

# لحیم کاری سخت ورقهای آلومینیومی دولایه ۳۰۰۳/۴۰۴۳ به آلومینیوم ۳۰۰۳

سید حمیدرضا مداح حسینی

استادیار دانشکده مهندسی و علم مواد- دانشگاه صنعتی شریف

امیرحسین کوبی

استاد دانشکده مهندسی و علم مواد - دانشگاه صنعتی شریف

محمد حاجی زاده

کارشناس ارشد مهندسی مواد - سازمان انرژی اتمی

(تاریخ دریافت ۸۲/۱۲/۲۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۳/۱۱/۲۴، تاریخ تصویب ۸۴/۴/۱۱)

## چکیده

در این تحقیق، لحیم کاری ورقهای دو لایه آلیاژهای آلومینیوم ۳۰۰۳/۴۰۴۳ به آلیاژ ۳۰۰۳ تحت خلأ  $10^{-5}$  mbar و با طرح اتصال لبه روی هم انجام و استحکام اتصال لحیم به روش آزمون برش اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان همپوشانی، استحکام اتصال لحیم افت می کند و بالاترین استحکام در اتصالاتی با حداقل میزان همپوشانی (۲ mm) حاصل می گردد. همچنین مشخص شد که بیشترین استحکام اتصال در محدوده ضخامت فیلر ۵۰ تا ۱۰۰  $\mu\text{m}$  بدست می آید. در ضخامتهای کمتر از ۵۰  $\mu\text{m}$ ، حلالیت بالای آلومینیوم (فلز پایه) در فیلر منجر به رقیق شدن فیلر در حین لحیم کاری و کاهش استحکام اتصال می گردد. با افزایش ضخامت روکش به بیش از ۵۰ تا ۱۰۰  $\mu\text{m}$ ، به دلیل ترد و شکننده بودن ساختار یوتکتیک اصلاح نشده، استحکام اتصال مجدداً کاهش می یابد. اندازه گیری میزان تابیدگی نمونه ها نشان داد که مقاومت به تابیدگی ورقهای دو لایه به درصد کاهش سطح مقطع آنها وابسته نیست. بر اساس مشاهدات ریزساختاری در این پژوهش، میزان نفوذ سیلیسیم به مرزدهانه های فلز پایه محدود می باشد. این امر که ناشی از پائین بودن مقدار سیلیسیم در فیلر و کاهش حجم مذاب یوتکتیک است ممکن است علت اصلی عدم وابستگی مقاومت به تابیدگی نمونه ها به درصد کاهش سطح مقطع باشد. شکست نگاری اتصالات پس از انجام آزمایش برش، وجود دو ناحیه شکست ترد (در محل لحیم) و شکست نرم (در فصل مشترک لحیم و فلز پایه) را نشان داد.

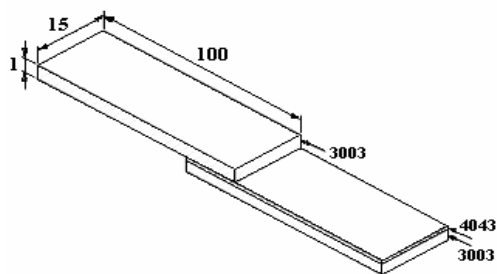
**واژه های کلیدی:** لحیم کاری سخت آلومینیوم<sup>۱</sup>، ورقهای لحیم کاری<sup>۲</sup>، لحیم کاری بدون فلاکس<sup>۳</sup>، آزمایش برش<sup>۴</sup>

## مقدمه

استفاده از ورقهای لحیم کاری نسبت به اعمال فیلر به شکل سیم، لایه فلز و پودر، به خصوص برای تولید انبوه قطعات پیچیده مناسب تر است. ورق لحیم کاری می تواند تحت کشش، خمش و سایر فرآیندهای شکل دهی قرار گیرد [۳]. لایه روکش<sup>۵</sup> (فیلر) همواره دمای ذوب پائینتری نسبت به فلز اصلی<sup>۶</sup> دارد. در فرآیند تولید مبدلهای حرارتی، بعد از سوار کردن اجزاء آن را تا دمائی که فقط لایه روکش ذوب شده ولی فلز پایه به صورت جامد باقی بماند، حرارت می دهند. در نتیجه روکش ذوب شده و تحت اثر نیروی موئینگی در محل اتصال سیلان می یابد. پس از سرد شدن قطعه، اتصال در نواحی مورد نظر برقرار می گردد [۲۱].

