meysamms@kth.se

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-01]

wetting process done. Scanning electron microscopy examinations showed diffusion has occurred between the solder alloy and the aluminum foam and the aluminum plate.

Keywords: Soldering, Sandwich Panel, Close Cell Foam, Flux-less, Aluminum Foam.

1- مقدمه

فوم ها دارای ساختار متخلخل و خواص از قبیل وزن مخصوص پایین ، استحکام و ظرفیت جذب انرژی بالا را دارا هستند[۱و۲]. تولید ساختارهای متخلخل از سال ۱۹۹۰میلادی به سمت صنعتی شدن روش های تولید فوم های فلزی پیشرفت نمود[۳و۴]. اتصال صفحات تقویت جانبی به هسته فوم در ساندویچ پنل به روش های متعدد از قبیل استفاده از چسب پلیمری[۵] و تکنیک های دیگر از قبیل لحیم کاری، جوشکاری، یا روش مکانیکی استفاده از پیچ و مهره مورد استفاده قرار میگیرد. هرکدام از روش های اتصال ذکر شده دارای معایب خاص خود است. در مورد اتصال چسبی محدودیت کاربرد در دمای بالا و در اتصال از طریق مفاصل پیچ و مهره محدودیت های هندسی و نیزامکان آسیب ناشی از گشتاور حاصل از سفت شدن پیچ در فوم وصدمه دیدن ساختار آن محتمل است، دراتصال با روش جوشکاری فوم آلومینیومی بدلیل ماهیت ساختار متخلخل فوم، نشر گرما در ماده به سختی میسر می شود که جوشکاری فوم را با سختی مواجه می‌نماید[۶و۷]. در این بین لحیم کاری با آلیاژ بر پایه روی بدلیل دارا بودن خواصی از قبیل استحکام کششی مطلوب، حداکثر زاویه ترکنندگی، میزان سیالیت مناسب ،عدم اثرات نامطلوب زیست محیطی ، قابلیت حذف لایه اکسیدی و داشتن پتانسیل الکتروشیمیایی استاندارد نزدیک به آلومینیوم، منجر به بهبود خواص اتصال خواهد شد.

بااین وجود، مشکل اصلی استفاده از روانساز لحیم کاری، افزایش خوردگی در دماهای کاری بالا است[۸]، توسط برخی محققان لحیم کاری فوم آلومینیوم بدون استفاده از روانساز پیشنهاد شده است، هوانگ و همکارانش از روانساز با لحیم بر پایه روی با ویژگی حذف لایه اکسیدی در حین انجام لحیم کاری استفاده شده که با بکارگیری این روش رفتارهای مکانیکی کششی و فشاری اتصال مشابه با فلز پایه گزارش شده است[۹]. وان و همکارنش روشی را مبتنی بر استفاده از آلیاژهای بر پایه روی بدون بکارگیری روانساز منجر به حذف لایه اکسیدی و سهولت در پخش و ترشوندگی بهتر لحیم ارائه نموده اند. [۱۰و۱۱].

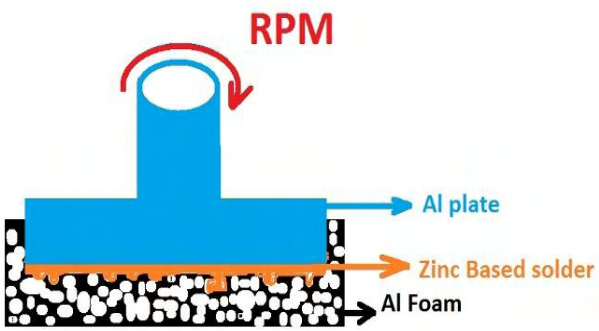
در حالیکه سایر محققین اعمال فعال سازی مکانیکی را جهت افزایش بازدهی اتصال در لحیم کاری مورد بررسی قرار داده‌اند. غیبی و همکاران روش لحیم کاری آلومینیوم در اتمسفر هوا را بدون استفاده از روانساز با بکارگیری از فعال سازی ما فوق صوت مکانیکی سطح بصورت را بررسی کردند [۱۲]. گیکلر و همکاران با استفاده از حرکت و اصطکاک دو صفحه روی هم برای لحیم کاری صفحات آلومینیومی به عنوان فعال ساز مکانیکی استفاده کردند [۱۳].

