



تأثیر جریان الکتریکی AC با شدت جریان ثابت بر رفتار پیرسازی دوفلزی Al/Cu

اعظم باجقلى، مهدى میرزایی، محمدرضا جهانگیری*

گروه پژوهشی متالورژی، پژوهشگاه نیرو، تهران، تهران، ایران

چکیده دوفلزی‌های آلومینیوم-مس، کاربرد فراوانی در خطوط انتقال و توزیع نیرو و دیگر ادوات الکتریکی و الکترونیکی یافته‌اند. در حین کار و در اثر عبور جریان الکتریکی، این دوفلزی‌ها گرم شده و افزایش دما، منجر به تغییرات ریزساختاری و خواص در فصل مشترک آنها می‌شود. هدف از انجام این پژوهش، بررسی رفتار پیرسازی دوفلزی مس-آلومینیوم ساخته شده به روش جوش اصطکاکی، تحت تأثیر متغیرهای جریان و زمان بود. پیرسازی دوفلزی‌ها، تحت جریان الکتریکی ۲۵۰ A و ۵۰۰ A، سبب گرم شدن قطعات، به ترتیب، تا دمای اولیه ۱۵۰ °C و ۲۵۰ °C شد. نتایج نشان داد که افزایش جریان الکتریکی از ۲۵۰ A تا ۵۰۰ A، منجر به افزایش نرخ رشد فازهای بین فلزی و افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. همچنین، فازهای پایدار محتمل در فصل مشترک، CuAl، CuAl₂، Cu₃Al₂ و Cu₄Al₃ هستند.

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۳۹۸/۰۴/۱۲

دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۰۸/۰۴

پذیرش قطعی: ۱۳۹۹/۱۰/۰۳

کلیدواژه‌ها:

اتصال دوفلزی،

جوش اصطکاکی،

پیرسازی آلومینیوم-مس،

پیرسازی الکتریکی،

فازهای بین فلزی

<https://doi.org/10.30501/jamt.2020.183656.1021>

URL: http://www.jamt.ir/article_120883.html

JAMT: Vol. 9, No. 3, (Autumn 2020), 11-18

Influence of the AC Electrical Constant Current on the Aging Behavior of Al/Cu Bimetal

Azam Bajgholi, Mahdi Mirzaei, Mohammad Reza Jahangiri*

Metallurgy Research Group, Niroo Research Institute, Tehran, Tehran, Iran

Paper History:

Received: 2019-07-03

Revised in revised form: 2020-10-25

Accepted: 2020-12-23

Keywords:

Bimetal Clamp,
Friction Welding,
Aluminum-Copper Aging,
Electrical Aging,
Intermetallic Phases

Abstract

Al/Cu bimetals have many applications in power lines. During operation and due to the crossing electrical current, bimetals are heated and the temperature increases, resulting in microstructural changes and properties alternation in the interface areas. The aim of this article is to study aging treatment of friction welded Cu/Al bimetallic joint, in the presence of electrical current. Aging of bimetals was carried out under electric currents of 250 A and 500 A, which caused the components to warm up to initial temperatures of 150 °C and 250 °C, respectively. The results show that electrical current increase from 250 A to 500 A leads to increase intermetallic grows rate and increase electrical resistance. Also, the possible stable phases at the interface are CuAl₂, CuAl, Cu₄Al₃, and Cu₃Al₂.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2020.183656.1021>

URL: http://www.jamt.ir/article_120883.html

*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، تهران، تهران، پژوهشگاه نیرو، گروه پژوهشی متالورژی، تلفن: ۰۲۱-۸۸۳۶۳۳۶۸، دورنگار: -

پیام نگار: mjahangiri@nri.ac.ir

Please cite this article as: Bajgholi, A., Mirzaei, M., Jahangiri, M. R., "Influence of the AC electrical constant current on the aging behavior of Al/Cu bimetal", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 9, No. 3, (2020), 11-18. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2020.183656.1021>).