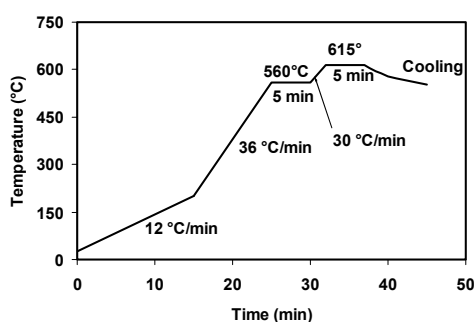
لحیم کاری سخت روشی برای ایجاد اتصالات دائمی در گستره وسیعی از مواد و قطعات است. به عنوان مثال، امروزه فرآیند اصلی تولید مبدلهای حرارتی آلومینیومی نظیر رادیاتور، کندانسور و تبخیر کننده، لحیم کاری است. آلیاژهای آلومینیوم به دلیل مقاومت به خوردگی، شکل پذیری و هدایت حرارتی مناسب برای ساخت این مبدلهای ایده آل هستند [۱]. ورقهای لحیم کاری آلومینیوم به طور وسیعی در تولید مبدلهای حرارتی به کار می روند. این ورقها شامل یک کامپوزیت دو یا چند لایه از حداقل دو آلیاژ آلومینیوم هستند که از طریق اتصال نوردی تولید می شوند. لایه فیلر موجود بر روی یک یا دو سطح خارجی ورق آلومینیوم، بخش کوچکی از ضخامت ورق (حدود ۱۰٪ کل ضخامت ورق) را تشکیل می دهد [۲].

با میزان همپوشانی متفاوت (۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲mm) انتخاب شد (شکل ۱).



شکل ۱: نمائی از اتصال لبه روی هم ورقهای آلومینیوم دو لایه ۳۰۰۳/۴۰۴۳ به ۳۰۰۳.

برای حفظ موقعیت اجزاء اتصال نسبت به هم در حین اعمال سیکل لحیم کاری، از دو صفحه فولادی با ضخامت ۶ mm به عنوان قید و بست استفاده شد. بدین منظور، اجزاء بلافاصله پس از آماده سازی سطح در بین دو صفحه قرار داده شده و توسط چهار عدد پیچ و مهره از جنس فولاد زنگ نزن کاملاً مهار شدند. مجموعه دو صفحه و قید و بستها به صورت افقی در محفظه یک کوره خلأ مقاومتی از نوع Ruhstrat KG 3401 قرار داده شد. سپس لحیم کاری مطابق سیکل نشان داده شده در شکل (۲) تحت دمای  $615 \pm 5$  °C و محیط خلأ  $5 \times 10^{-5}$  mbar انجام شد. نمونه ها پس از لحیم کاری در کوره با سرعت  $2$  °C/hr سرد شدند.



شکل ۲: سیکل دمائی عملیات لحیم کاری.

### آزمون برش

جهت بررسی تاثیر میزان همپوشانی و ضخامت لایه روکش بر استحکام اتصال لحیم، آزمون برش بر روی نمونه ها صورت گرفت. برای انجام این آزمون، نمونه های لحیم کاری شده در جهت طولی نورد مطابق استاندارد HOUNSFIELD ASTM D1002-72 توسط دستگاه H10KS تحت کشش قرار گرفتند (شکل ۳).

فرآیند لحیم کاری آلومینیوم از بسیاری جهات با لحیم کاری سایر فلزات متفاوت است. هدایت حرارتی آلومینیوم بسیار بالاست و به سرعت اکسید می شود. ضریب انبساط حرارتی آن بالاتر از بسیاری از فلزات است و به محض اینکه در معرض هوا قرار گیرد، سطح آن اکسید می شود. اکسید آلومینیوم در دمای ذوب آلومینیوم، ذوب یا احیاء نمی شود. بنابراین، لحیم کاری آلومینیوم در اتمسفر معمولی نیاز به یک روانساز جهت زدودن اکسیدها دارد. روش عمومی لحیم کاری آلومینیوم در اتمسفر معمولی بدین ترتیب است که سطوح اتصال تمیز شده و در فاصله بسیار کمی ( $0.15 - 0.25$  mm) نسبت به هم قرار می گیرند. فیلر در محل اتصال یا در نزدیکی آن قرار گرفته و سطوح اتصال توسط روانساز مناسب پوشانده می شود. پس از اعمال حرارت، روانساز با اکسید آلومینیوم موجود بر روی سطح فلز پایه و فیلر واکنش داده و سطح را از تماس با هوا محافظت می کند. پس از ذوب شدن فیلر، نیروی موئینگی موجب کشیده شدن آن به داخل درز اتصال می گردد. هنگامیکه فیلر جریان می یابد، فلاکس را جا به جا کرده و سطح داغ فلز پایه را خیس می کند. فیلر خود را با بی نظمی های سطحی موجود در مسیر وفق می دهد. همه این مراحل ممکن است در چند ثانیه انجام شود. نفوذ فیلر در لایه نازکی از سطح فلز پایه موجب آلیاژی شدن فیلر و فلز پایه می گردد که گاهی اوقات سودمند ولی در اغلب موارد ناخواسته است. از آنجا که فاصله دمائی خط ذوب<sup>۷</sup> فیلر تا خط انجماد<sup>۸</sup> فلز پایه در لحیم کاری آلومینیوم بسیار کم است، کنترل دقیق دما در سیکل لحیم کاری اهمیت زیادی دارد [۳].