با توجه به موارد ذکر شده فوق و محدودیت سایر روشها در اتصال ورق به فوم، روش لحیم کاری از مزایای نسبی نسبت به سایر روش ها برخوردار بوده و می توان آن را در دماهای بالاتری به کار برد. هرچند مشکل خوردگی حاصل از روانساز نیز با بکارگیری آلیاژهای بر پایه روی که خاصیت خود روان سازی دارند برطرف گردیده است [۱۰و۱۱] اما پارامترهای اعمال لحیم بر روی سطح به صورت سیستماتیک قابل کنترل نیستند و لایه اکسیدی تشکیل شونده همچنان مانع از بهبود خواص اتصال است. مقاله حاضر روش جدید و منحصر بفرد برای لحیم کاری صفحات آلومینیومی به فوم آلومینیوم ارائه می‌دهد. این روش به عنوان لحیم کاری بدون روانساز، با اعمال چرخش که تلفیقی است سیستماتیک از بکارگیری آلیاژ پایه روی و پروسه چرخش برای دستیابی به حداکثر بازده، در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-01]

2-مواد و روش تحقیق

فوم آلومینیوم سلول بسته در گروه پژوهشی مواد و متالورژی جهاد دانشگاهی مشهد تولید شده است[۱۴]. ترکیب شیمیایی فوم آلومینیوم با استفاده از روش اسپکترومتری نشری شامل ۹۷/۳۲wt.% Al ، ۱/۱۹ wt.% Fe و ۱/۴۹ wt.%Zn می‌شود. دانسیته فوم آلومینیوم ۰/۴۳ g/cm^3 و نسبت تخلخل ۸۵٪ بود. اندازه متوسط سلول ۲/۵۲ میلی متر است. از آلومینیوم تجاری xxx ۱ برای ساخت ابزار چرخشی(به عنوان صفحه) استفاده شد. شکل(۱) نشان دهنده ابزار چرخش با قطر ۳۵ میلیمتر بهمراه فوم پایه آلومینیوم متشکل از حوضچه ای با قطری متناظر با سنبه به نحوی که ابزار چرخشی می تواند به راحتی در فوم چرخش نماید.ترکیب شیمیایی آلیاژ لحیم ۵/۵ wt% Al، ۰/۰۴ wt%Cu، ۰/۱ wt%Mg و ۰/۰۳ wt%Mn با عنصر پایه روی، ریخته گری شد. برای آماده سازی سطحی حذف لایه اکسید سطحی صفحات Al از کاغذ سنباده SiC برای و برای سطوح فوم برس سیمی استفاده شد.



شکل۱-شماتیک ابزار چرخشی با قطر mm ۳۵ قابل چرخش همراه لحیم پایه روی در حوضچه تعبیه شده در فوم آلومینیوم.

سپس مواد لحیم داخل حوضچه فوم آلومینیوم قرار داده شده و در اتمسفر هوا درمحدوده دمایی ۴۱۱-۴۰۵ $^{\circ}C$ کمی بالاتر از نقطه ذوب آلیاژ با مشعل پروپان حرارت دهی شده و همزمان ورق آلومینیومی (ابزار چرخشی) با اتصال به یک دستگاه فرز برای چرخش با نیرویی کمی به سمت حوضچه مذاب هدایت شده روی آن نگه داشته می‌شود .شایان ذکر است سرعت چرخش ابزار با دو دور مختلف ۳۳۵ یا ۵۰۰ دور در دقیقه تنظیم شد.برای نیل به بهترین اتصال، فرایند لحیم کاری با سه روش انجام شد:

۱) بدون روانساز با چرخش ابزار،

۲) با استفاده ازروان ساز با چرخش ابزار

۳) بدون چرخش و بدون روان ساز تنها با اعمال نیرو بوده است.