۱- مقدمه

[۱۳-۷]. در عمده تحقیقات موجود در این زمینه، به بررسی تأثیر متغیر دما، پرداخته شده است. تحقیقات لو^۲ و همکارانش، نشان داد که نرخ رشد فازهای بین‌فلزی، به دما، بسیار حساس است و در دماهای پایین‌تر از ۱۵۰ °C، نرخ رشد فازهای بین‌فلزی، بسیار آهسته است و ضخامت این فازها، پس از گذشت ۲۰۰۰ ساعت، حداکثر به حدود ۱ μm می‌رسد که فازهای غالب، Al_2Cu و $AlCu$ هستند [۱۴]. تان^۳ و همکارانش نیز، نشان دادند که در فصل مشترک مس-آلومینیوم، علاوه بر فازهای $CuAl$ ، $CuAl_2$ ، Cu_4Al_3 ، Cu_3Al_2 و Cu_9Al_4 که تقریباً در همه تحقیقات انجام شده، ذکر شده است، فاز Cu_3Al نیز، در دماهای کمتر از ۲۰۰ °C، تشکیل می‌شود [۱۵].

همان‌گونه که ذکر شد، عمده تحقیقات انجام شده در پیرسازی دوفلزی مس-آلومینیوم، به روش گرم کردن در کوره انجام شده است و تنها عده کمی از محققین، از جریان الکتریکی برای پیرسازی استفاده کرده‌اند. برونویک^۴ و همکارانش، از جمله محققینی هستند که از این روش، استفاده کرده‌اند و نشان دادند که در تمامی محدوده‌های دمایی، لایه نفوذی، شامل ۵ لایه اصلی است که ضخامت آنها، با زمان، رابطه سهموی دارد. همچنین، نتایج تحقیقات آنها نشان داد که حضور جریان الکتریکی، در سطح اتصال، فرایندهای ساختاری پیچیده‌ای ایجاد می‌کند که مدل و سینتیک جوانه‌زنی و رشد فازهای بین‌فلزی را به صورت چشمگیری، تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۷ و ۱۸]. در آزمایش‌های انجام شده به وسیله این محققین نیز، همانند آزمایش‌های انجام شده در کوره، دما در حین پیرسازی، ثابت نگهداشته شده است. اگرچه از دیدگاه نظری، فرایند پیرسازی با این شرایط آزمایش، به لحاظ ترمودینامیکی و سینتیکی، رشد لایه‌های بین‌فلزی را هموار می‌کند، اما از شرایط عملی و واقعی کارکرد قطعات در حین کار، دور است. در عمل، این قطعات، همیشه تحت جریان الکتریکی ثابت (و نه دمای ثابت) کار می‌کنند و چه بسا، ممکن است که با تشکیل و رشد فازهای بین‌فلزی در فصل مشترک آنها، دمای کارکرد آنها نیز، تغییر نماید.

امروزه، فلزات مس و آلومینیوم، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف، به خصوص در صنعت برق، یافته‌اند. در راستای افزایش بازده و عمر مفید قطعات، پیچیده‌تر شدن طراحی‌ها، منجر به کاربرد چشمگیر دوفلزی مس-آلومینیوم شده است. کاربردهای این دوفلزی‌ها، بیشتر در مواردی است که نیاز به برقراری اتصال الکتریکی بین مس و آلومینیوم باشد. در فرایند اتصال آلومینیوم و مس در دمای بالای ۱۲۰ °C، تمایل بسیار زیادی به تشکیل ترکیبات بین‌فلزی ترد، با استحکام پایین و مقاومت الکتریکی بالا (به دلیل پیوند کووالانسی غیرفلزی) در فصل مشترک، وجود دارد. به همین دلیل، روش‌های معمول جوشکاری ذوبی، برای اتصال این دو، مناسب نیست و از روش‌های جوشکاری در حالت جامد، مانند جوش اصطکاکی، انفجاری، جوش فلش، نفوذی و جوش با نورد سرد استفاده می‌شود [۶-۱]. در بسیاری از تحقیقات، به منظور بررسی فازهای بین‌فلزی تشکیل شده در شرایط پیرسازی تسریع شده، از گرم کردن قطعات دوفلزی در کوره استفاده شده است. در این روش، قطعات، در کوره، طی فرایند بازپخت هم‌دما، در دما و زمان‌های مختلف قرار گرفته و سپس، فصل مشترک آن‌ها، بررسی می‌شود. مطالعات انجام شده توسط برخی محققین، نشان داده است که طی واکنش مس و آلومینیوم، نخستین ترکیبات بین‌فلزی تشکیل شده، فاز Al_2Cu غنی از آلومینیوم، در سمت آلومینیوم و فاز Al_4Cu_9 غنی از مس، در سمت مس هستند [۲ و ۵]. در تحقیق کورنا^۱ و همکاران [۴]، درباره دو فلزی Al/Cu ، مشخص شد که محدوده دمایی تشکیل این ترکیبات، ۲۰۰ °C است و حتی پس از گذشت ۱۰۰۰ ساعت در پایین‌تر از این دما نیز، فازهای شکننده، تشکیل نمی‌شوند. در تحقیق دیگری که توسط عباسی و همکاران [۱] انجام شد، اتصال Al/Cu تولید شده به روش نورد سرد در دمای ۲۵۰ °C، مورد آزمایش قرار گرفت و در فصل مشترک، فازهای بین‌فلزی Cu_3Al ، Cu_9Al_4 ، $CuAl_2$ و یک محلول جامد، مشاهده شد. در خصوص فازهای تشکیل شده در اثر پیرسازی به روش بازپخت، تحقیقات زیادی انجام شده و انواع فازهای بین‌فلزی تشکیل شده، گزارش شده است