### روش پژوهش

#### تهیه نمونه ها

ورقهای دو لایه آلیاژهای آلومینیوم ۳۰۰۳/۴۰۴۳ از طریق اتصال نوردی تهیه شدند و پس از انجام عملیات حرارتی، به عنوان اجزاء تشکیل دهنده اتصال مورد استفاده قرار گرفتند. ترکیب شیمیائی این آلیاژها که به روش شیمی تر حاصل شده در جدول (۱) با ترکیب اسمی آنها مقایسه شده است.

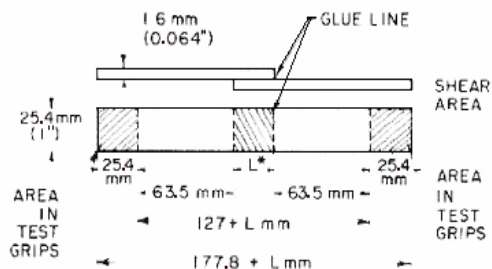
جزئیات تولید ورقهای لحیم دو لایه در مقاله دیگری شرح داده شده است [۴]. طرح اتصال اجزاء از نوع لبه روی هم<sup>۹</sup>

جدول ۱: ترکیب شیمیایی مواد اولیه بر حسب درصد وزنی .

آلیاژ	ترکیب شیمیایی	Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Al%
AA 3003	استاندارد	۰/۶	۰/۷	۰/۲ ۰/۰۵	۱-۱/۵	-	باقیمانده
	واقعی	۰/۴	۰/۶	۰/۱	۱/۱	-	باقیمانده
AA 4043	استاندارد	۴/۵-۶	۰/۸	۰/۳	۰/۰۵	۰/۰۵	باقیمانده
	واقعی	۶/۱	۰/۴	۰/۲	۰/۰۳	۰/۰۵	باقیمانده

اسید فلوریدریک ۴۸٪، ۱۶CC محلول ۳gr اسید کرومیک در ۱۰CC آب و ۱CC آب بود [۵ و ۶].

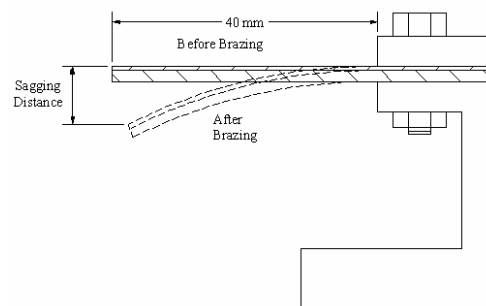
به منظور مطالعه ریزساختار و بررسی توزیع سیلیسیم از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Philips XL30 مجهز به فیلمان Lab6 استفاده شد. از ریزساختار نمونه‌ها تصاویر الکترونی ثابته و برگشتی تهیه شد. همچنین ترکیب شیمیایی فازهای موجود به روش EDX آنالیز شد.



شکل ۳: نمونه آزمون برش [۳۱].

### آزمون تابیدگی<sup>۱۰</sup>

جهت اندازه‌گیری میزان تاب برداشتن کامپوزیتهای دو لایه در سیکل لحیم کاری، از آزمون تابیدگی استفاده شد. بدین منظور، نمونه‌های کامپوزیت از یک انتها ثابت شده و مطابق شکل (۲) تحت سیکل لحیم کاری قرار گرفتند. سپس میزان تابیدگی انتهای آزاد نمونه‌ها بعد از لحیم کاری اندازه‌گیری شد (شکل ۴).



شکل ۴: نمایی از نحوه انجام آزمون تابیدگی.

### نتایج و شرح نتایج

شکل (۵) تغییرات نیروی شکست و استحکام لحیم در آزمایش برش را بر حسب میزان همپوشانی اتصال بیان می‌کند. هنگامیکه یک اتصال لبه روی هم تحت کشش قرار گیرد، به علت تمرکز تنش ناشی از اختلاف کرنش اجزاء و فیلر و بارگذاری خارج از مرکز، بیشترین تنش برشی در دو انتهای اتصال اعمال می‌گردد [۷]. به همین دلیل، افزایش طول اتصال (میزان همپوشانی) بعد از مقدار مشخصی نمی‌تواند منجر به افزایش استحکام اتصال شود. در صورتیکه طول اتصال از محدوده بهینه بیشتر باشد، میزان تنش اعمالی بر بخش مرکزی اتصال درمقایسه با دو انتها کم و گاهی ناچیز است. تنشهای اصلی که موجب شکست یک اتصال لبه روی هم می‌شوند، تنشهای کششی هستند که عمود بر دو انتهای اتصال عمل می‌کنند. وجود این تنشها ناشی از خارج از مرکز بودن بارگذاری است [۷].