برای بررسی خواص مکانیکی میزان استحکام اتصال نمونه های لحیم کاری شده از آزمون تست مکانیکی تک محوره در دمای اتاق ، مقاومت کششی نمونه ها انجام و تحلیل شد. برای انجام آزمون کشش از فوم آلومینیوم به ابعاد ۱۰۰ × ۱۰۰ میلی متر مقطع زده شد و سپس با اعمال نیروی کششی تک محوره از سمت بالا با حفظ محل فوم آلومینومی، محدوده اتصال مورد آزمون قرار گرفت. برای بررسی سطح شکست از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز عنصری بهره گرفته شد.

3- نتایج و بحث

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند لحیم کاری بر خواص اتصال در فرآیند لحیم کاری آزمون کششی بر روی ۸ نمونه ساخته شده، انجام شد. همانطور که در جدول(۱) نشان داده شده است، لحیم کاری بدون روانساز با چرخش ابزار در حوضچه مذاب برای نمونه ها S1 ، S2، S3و S4 انجام شده است،لحیم کاری برای نمونه های S5 و S6 به روش مشابه و با استفاده از ابزار چرخشی در حوضچه ذوب و استفاده از روانساز ($ZnCl_2$) انجام شد، برای اتصال نمونه S7 روانساز بدون اعمال چرخشی بکار برده شد. یک نمونه اضافی نیز به عنوان نمونه کنترل (S8) آماده شده است. در ساخت نمونه شاهد هیچ چرخش یا روانساز مورد استفاده قرار نگرفت.

برای ساخت نمونهS8 ، مذاب لحیم تحت فشار ثابت ورق به فوم آلومینیومی اتصال داده شد،بدیهی است که لایه های اکسید نمونه مذکور از اتصال موفق صفحه آلومینیوم به فوم آلومینیوم ممانعت بعمل آورد. همانگونه که در جدول(۱) مشاهده می شود، استفاده از ابزار چرخشی منجر به ایجاد استحکام

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-01]

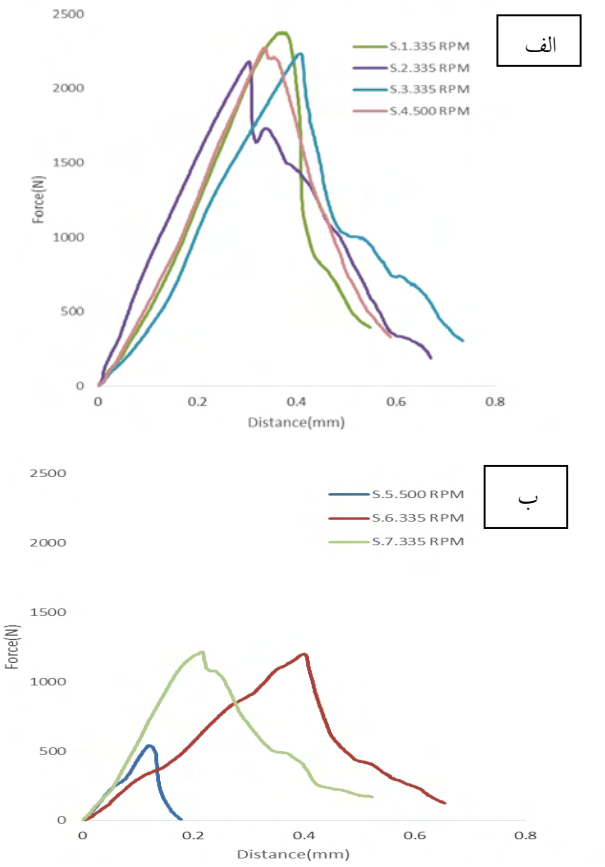
جدول۱- اثر پارامترهای فرایند لحیم کاری بر خواص اتصال