^۲ Lu^۳ Tan^۴ Braunovic^۱ Koberna

و خمیر الماس، عملیات پولیش نهایی سطح نمونه، انجام شد. در ادامه، فصل مشترک نمونه‌ها، با میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی FE-SEM مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، جهت تعیین ترکیب شیمیایی و نوع فازهای تشکیل شده در فصل مشترک، از آنالیزگر EDX نصب شده روی SEM، استفاده شد. نمونه‌های آزمایش، قبل و بعد از فرایند پیرسازی، تحت آزمایش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی قرار گرفتند.

۳- نتایج و بحث

نتایج اندازه‌گیری تغییرات مقاومت، در جدول ۱، ارائه شده است.

جدول ۱. تغییرات مقاومت الکتریکی نمونه‌ها بر حسب میکرو اهم

زمان (h)					جریان الکتریکی (A)
۵۰۰	۲۵۰	۱۰۰	۲۵	۱	
۲/۵	۲	۱/۸	۱/۷	۰/۴	۲۵۰
۳/۴	۲/۹	۱/۲	۱/۴	۰/۴	۵۰۰

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در تمامی نمونه‌های A ۲۵۰، با افزایش زمان پیرسازی، مقاومت الکتریکی افزایش یافته است. همچنین، در نمونه‌های A ۵۰۰، افزایش زمان پیرسازی نمونه‌ها، سبب افزایش مقاومت الکتریکی شده است. نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی با زمان پیرسازی، در شکل ۱ ارائه شده است. با عبور جریان الکتریکی از اتصال، دمای فصل مشترک، بالا رفته و ترکیبات بین فلزی، شروع به جوانه زنی و رشد می‌کنند. با افزایش زمان پیرسازی، بر ضخامت این لایه‌های بین‌فلزی، افزوده می‌شود و با توجه به آنکه این ترکیبات بین‌فلزی، مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به آلومینیوم و مس دارند، این امر، سبب افزایش مقاومت الکتریکی می‌گردد. براساس نتایج تحقیقات منتشر شده، رابطه‌ی ضخامت لایه بین‌فلزی با زمان، در دمای ثابت پیرسازی، به صورت سهموی است و رابطه مقاومت الکتریکی و ضخامت لایه بین‌فلزی، خطی است [۱۷-۱]. در نتیجه، رابطه تغییرات مقاومت الکتریکی با جذر زمان، در شرایط پیرسازی هم‌دما، به صورت خطی است. در آزمایش‌های انجام شده در تحقیق حاضر، همان‌گونه که پیشتر ذکر شد، جریان گذرنده از