در شکل (۵)، استحکام اتصال نمونه‌هایی که از محل اتصال باز شده‌اند، با خط توپر نشان داده شده است. قسمت نقطه چین نمودار در این شکل نتایج واقعی استحکام اتصال نمی‌باشد و تنها از برون یابی نتایج تجربی تخمین زده شده است. در این بخش از نمودار، اندازه‌گیری استحکام واقعی اتصال به دلیل پاره شدن نمونه‌ها خارج از محل اتصال امکان‌پذیر نیست.

### متالوگرافی

به منظور بررسی ریزساختار و اندازه‌گیری ضخامت لایه روکش (آلیاژ ۴۰۴۳)، متالوگرافی توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی انجام شد. نمونه‌ها پس از سنباده زنی، پولیش و حکاکی مورد مطالعه میکروسکوپی قرار گرفتند. محلول حکاکی شامل ۱۲CC اسید کلریدریک غلیظ، ۱۶CC اسید نیتریک غلیظ، ۱CC

ج) خواص ترکندگی این فیلرها هنگامیکه بدون فلاکس به کار گرفته شوند پائین است. دلیل این موضوع واکنش شدید آلومینیوم با اکسیژن و دیر گداز بودن اکسید آلومینیوم تشکیل شده است [۷]. هرچند در تحقیق حاضر از روش لحیم کاری تحت خلأ استفاده شده است، لایه‌های اکسید طبیعی آلومینیوم (اکسید و هیدروکسید آلومینیوم) را نمی‌توان صرفاً با کاهش فشار جزئی اکسیژن در اتمسفر لحیم کاری بر طرف ساخت، مگر اینکه عواملی که قادر به احیاء لایه اکسید آلومینیوم هستند (مثل منیزیم) به ترکیب شیمیائی فیلر اضافه شوند [۷، ۹ و ۱۰].

د) در این تحقیق امکان سرد کردن نمونه‌ها در هوا بعد از سیکل لحیم کاری وجود نداشت. سرد شدن آرام منجر به ایجاد ساختار درشت و در نتیجه کاهش استحکام شکست لحیم می‌گردد.

ه) تمرکز تنش ناشی از نوع بارگذاری (بارگذاری خارج از مرکز) نیز عاملی برای کاهش استحکام شکست است. در بارگذاری طولی اتصالات لبه روی هم، میزان تنش کششی عمود بر سطح اتصال در دو انتها حدود ۴ برابر تنش کششی اعمالی است [۷]. این تنش کششی عمودی منشأ شروع ترک از دو انتها است. به عبارت دیگر، در اینجا شکست از نوع لایه‌کنی است.

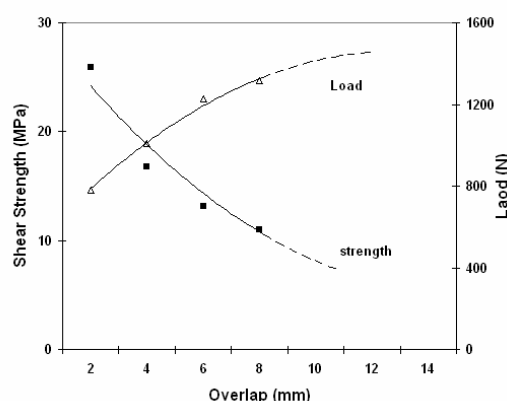
با افزایش میزان همپوشانی، نیروی لازم برای شکست اتصال از نیروی لازم برای شکست فلز پایه فزونی می‌گیرد (هرچند استحکام اتصال کاهش می‌یابد)، در نتیجه شکست در فلز پایه رخ می‌دهد. بخش نقطه‌چین نمودار شکل (۵) ممکن است تخمین مناسبی از استحکام فلز پایه برای چنین نمونه‌ای باشد.

مقدار بهینه همپوشانی را می‌توان به کمک رابطه زیر

$$X = \frac{YTW}{L} \quad [۳]$$

که در آن X طول همپوشانی، T استحکام لایه نازکتر، Y ضریب اطمینان، W ضخامت لایه نازکتر و L استحکام برشی آلیاژ لحیم است. در حالت ایده‌آل اگر ضریب اطمینان در محاسبه میزان همپوشانی لحاظ نشود (Y=1)، میزان همپوشانی ۱/۶ mm به دست می‌آید. معمولاً در شرایط عملی، یک ضریب اطمینان ۴ تا ۵ در نظر گرفته می‌شود [۳].