شماره نمونه	حداکثر نیرو (N)	سرعت چرخش (RPM)	نحوه اتصال
S.1	۲۴۷۷/۵۷	۳۳۵	بدون روانساز
S.2	۲۴۸۹/۰۴	۳۳۵	بدون روانساز
S.3	۲۴۰۸/۲۷	۳۳۵	بدون روانساز
S.4	۲۴۲۶/۹۱	۵۰۰	بدون روانساز
S.5	۶۶۹/۱۰	۵۰۰	با استفاده از روانساز
S.6	۱۳۴۵/۳۶	۳۳۵	با استفاده از روانساز
S.7	۱۳۰۴/۶۶	-	با استفاده از روانساز

مکانیکی بارز خواهد شد. سرعت چرخش به دو صورت ۳۳۵ یا ۵۰۰ دور در دقیقه تنظیم شده است، سرعت چرخش بیش از ۵۰۰ دور در دقیقه منجر به پاشش مواد لحیم کاری به خارج از حوضچه مذاب بدلیل ایجاد نیروهای بزرگ جانب مرکز خواهد شد. همانطور که از جدول(۱) قابل استنتاج است، دو سرعت متفاوت چرخش ابزار ۳۳۵ و ۵۰۰ دور در دقیقه، تاثیری بر میزان استحکام اتصال لحیم ندارد.

همانگونه که در شکل(۲) نشان داده شده است، چرخش با دورهای ۳۳۵ و ۵۰۰ دور در دقیقه روی استحکام مکانیکی اتصال موثر بوده و نتایج متفاوت ناشی از عدم استفاده از روانساز و چرخش بر استحکام مکانیکی بوضوح مشخص است. در شکل(۳)، ابزار چرخش(صفحه آلومینیومی) قبل و بعد از آزمون کشش نمایش داده شده است، تصویر حاکی از شکست درمحل فوم آلومینیومی وحفظ پیوند بین لحیم، ابزارچرخش و فوم بوده که این رفتار در نمونه های S1,S2,S3,S4 قابل رویت است،

تصاویر استریوگراف از قسمت های مختلف نمونه S1 قبل و بعد از آزمون کشش در شکل(۴) نشان داده شده است.مواد لحیم در فصل مشترک صفحه و فوم قابل مشاهده است. پس از انجام آزمون کشش شکست از ناحیه فوم ایجاد شده و محل اتصال پیوستگی خود را حفظ نمود(شکل ۴-ب) که این مهم حاکی از خواص مکانیکی منحصر بفرد بدست آمده از فرآیند لحیم کاری بدون روانساز و مواد لحیم بکار برده شده است.برای نمونه های S1 و S7تصاویر میکروسکپ نوری تهیه شد(شکل۵) در مورد نمونهS7 مواد لحیم پس از انجام آزمون کشش بطور کامل از صفحه آلومینیومی منفک شده است و اندکی از مواد لحیم روی سطح باقی مانده است.(شکل الف-۵) ولی در نمونه S1 همانگونه که از تصویر(شکل ب -۵)به وضوح دیده میشود پیوند بین مواد لحیم و صفحه آلومینیومی پس از اعمال بار آزمون کشش همچنان حفظ شده است.



شکل۲-الف)استحکام کششی برای فرایند لحیم کاری بدون روانساز و ابزار چرخشی، ب) با روانساز.