هدف از تحقیق حاضر، بررسی تأثیر متغیرهای دما (ایجاد شده از طریق اعمال جریان AC با شدت جریان ثابت) و زمان، بر پیرسازی دوفلزی مس-آلومینیوم تولید شده به روش جوش اصطکاکی چرخشی و بررسی اثر این پیرسازی، بر خواص الکتریکی و ریزساختاری فصل مشترک دوفلزی‌ها است. تا آنجایی که نویسندگان مقاله حاضر می‌دانند، تاکنون نتایج چنین طراحی آزمایشی، در هیچ مرجع منتشر شده‌ای، گزارش نشده است.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق، برای انجام آزمایش‌ها، از نمونه‌های اولیه تولید شده به روش جوش اصطکاکی به طول ۱۰ cm و قطر ۱۴ mm، استفاده شد. فشار اصطکاکی، جهت اتصال نمونه‌ها، ۵۰ MPa، زمان اصطکاکی، ۱ s و فشار ثانویه، ۱۲۰ MPa بود و از دستگاهی با سرعت چرخش ۱۵۰۰ rpm استفاده شد. آلومینیوم مورد استفاده، از آلیاژ AA۱۰۵۰ و مس، از نوع خالص رایج بود. هم‌اکنون، قطعات تولید شده به این صورت، به وفور در خطوط توزیع نیروی برق کشور، به کار می‌روند. جهت گرم کردن قطعات، از دو جریان AC، به بزرگی A ۲۵۰ و A ۵۰۰ و با ولتاژ ۵ V استفاده شد که سبب گرم شدن اولیه قطعات، به ترتیب تا محدوده دمایی ۱۵۰ °C و ۲۵۰ °C می‌شود. زمان نگهداری قطعات تحت این جریان‌ها نیز از ۱ ساعت تا ۵۰۰ ساعت در نظر گرفته شد.

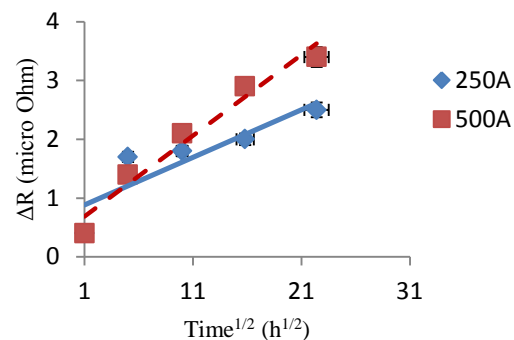
برای بررسی مقاومت الکتریکی، از میکرواهم‌متر METREL مدل MI3252، با جریان A ۵۰ و با دقت $0.1 \mu\Omega$ استفاده شد. اندازه‌گیری مقاومت نمونه‌ها، در طول ۳۰ mm از هر نمونه که فصل مشترک در وسط آن قرار داشت، انجام شد. جهت اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، از جریان الکتریکی A ۵۰ و مدت زمان اعمالی ۱۰ s، استفاده شد. در این نتایج، از سه اندازه‌گیری متوالی، استفاده و سپس، متوسط مقدار اندازه‌گیری شده، ثبت شد.

برای بررسی فصل مشترک نمونه‌ها، ابتدا نمونه‌های برش زده از مقطع عرضی، مانده شدند؛ سپس، به ترتیب، با سنباده‌های ۸۰، ۲۴۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و در نهایت ۲۰۰۰، آماده‌سازی اولیه انجام شد و در آخر، با استفاده از پودر آلومینا