شکل (۶) تغییرات استحکام برشی را بر حسب ضخامت روکش (آلیاژ ۴۰۴۳) نشان می‌دهد. با توجه به این



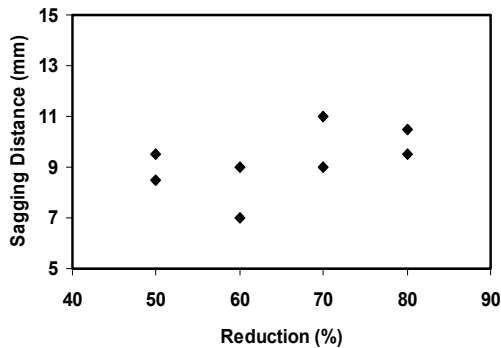
شکل ۵: مقایسه تغییرات نیروی شکست و استحکام اتصال بر حسب میزان همپوشانی (ضخامت فلز پایه: ۰/۷mm، ضخامت روکش: ۰/۲۸mm).

با افزایش طول اتصال، نیروی شکست اتصال افزایش می‌یابد ولی میزان افزایش نیرو در مقایسه با افزایش سطح اتصال کم است و در نتیجه استحکام اتصال کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل (۵) قابل مشاهده است، هنگامیکه میزان همپوشانی کمتر از ۸mm باشد، شکست در محل اتصال رخ می‌دهد. علت شکست از محل اتصال پائین بودن استحکام لحیم است. برخی از دلایل پائین بودن استحکام لحیم عبارتند از:

الف) میزان حلالیت آلومینیوم (فلز پایه) در فیلر بالا است. تغییر ترکیب شیمیایی فیلر، دمای ذوب آنرا افزایش داده و از سیلان جانبی و تشکیل اتصال یکنواخت جلوگیری می‌کند [۷].

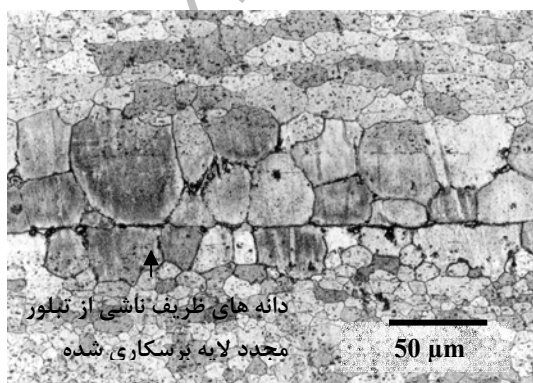
ب) پائین بودن درصد سیلیسیم، منجر به افزایش دامنه انجماد لحیم می‌گردد. در آلیاژهایی با گستره انجماد طولانی که از حالت مایع سرد می‌شوند، دندریتهای ابتدائی به وسیله مذاب از هم جدا می‌شوند و آلیاژ استحکام کافی ندارد. با کاهش دما، حجم فاز جامد نسبت به مذاب افزایش می‌یابد و در نقطه‌ای معین دندریتهای در حال رشد به هم رسیده و آلیاژ استحکام مکانیکی زیادی پیدا می‌کند. از این مرحله به بعد، مقدار محدودی مذاب وجود دارد که تا رسیدن به دمای یوتکتیک باقی می‌ماند. چنانچه تنش انقباضی ناشی از انجماد به اندازه کافی بزرگ باشد، سبب ایجاد ترک در این زمینه ضعیف و شکننده می‌شود. چنین ترکهایی ممکن است در حد میکروسکوپی یا ماکروسکوپی باشند [۸].

خلاف انتظار، میزان تابیدگی نمونه‌ها مستقل از درصد کاهش سطح مقطع است. برای تشخیص علت چنین پدیده‌ای، ریزساختار نمونه‌ها در محل اتصال مورد مطالعه قرار گرفت.



شکل ۷: تغییرات تابیدگی برحسب میزان کاهش سطح مقطع (ضخامت فلز پایه: ۰/۴۰ mm، ضخامت فیلر: ۰/۱۰ mm).

شکل (۸) تصویر میکروسکوپ نوری از محل اتصال لحیم را پس از حکاکی نشان می‌دهد. یک نکته جالب در این تصویر، ریز شدن دانه‌های فلز پایه در مجاورت لحیم می‌باشد. در فرآیند تولید ورقهای دو لایه لحیم کاری جهت آماده‌سازی نمونه‌ها پیش از نورد، سطح آنها برس زده می‌شود [۴]. برسکاری موجب تشکیل یک لایه کار سخت شده در سطح می‌گردد. تبلور مجدد لایه کار سخت شده در حین لحیم کاری، دانه‌های بسیار ریزی را در مرز لحیم و فلز پایه ایجاد می‌کند. در تصاویر میکروسکوپی این مطلب به صورت چند ردیف دانه ظریف در مرز آلیاژ لحیم و فلز پایه نمود می‌یابد. ساختار یوتکتیک Al-Si در مرز دانه‌های آلیاژ لحیم در بزرگنمایی بالاتر قابل مشاهده است (شکل ۹).