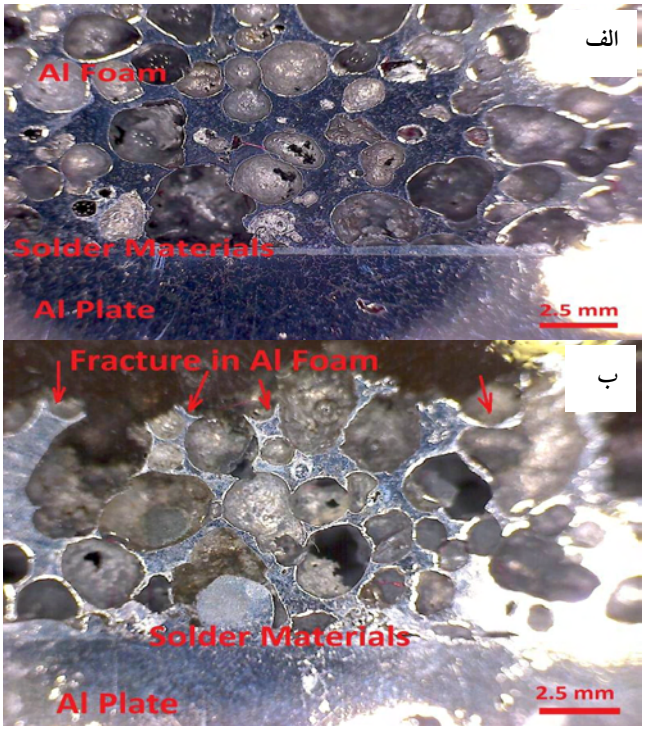
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-01]

رفتار شکست برای نمونهS2 ، S3 و S4 مشابه نمونهS1، بوده است. در برخی نقاط بر روی سطح شکست خود، فوم های آلومینیومی در سطح شکستگی باقی ماند (شکل ۳). بنابراین جدایش در فوم آلومینیومی اتفاق افتاده است و مواد لحیم یا فصل مشترک پیوستگی خود را حفظ مینمایند در نمونه های S5,S6 که در آن روانساز به همراه چرخش ابزار استفاده شده، علاوه بر فوم آلومینیومی ،فصل مشترک لحیم و صفحه آلومینیومی نیز دچار شکست شده است. (شکل۶) بنابراین استفاده از روانساز در فرآیند لحیم کاری چرخشی لزوما منجر به بهبود خواص مکانیکی نخواهد شد.

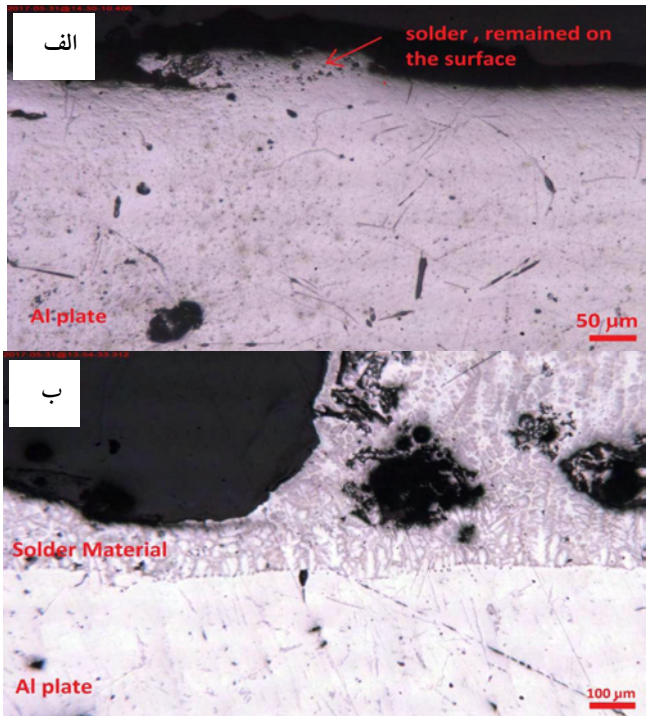


شکل۳- الف)ابزارچرخش و فوم آلومینیومی بعد از آزمون کشش، ب) سطح صفحه آلومینیوم بعد وقبل از لحیم کاری.

