

## 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 می نماید. 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، پنل های ساندویچی آلومینیومی، 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

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 [۲۱]. تولید ساختارهای متخلخل از سال ۱۹۹۰ میلادی به سمت صنعتی شدن روش های تولید فوم های فلزی پیشرفت نمود [۳۴]. 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 نیز امکان آسیب ناشی از گشتاور حاصل از سفت شدن پیچ در فوم و صدمه دیدن ساختار آن محتمل است، در اتصال 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 می نماید [۷]. در این بین لحیم کاری با آلیاژ بر پایه روی بدلیل دارا بودن خواصی از قبیل استحکام کششی مطلوب، حداکثر زاویه ترکندگی، 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.

با این 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 همکارانش 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. [۱۰ و ۱۱].

در حالیکه سایر محققین اعمال فعال سازی مکانیکی را جهت افزایش بازدهی اتصال در لحیم کاری مورد بررسی قرار داده اند. 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]. گیگلر 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 [۱۰ و ۱۱] 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 می دهد. 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.

## 2- مواد و روش تحقیق

فوم آلومینیوم سلول بسته در گروه پژوهشی مواد و متالورژی جهاد دانشگاهی مشهد تولید شده است [14]. ترکیب شیمیایی فوم آلومینیوم با استفاده از روش اسپکترومتری نشری شامل  $97/32 \text{ wt. \% Al}$  ،  $1/19 \text{ wt. \% Fe}$  و  $1/49 \text{ wt. \% Zn}$  می شود. دانسیته فوم آلومینیوم  $0/43 \text{ g/cm}^3$  و نسبت تخلخل 85٪ بود. اندازه متوسط سلول 2/52 میلی متر است. از آلومینیوم تجاری xxx 1 برای ساخت ابزار چرخشی (به عنوان صفحه) استفاده شد. شکل (1) نشان دهنده ابزار چرخش با قطر 35 میلیمتر به همراه 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  $5/5 \text{ wt \% Al}$  ،  $0/04 \text{ wt \% Cu}$  ،  $0/1 \text{ wt \% Mg}$  و  $0/03 \text{ wt \% Mn}$  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.

روش انجام شد:

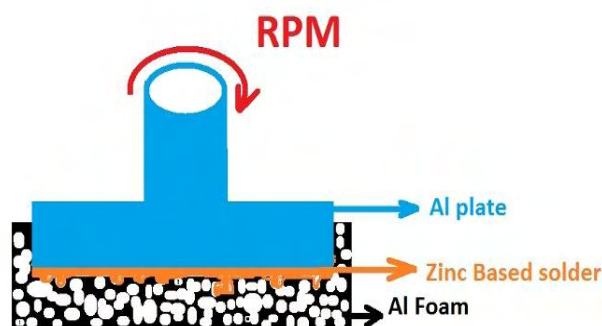
(1) بدون روانساز با چرخش ابزار،  
 (2) با استفاده از روان ساز با چرخش ابزار  
 (3) بدون چرخش و بدون روان ساز تنها با اعمال نیرو بوده است.

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  $100 \times 100$  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 8 نمونه ساخته شده، انجام شد. همانطور که در جدول (1) نشان داده شده است، لحیم کاری بدون روانساز با چرخش ابزار در حوضچه مذاب برای نمونه های S1 ، S2 ، S3 و 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  $(\text{ZnCl}_2)$  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 نمونه S8 ، مذاب لحیم تحت فشار ثابت ورق به فوم آلومینومی 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 (1) مشاهده می شود، استفاده از ابزار چرخشی منجر به ایجاد استحکام