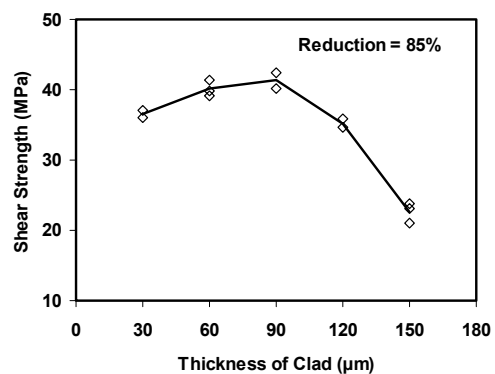


شکل ۸: تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع اتصال لحیم.

نمودار، مشاهده می‌شود که در ابتدا استحکام لحیم با افزایش ضخامت فیلر افزایش یافته و سپس دچار یک سیر نزولی می‌شود.

علت پائین بودن استحکام در ضخامتهای کم (کمتر از ۵۰ μm)، ممکن است ناشی از حلالیت بالای آلومینیوم (فلز پایه) نسبت به فیلر باشد که منجر به تغییر ترکیب شیمیایی فیلر و رقیق شدن آن در حین لحیم کاری می‌گردد [۳]. این پدیده، مخصوصاً هنگامی که ضخامت فیلر خیلی کم است، مقدار لحیم را کاهش داده و منجر به اتصال ضعیف می‌شود.

با افزایش ضخامت فیلر پس از محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ μm، استحکام اتصال مجدداً کاهش می‌یابد و به استحکام لحیم نزدیکتر می‌شود [۳]. با توجه به ترد و شکننده بودن ساختار یوتکتیک اصلاح نشده [۱۱ و ۱۰]، کاهش استحکام اتصال با افزایش ضخامت فیلر توجیه پذیر است. علاوه بر این، با افزایش ضخامت فیلر، تمرکز تنش در دو انتهای اتصال افزایش می‌یابد [۷].

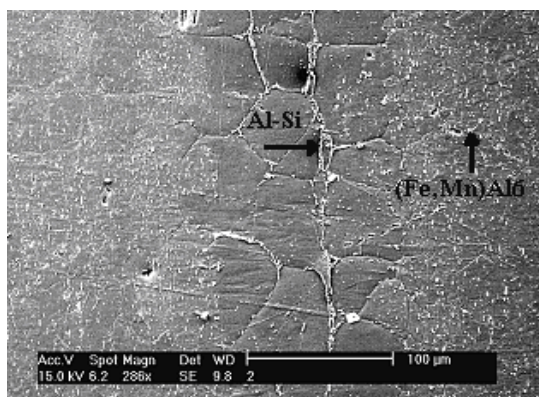


شکل ۶: تغییرات استحکام برشی اتصال لحیم بر حسب ضخامت فیلر (۸۵٪ کاهش سطح مقطع).

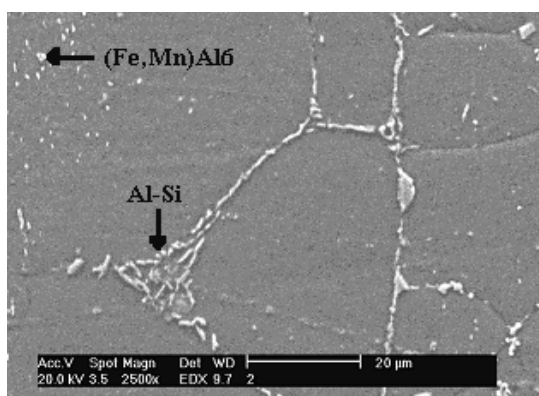
شکل (۷) نتایج آزمون تابیدگی را نشان می‌دهد. پدیده تابیدگی متأثر از نفوذ لایه‌های مذاب در طول مرز دانه‌های فلز پایه و رسوب سیلیسیم در آنجا است. بنابراین مقاومت به تابیدگی ارتباط مستقیمی با ریز ساختار فلز پایه دارد [۱۰، ۱۲، ۱۳ و ۱۴]. با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، ساختار ظریفتری پس از تبلور مجدد حاصل می‌شود. با ریز شدن اندازه دانه‌ها و در نتیجه افزایش مساحت مرزها، مسیرهای نفوذ لحیم به فلز پایه افزایش یافته و مقاومت به تابیدگی افت می‌کند [۱۲ و ۱۵].