سطح فصل مشترک با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و همچنین عناصر موجود در ساختار مورد بررسی قرار گرفت. سه ناحیه مختلف متمایز شد که در شکل(۷) و جدول(۲)، با مناطق A,B,C مشخص شده است



شکل۴-الف) محل اتصال فوم آلومینیوم بهمراه ورق پیش از آزمون کشش، ب)فصل مشترک مورد آزمون و شکست فوم .

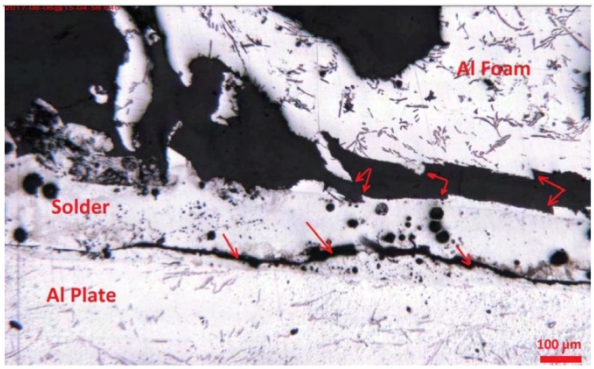


شکل۵-فصل مشترک لحیم و صفحه آلومینیوم پس از آزمون کشش برای نمونه S7.

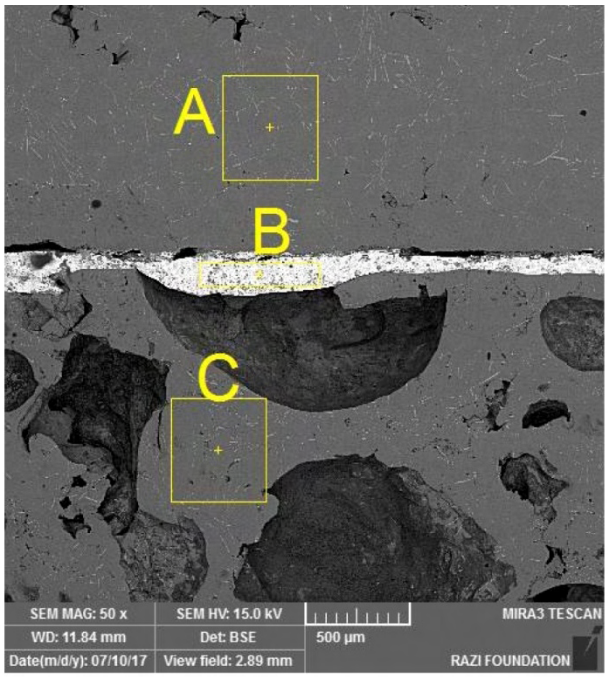
با آنالیز EDS انجام شده مشخص شد(جدول ۲) و مقایسه آن با ترکیب شیمیایی حاصل از روش اسپکترومتری نشری

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-01]

مشخص شد که مناطق نزدیک به فصل مشترک قبل از لحیم‌کاری با ترکیب شیمیایی بعد از لحیم کاری متفاوت است.



شکل۶- در نمونه S5 ایجاد شکست در آزمون کشش درفصل مشترک لحیم /ورق آلومینیومی و لحیم/فوم آلومینیوم .



شکل۷- سطوح مشترک در فرآیند لحیم کاری.

ترکیب شیمیایی مواد لحیم در فصل مشترک قبل از لحیم کاری آنالیز شده با با ترکیب شیمیایی بعد از لحیم کاری در فصل مشترک متفاوت است احتمالا این به دلیل نفوذ متقابل که در طی روند لحیم کاری رخ داده است. به منظور بررسی نفوذ متقابل در طی لحیم کاری ترکیبات عناصرAl ، Mg، Fe و Zn در سطح مشترک توسط یک تجزیه و تحلیل خطی اسکن اندازه‌گیری شد (شکل۸).