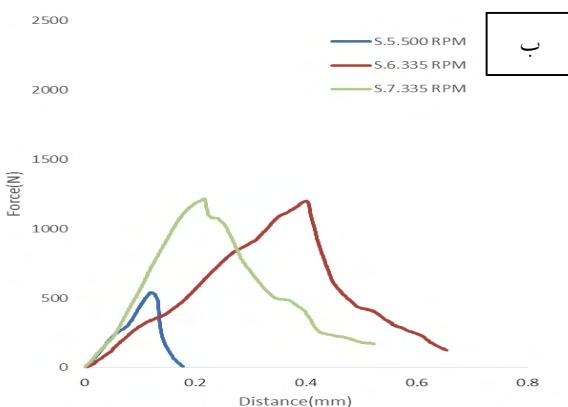
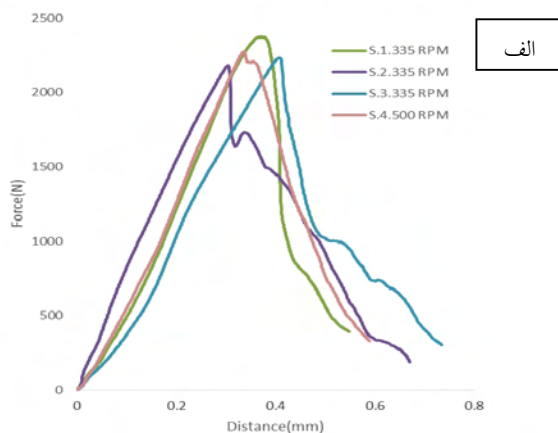
شکل 1- شماتیک ابزار چرخشی با قطر 35 mm قابل چرخش همراه لحیم پایه روی در حوضچه تعبیه شده در فوم آلومینیوم.

سپس مواد لحیم داخل حوضچه فوم آلومینیوم قرار داده شده و در اتمسفر هوا در محدوده دمایی  $411-405$  °C کمی بالاتر از نقطه ذوب آلیاژ با مشعل پروپان حرارت دهی شده و همزمان ورق آلومینومی (ابزار چرخشی) با اتصال به یک دستگاه فرز برای چرخش با نیرویی کمی به سمت حوضچه مذاب هدایت شده روی آن نگه داشته می شود. شایان ذکر است سرعت چرخش ابزار با دو دور مختلف 335 یا 500 دور در دقیقه تنظیم شد. برای نیل به بهترین اتصال، فرآیند لحیم کاری با سه

جدول ۱- 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

شد(شکل ۵) در مورد نمونه S7 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 اعمل بار آزمون کشش همچنان حفظ شده است.



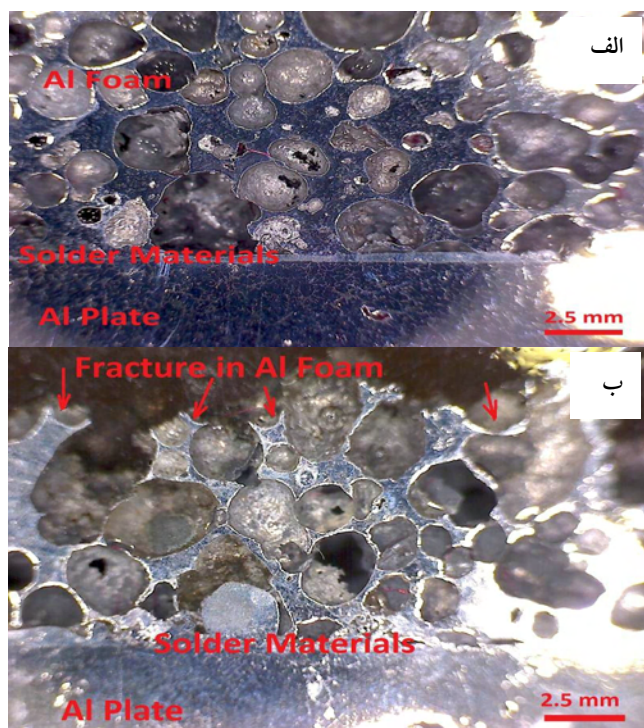
شکل ۲-الف) استحکام کششی برای فرایند لحیم کاری بدون روانساز و ابزار چرخشی، (ب) با روانساز.

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.