همانطور که در نمودار شکل (۷) مشاهده می‌شود، بر

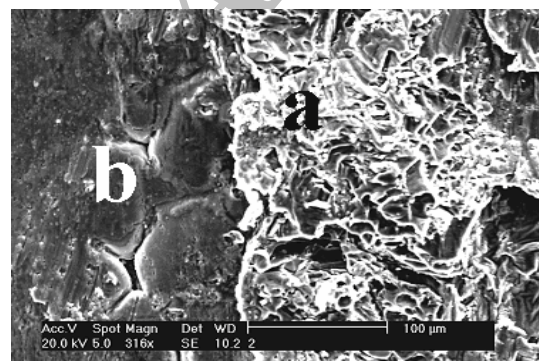
۲) ناحیه‌ای که شکست در آلیاژ لحیم رخ داده است. این نوع شکست با توجه به ساختار و ماهیت آلیاژ لحیم یک شکست ترد محسوب می‌شود (ناحیه b). آنالیز شیمیایی این ناحیه از سطح شکست (شکل ۱۳) وجود سیلیسیم در آن را تأیید می‌کند.



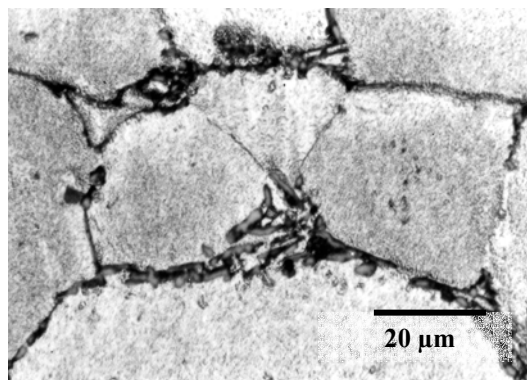
شکل ۱۰: تصویر میکروسکوپ الکترونی از آلیاژ لحیم و فلز پایه.



شکل ۱۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی از آلیاژ لحیم.



شکل ۱۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح شکست اتصال لحیم (a: منطقه شکست نرم، b: منطقه شکست ترد).



شکل ۹: ساختار یوتکتیک Al-Si در مرزخانه‌های آلیاژ لحیم.

شکل (۱۰) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از لحیم و فلز پایه را نشان می‌دهد. همانطور که در این تصاویر دیده می‌شود، سیلیسیم به مرزخانه‌های فلز پایه نفوذ نکرده و تجمع سیلیسیم (به صورت فاز یوتکتیک Al-Si) فقط در مرزخانه‌های آلیاژ لحیم قابل مشاهده است. در تصویر شکل (۱۰) ذرات پراکنده‌ای درون ساختار فلز پایه مشاهده می‌شوند که آنالیز این ذرات به روش EDX نشان داد که از نوع ترکیب بین فلزی  $(Fe, Mn)Al_6$  هستند. تجمع سیلیسیم در مرزخانه‌های لحیم و ذرات پراکنده  $(Fe, Mn)Al_6$  در ریز ساختار فلز پایه در تصویر شکل (۱۱) با بزرگنمایی بیشتر نشان داده شده‌اند. عدم نفوذ سیلیسیم به مرزخانه‌های فلز پایه می‌تواند ناشی از پائین بودن مقدار سیلیسیم فیلر و کاهش حجم مذاب یوتکتیک (طبق قانون اهرم) باشد. کم بودن فاصله تابیدگی در اتصالات لحیم معمولاً تابعی از ریزدانه‌گی ساختار فلز لحیم و نحوه انجماد آن است [۱۲ و ۱۵]. با افزایش درصد سیلیسیم و میزان فاز یوتکتیک در لحیمهای آلومینیوم، میزان نفوذ سیلیسیم به مرز دانه‌های آلیاژ پایه آلومینیوم افزایش یافته و میزان تابیدگی زیاد می‌شود [۱۰]. از مجموع مشاهدات ریزساختاری در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که عدم وابستگی مقاومت به تابیدگی نمونه‌ها به درصد کاهش سطح مقطع ممکن است ناشی از پائین بودن مقدار سیلیسیم فیلر باشد.

شکل (۱۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی یک سطح شکست از اتصال لحیم را نشان می‌دهد. در سطح شکست دو ناحیه مشاهده می‌شود:

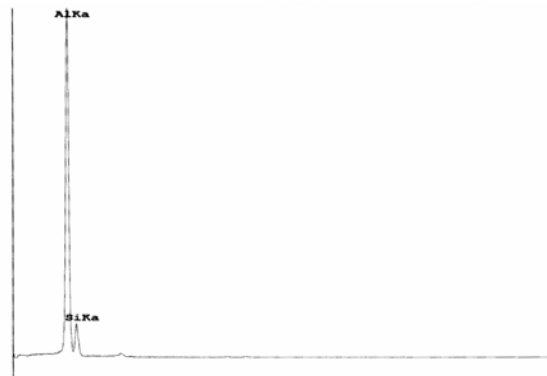
۱) ناحیه‌ای که شکست در فصل مشترک لحیم و فلز پایه رخ داده و از نوع شکست نرم است (ناحیه a).