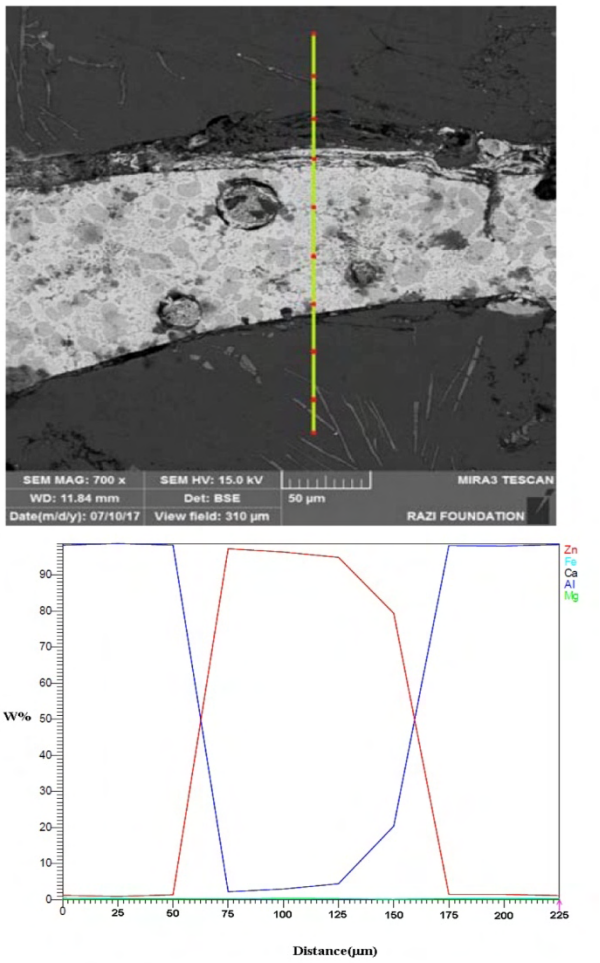
مشاهده شد که عناصر Al و Zn به طور پیوسته در طـول فصـل مشترک وجود دارند، به صورتی که درصد عنصر آلومینیوم از سمت فوم به سمت لحیم به صورت پیوسته کاهش می یابد و همچنین از سمت لحیم به سمت ورق آلومینیوم مجددا افزایش می یابد.

جدول۲- ترکیب شیمیایی هر یک از مناطق A)صفحه آلومینیومی، B)لحیم پایه روی،C)فوم آلومینیومی با آنالیزEDS

ترکیب شیمیایی محدوده A (Al)	Fe	Al	Zn
درصد وزنی عناصر	۱/۳۲	۹۶/۵۸	۲/۰۱

ترکیب شیمیایی محدوده B (Solder)	Fe	Mg	Al	Zn
درصد وزنی عناصر	۰/۰۸	۰/۱۴	۱۱/۵۵	۸۸/۲۳

ترکیب شیمیایی محدوده C (Foam)	Fe	Al	Zn
درصد وزنی عناصر	۱/۱۹	۹۷/۳۱	۱/۴۹



شکل۸-آنالیز خطی سطح مشترک بهمراه ترکیب شیمیایی هر منطقه.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-01]

همچنین در مورد عنصر روی که از سمت لحیم به سمت ورق یا فوم کاهشی پیوسته داشته است. می توان نتیجه گرفت که نفوذ متقابل بین آلیاژ لحیم کاری با فوم آلومینیوم و صفحه آلومینیوم رخ داده است. تجزیه و تحلیل EDS و SEM فقط برای نمونه های که بدون روانساز لحیم کاری شده انجام گرفته است. این نتایج نشان می دهد که نفوذ کافی می تواند در طی لحیم کاری بدون روانساز اتفاق افتاده و باعث ایجاد مقاومت مکانیکی به اندازه کافی برای اتصال صفحات آلومینیومی به فوم آلومینیومی و ایجاد پانل های ساندویچ می شود که به اندازه کافی استحکام برای حمل بارهای تحت سرویس را دارا می‌باشد.