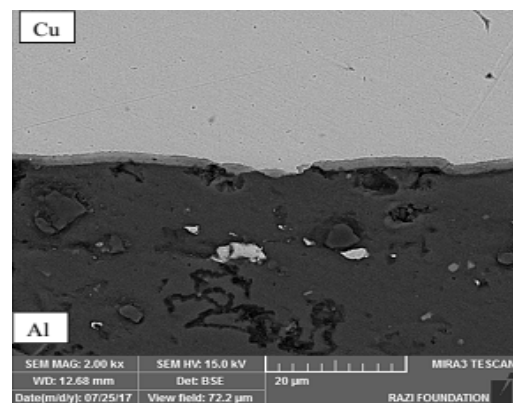
این نمونه، در مقایسه با نمونه‌های پیرشده در زمان‌های کمتر، دارای فصل مشترکی با لایه‌های بین‌فلزی ضخیم‌تر و پیوسته‌تر است. به عبارت دیگر، گذشت زمان، علاوه بر افزایش ضخامت، موجب اتصال جوانه‌های ایجاد شده در فصل مشترک نیز شده است. به نظر می‌رسد که در ابتدا، جوانه‌هایی در نقاط مختلف فصل مشترک ایجاد می‌شود. با گذشت زمان، این جوانه‌ها به هم متصل شده و یک لایه پیوسته ایجاد می‌شود. طبق نتایج بررسی‌های متالوگرافی، پس از گذشت مدت زمان معین (برحسب دمای پیرسازی)، چهار لایه بین‌فلزی در فصل مشترک ایجاد شده و پس از آن، تعداد لایه‌ها، تغییر نکرده و تنها ضخامت آنها تغییر می‌کند (شکل ۴). برخی لایه‌ها، فصل مشترک مبهمی با لایه جانبی داشته و در برخی مواقع، تشخیص مرز بین آنها مشکل است. در شکل ۵، نتایج بررسی با میکروسکوپ الکترونی نمونه شکل ۴، ارائه شده است. همچنین در شکل ۶، نتایج آنالیز شیمیایی فازهای مختلف تشکیل شده در فصل مشترک این نمونه، آمده است. در فصل مشترک این نمونه، لایه‌ها از سمت آلومینیوم، به ترتیب فازهای $CuAl_2$ ، $CuAl$ ، Cu_4Al_3 ، Cu_3Al_2 و محلول جامد مس است (جدول ۲). فازهای تشکیل شده در حین فرایند پیرسازی، وابستگی به متغیرهای دما و زمان پیرسازی نمونه دارد و با توجه به شرایط نمونه و مقدار انرژی اعمال شده بر آن، فازهای مختلفی تشکیل می‌شود. برخی از فازها، پایداری کمی دارند و در نتیجه، تشکیل آنها، به صورت موقتی است و با گذشت زمان، به فازهای دیگر تبدیل می‌شوند. تشکیل برخی فازهای دیگر نیز، به انرژی بالاتری نیاز دارد که به علت تأمین نشدن آن در برخی شرایط آزمایش، تشکیل نمی‌شود. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که صرف نظر از مقدار جریان اعمالی به نمونه‌ها (۲۵۰ A یا ۵۰۰ A)، پس از پدیدار شدن نمونه‌ها و تشکیل فازهای نهایی، ۴ نوع فاز بین‌فلزی، در فصل مشترک، تشکیل می‌شود که از سمت Al، به طرف Cu، به ترتیب، شامل فازهای $CuAl_2$ ، $CuAl$ ، Cu_4Al_3 ، Cu_3Al_2 هستند و فاز Cu_9Al_4 که در بسیاری از مراجع [۱۰-۱]، از آن به عنوان فازی پایدار در مجاور مس نام برده می‌شود، در نمونه‌های آزمایش شده در این تحقیق، مشاهده نشد.

قطعات، ثابت در نظر گرفته شد؛ بنابراین، احتمال دارد که دمای قطعات، به خصوص در ناحیه فصل مشترک، در حین آزمایش، ثابت باقی نماند. بنابراین نمی‌توان رابطه دقیق تغییرات مقاومت و زمان را پیش‌بینی نمود. با این حال، تنها جهت مقایسه، رابطه تغییرات مقاومت الکتریکی با جذر زمان، به صورت خطی در نظر گرفته شد (شکل ۱). طبق نتایج حاصل از آزمایش‌ها، تا زمان پیرسازی در حدود ۱۰۰-۵۰ ساعت، مقاومت الکتریکی نمونه‌های پیرسازی شده تحت جریان‌های ۲۵۰ A و ۵۰۰ A، تفاوت معناداری با هم ندارد، اما با گذشت زمان‌های بیشتر پیرسازی، مقاومت الکتریکی نمونه‌های ۵۰۰ A، تا حد زیادی بالاتر از نمونه‌های ۲۵۰ A می‌گردد.