میزان همپوشانی (۲ mm) بدست می‌آید. با افزایش میزان همپوشانی، نیروی شکست اتصال تا رسیدن به استحکام فلز پایه افزایش یافته ولی از آنجا که میزان افزایش نیرو در مقایسه با افزایش سطح اتصال کوچک است، از استحکام اتصال کاسته می‌شود.

۲- بالاترین استحکام شکست در اتصالاتی با ضخامت روکش ۵۰ تا ۱۰۰  $\mu m$  حاصل می‌شود.

۳- میزان تابیدگی ورقهای دو لایه مستقل از درصد کاهش سطح مقطع فلز پایه است که می‌تواند ناشی از پائین بودن مقدار سیلیسیم در فلز فیئر باشد.

۴- سطح شکست اتصال لحیم در فصل مشترک لحیم و فلز پایه از نوع شکست نرم و در منطقه آلیاژ لحیم که دارای میزان سیلیسیم حدود ۱۹/۴ درصد است، از نوع شکست ترد می‌باشد.



Element	Wt %	At %
AlK	79.96	80.60
SiK	20.04	19.40
Total	100.00	100.00

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
AlK	3052.43	19.26	0.31	158.51
SiK	276.37	18.09	1.05	15.28

شکل ۱۳: آنالیز شیمیایی سطح شکست ترد به روش EDX.

## نتیجه گیری

۱- بالاترین استحکام شکست در اتصالات لحیم با حداقل

## مراجع

- 1 - Yao, X. X. and Sandstrom, R. (1999) "Strain-controlled fatigue of a braze clad Al-Mn-Mg alloy at room temperature." *Mat. Sci. Eng.*, A267, PP. 1-6.
- 2 - Sekulic, D. P. (2001). "Molten aluminum equilibrium membrane formed during controlled atmosphere brazing." *Int. J. Eng. Sci.*, Vol. 39, PP. 229-241.
- 3 - *Aluminum Brazing Handbook (1990) Aluminum Association*, 4th. Ed.
- ۴- کویچی، ا. ح.، مداح حسینی، ح. ر. و حاجی زاده، م. "ساخت ورقهای لحیم دولایه AA 3003/AA 4043 به روش نورد سرد." نشریه علمی و فناوری امیرکبیر، سال پانزدهم، شماره د-۵۹، تابستان (۱۳۸۳).
- 5 - *Aluminum and Aluminum Alloys (1993) ASM Specialty Handbook*.
- 6 - Petzow, G. (1999). "Metallographic etching." *ASM International*, 2nd Ed.
- ۷- مداح حسینی، ح. و مازار اتابکی، م. "لحیم کاری سخت و نرم." انتشارات جهان جام جم، چاپ اول، ص. ۱۲۵-۱۳۰، (۱۳۸۳).
- 8 - Lancaster, J. F. (1999). *Metallurgy of Welding*, Abington Publishing. Sixth Ed.
- 9 - Schwartz, M. (1995). *Brazing for the Engineering Technologist*. Chapman and Holl, London.
- 10 - Sontgerath, J. A. H. and Kooji, N. D. A. (1996). "The effect of microstructure on flow behavior of braze clad material." *Mat. Sci. Forum*, Vol. 217-222, PP. 1721-1726.
- 11 - Smith, W. F. (1987). *Structure and Properties of Engineering Materials*. McGraw-Hill, Second edition, PP. 218-221.
- 12 - Yoon, J. S. and Lee, S. H. (2001). "Fabrication and brazeability of a three-layer 4343/3003/4343 aluminum clad sheet by rolling." *J. Mat. Process. Tech.*, Vol. 111, PP. 85-89.
- 13 - Ryu, J. S., Kim, M. S. and Jung, D. (2002). "Brazeability of cold rolled three layer Al-7.5S:/Al-1.2Mn-2Zn-(0.04-1.0)Si/Al-7.5Si (Wt. %) clad sheets." *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 130-131, PP. 240-244.

- 14 - Gao, F. and Zhao, H. (2002). "Solid state Si diffusion and joint formation involving aluminum brazing sheet." *Mat. Sci. Eng.*, A337, PP. 228-235.
- 15 - Nylen, M., Gustavsson, U. and Hutchinson, B. (2000). "The mechanism of braze metal penetration by migration of liquid films in aluminum." *Mat. Sci. Forum*, Vol. 331-337, PP. 1737-1742.

### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1- Brazing Sheets  
5 - Clad  
9 - Lap Joint

2 - Aluminium Brazing  
6 - Core  
10 - Sagging

3 - Fluxless  
7 - Liquidus

4 - Shear Test  
8 - Solidus

Archive of SID