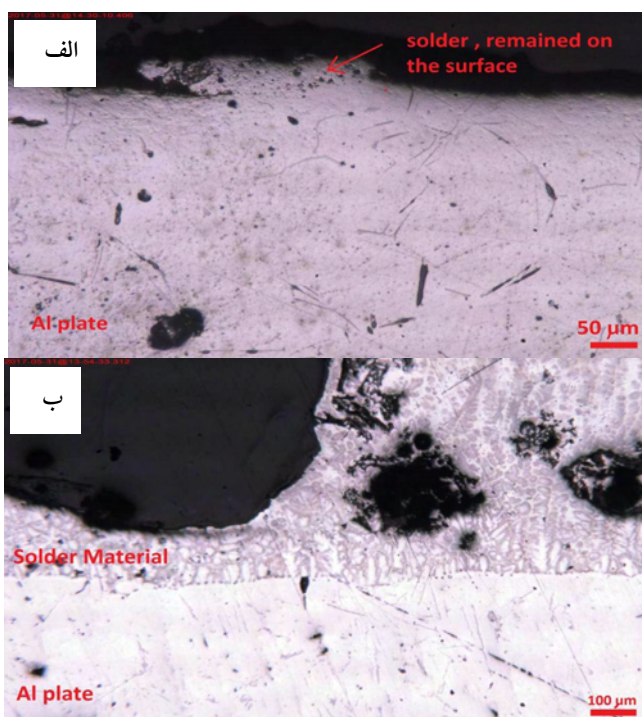
همانگونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، چرخش با دوره‌های ۳۳۵ و ۵۰۰ دور در دقیقه روی استحکام مکانیکی اتصال موثر بوده و نتایج متفاوت ناشی از عدم استفاده از روانساز و چرخش بر استحکام مکانیکی بوضوح مشخص است. در شکل (۳)، ابزار چرخش (صفحه آلومینیومی) قبل و بعد از آزمون کشش نمایش داده شده است، تصویر حاکی از شکست در محل فوم آلومینیومی و حفظ پیوند بین لحیم، ابزار چرخش 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 فرایند لحیم کاری بدون روانساز و مواد لحیم بکار برده شده است. برای نمونه های S1 و S7 تصاویر میکروسکپ نوری تهیه





شکل ۴-الف) محل اتصال فوم آلومینیوم به همراه ورق پیش از آزمون کشش،  
ب) فصل مشترک مورد آزمون و شکست فوم .



شکل ۵-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

رفتار شکست برای نمونه S2، S3 و S4 مشابه نمونه S1 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. (شکل ۶) بنابراین  
استفاده از روانساز در فرآیند لحیم کاری چرخشی لزوما منجر  
به بهبود خواص مکانیکی نخواهد شد.



شکل ۳-الف) ابزار چرخش و فوم آلومینیومی بعد از آزمون کشش، ب) سطح  
صفحه آلومینیوم بعد و قبل 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

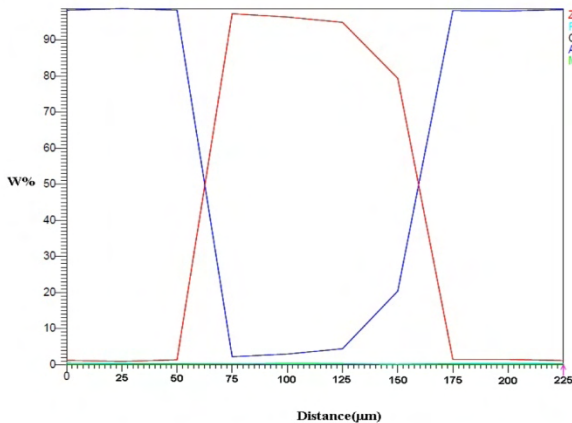
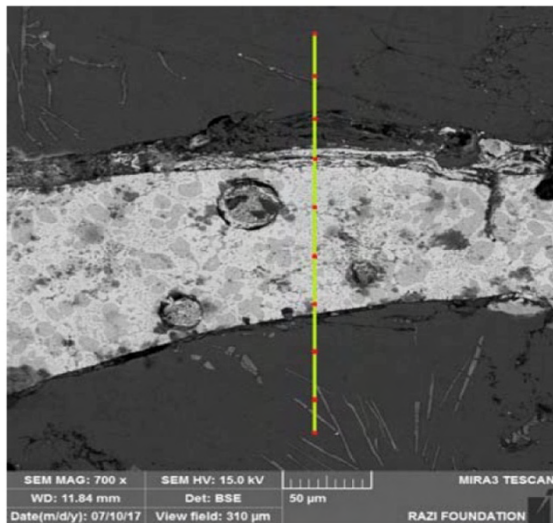
مشاهده شد که عناصر Zn و Al به طور پیوسته در طول فصل مشترک وجود دارند، به صورتی که درصد عنصر آلومینیوم از سمت فوم به سمت لحیم به صورت پیوسته کاهش می یابد و همچنین از سمت لحیم به سمت ورق آلومینیوم مجدداً افزایش می یابد.