نمونه‌های با جریان ۵۰۰ A و زمان پیرسازی ۲۵ ساعت، دارای پیوند بین‌فلزی، با ضخامت تقریبی $2/9 \mu m$ ، در فصل مشترک خود هستند (شکل ۲). فازهای تشکیل شده، به صورت منقطع و غیر پیوسته است، اما با گذشت زمان و افزایش زمان پیرسازی، پیوستگی بین فازها، ایجاد می‌شود (شکل ۳).

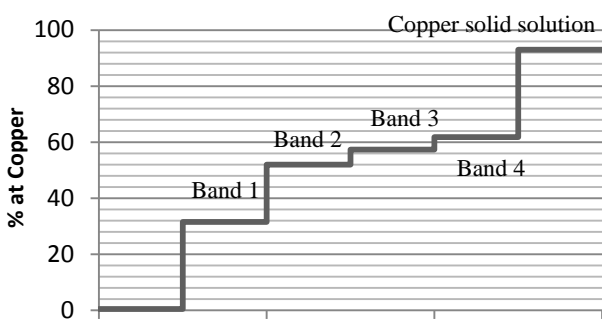


شکل ۱. نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی با زمان پیرسازی در ۲۵۰°C و ۵۰۰ A



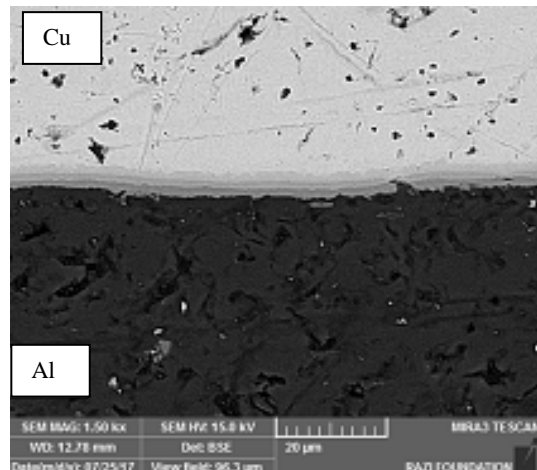
شکل ۲. ریزساختار فصل مشترک نمونه پیرسازی شده تحت جریان الکتریکی ۵۰۰ A و زمان ۲۵ ساعت زیر میکروسکوپ نوری

تاکنون، در تمامی پژوهش‌های منتشر شده [۱۰-۱]، دمای آزمون، در طول پیرسازی، ثابت بوده است، اما در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، شدت جریان اعمالی که سبب گرم شدن قطعه می‌شود، ثابت نگه‌داشته شد که برای نزدیک شدن شرایط آزمایش، به عملکرد واقعی قطعات در حین کارکرد است. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از جریان الکتریکی، باعث افزایش سرعت رشد لایه‌های بین‌فلزی، در مقایسه با استفاده از کوره می‌شود، حتی اگر دمای بازپخت، در حین پیرسازی، در هر دو شرایط، یکسان باشد [۱۶ و ۱۷]. تاکنون، اطلاعاتی در خصوص نحوه رشد فازهای بین‌فلزی، در حین گرم شدن با جریان الکتریکی تحت شدت جریان ثابت (بدون کنترل دما)، گزارش نشده است. اما به عقیده پژوهشگران این تحقیق، استفاده از جریان الکتریکی با شدت جریان ثابت، می‌تواند منجر به افزایش دمای موضعی فصل مشترک دو فلزی در حین آزمون و به هنگام تشکیل و رشد لایه‌های بین‌فلزی گردد و لذا به صورت غیرمستقیم، منجر به تسریع فرایند پیرسازی دوفلزی شود. البته به نظر می‌رسد که این تسریع فرایند رشد لایه‌های بین‌فلزی، بایستی در شرایطی بیشتر نمایان گردد که لایه‌های بین‌فلزی تشکیل شده در فصل مشترک، به صورت یکنواخت و پیوسته، ایجاد شده باشد و هر چه مقاومت الکتریکی این لایه‌ها بیشتر گردد، متناسب با رابطه RI^2 ، دمای فصل مشترک، افزایش یافته و متعاقباً، سرعت رشد لایه‌ها، فزونی می‌یابد.