4-نتیجه گیری

با هدف ساخت ساندویچ پانل با هسته فوم آلومینیوم وصفحه آلومینیومی، ضمن ابداع شیوه ای نو با بکارگیری فرآیند لحیم‌کاری بدون استفاده از روانساز و اعمال همزمان چرخش در حوضچه مذاب، منجر به شکستن لایه های اکسید سطحی، همگنی لحیم مذاب و بهبود عملیات نفوذ شد و در نتیجه آن خواص مکانیکی حاصله در مقایسه با نمونه های ساخته شده از طریق لحیم کاری با روانساز و بدون اعمال چرخش، حاصل شد.

- در نمونه های لحیم کاری شده با استفاده از روش چرخش بدون بکارگیری روانساز استحکام کششی بالاتری نسبت به نمونه هایی که فقط با روانساز $ZnCl_2$ متصل شده، حاصل می شود.
- بین آلیاژ لحیم و صفحه آلومینیوم نفوذ همزمان در دوجهت صورت پذیرفته است.
- فرآیند لحیم کاری بدون روانساز بسادگی قابلیت خودکارشدن دارد و قابل انطباق با ساخت اتصالات گوشه/لبه را نیز دارا است.

منابع

1- 1. J. Banhart, " Manufacture, Characterization and application of cellular metals and metal foam", progress in Material Science, Volume 46, Issue 6, pp. 559-632, 2001.

۲- مهـدی دیوانـدری، علیرضـا وحیـدگلپایگانی، حمیدرضـا شاهوردی، " فوم‌های فلزی"، انتشارات دانشگاه علـم و صـنعت ایران، ۱۳۸۵.

3-B. Kriszt, U. Martin, U. Mosler, E. Maire, H.P. Degischer, A. Kottar, "Characterization of Cellular Metals," Handbook of Cellular Metals, 2003.

4- Neugebauer, R., Lies, C., Hohlfeld, J., et al., "Adhesion in sandwiches with aluminum foam core," Production Engineering, vol. 1, no. 3, pp. 271-278, 2007.

5-Nowacki, J., Moraniec, K., "Evaluation of Methods of Soldering AlSi and AlSi-SiC Particle Composite Al Foams," Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 24, no. 1, pp. 426-433, 2015.

6-Dunn, B.D., Chandler, C., "The corrosive effect of soldering fluxes and handling on some electronic materials," Welding Journal, vol. 59, no. 10, pp. 289, 1980.

7-Jarvis, T., Voice, W., and Goodall, R., "The corrosive effect of soldering fluxes and handling on some electronic materials," Welding Journal, vol. 59, no. 10, pp. 289, 1980.

8- Shirzadi, A., Kocak, M., and Wallach, E., "Joining stainless steel metal foams," Science and technology of welding and joining, vol. 9, no. 3, pp. 277-279, 2004.

9- Huang, Y., Gong, J., Lv, S., et al., "Fluxless soldering with surface abrasion for joining metal foams," Materials Science and Engineering: A, vol. 552, pp. 283-287, 2012.

10-Wan, L., Huang, Y., Huang, T., et al., "Novel method of fluxless soldering with self-abrasion for fabricating aluminum foam sandwich," Journal of Alloys and Compounds, vol. 640, pp. 1-7, 2015.

11-Wan, L., Huang, Y., Huang, T., et al, "Interfacial behavior and mechanical properties of aluminum foam joint fabricated by surface self-abrasion fluxless soldering," Journal of Alloys and Compounds, vol. 671, pp. 346-353, 2016.

12- Gheybi Hashemabad, S., Gu, Z., Ando, T., "Flux-less direct soldering of aluminum by ultrasonic surface activation," Journal of Materials Processing Technology, vol. 233, pp. 135-141, 2016.

13-Gickler, A., LePrevost Jr, F., Pan, T., et al., Blue, C.A., Santella, M.L., "Aluminum soldering-a new look".2003.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-01]