جدول ۲- ترکیب شیمیایی هر یک از مناطق (A) صفحه آلومینیومی، (B) لحیم پایه روی، (C) فوم آلومینیومی با آنالیز EDS

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

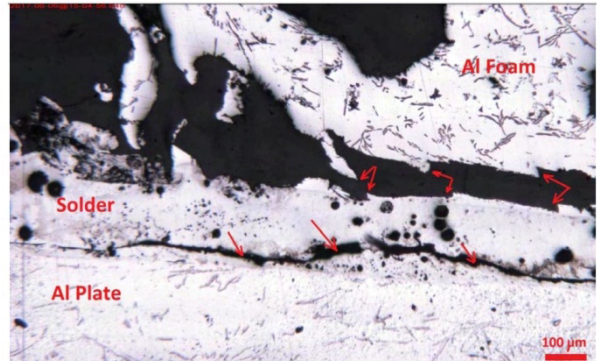
ترکیب شیمیایی محدوده (Solder) B	Fe	Mg	Al	Zn
درصد وزنی عناصر	۰/۰۸	۰/۱۴	۱۱/۵۵	۸۸/۲۳

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

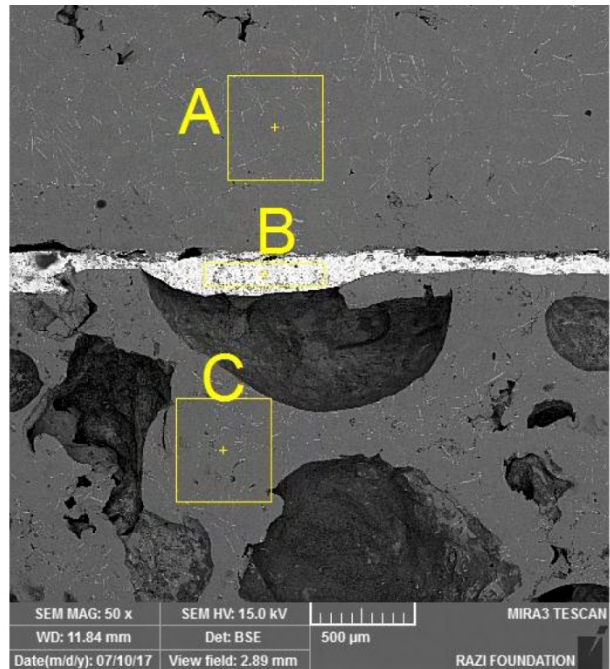


شکل ۸- آنالیز خطی سطح مشترک همراه ترکیب شیمیایی هر منطقه.

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



شکل ۶- در نمونه S5 ایجاد شکست در آزمون کشش در فصل مشترک لحیم / ورق آلومینیومی و لحیم / فوم آلومینیوم.



شکل ۷- سطوح مشترک در فرآیند لحیم کاری.

ترکیب شیمیایی مواد لحیم در فصل مشترک قبل از لحیم کاری آنالیز شده با ترکیب شیمیایی بعد از لحیم کاری در فصل مشترک متفاوت است احتمالاً این به دلیل نفوذ متقابل که در طی روند لحیم کاری رخ داده است. به منظور بررسی نفوذ متقابل در طی لحیم کاری ترکیبات عناصر Al، Mg، Fe و Zn در سطح مشترک توسط یک تجزیه و تحلیل خطی اسکن اندازه گیری شد (شکل ۸).

مشاهده شد که عناصر Zn و Al به طور پیوسته در طول فصل



in Material Science, Volume 46, Issue 6, pp. 559-632, 2001.

۲- مهدی دیواندری، علیرضا وحیدگلپایگانی، حمیدرضا شاهرودی، "فوم‌های فلزی"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت 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., "Fluxless 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.

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 آلایژ 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 می باشد.

#### 4- نتیجه گیری

با هدف ساخت ساندویچ پانل با هسته فوم آلومینیوم و صفحه آلومینیومی، ضمن ابداع شیوه ای نو با بکارگیری فرآیند لحیم کاری 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 آلایژ لحیم و صفحه آلومینیوم نفوذ همزمان در دو جهت صورت پذیرفته است.

- فرآیند لحیم کاری بدون روانساز بسادگی قابلیت خودکار شدن 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