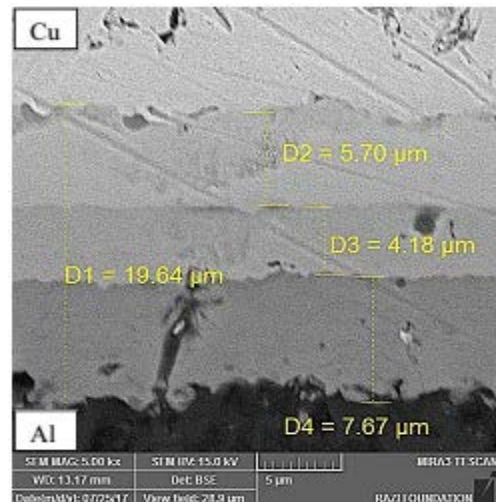


شکل ۶. آنالیز شیمیایی فازهای مختلف تشکیل شده در فصل مشترک نمونه ۵۰۰ A با زمان پیرسازی ۲۵۰ ساعت

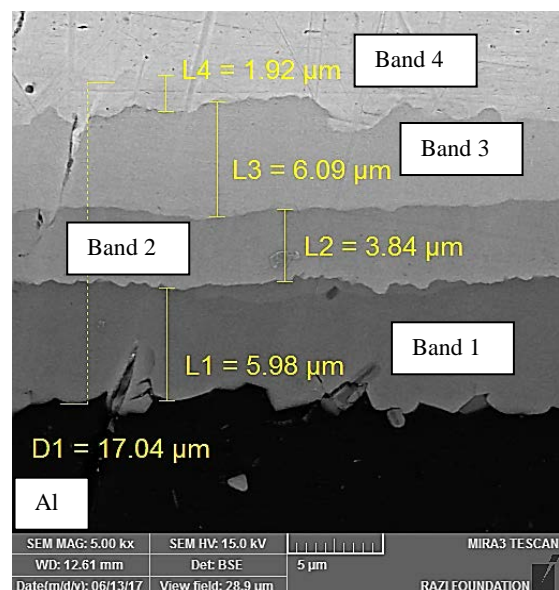
در بسیاری از پژوهش‌ها که در دمای ثابت انجام شده اند، رابطه تغییرات ضخامت فازهای بین‌فلزی، با زمان، مورد بررسی قرار گرفته است [۱۸ و ۱۹].



شکل ۳. ریزساختار فصل مشترک نمونه پیرسازی شده با جریان الکتریکی ۵۰۰ A، زمان ۱۰۰ ساعت زیر میکروسکوپ نوری

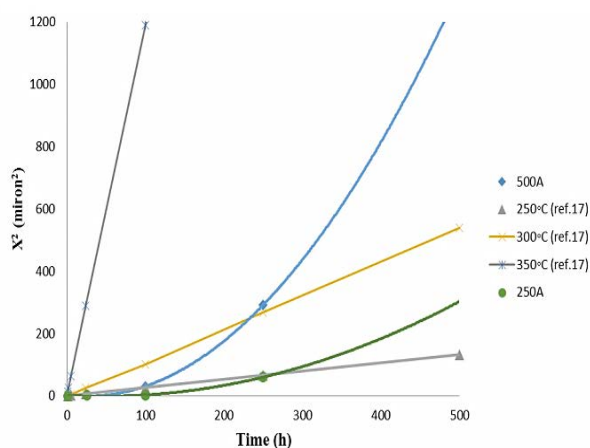


شکل ۴. فصل مشترک نمونه با جریان ۵۰۰ A و زمان پیرسازی ۲۵۰ ساعت



شکل ۵. فصل مشترک نمونه با جریان ۵۰۰ A با زمان پیرسازی ۲۵۰ ساعت

[۱۷]. شکل ۸، نمودار تغییرات X^2 بر حسب زمان را که در حین پیرسازی دوفلزی مس-آلومینیوم، به کمک جریان الکتریکی در دمای ثابت 250°C ، 300°C و 350°C بدست آمده است، نشان می‌دهد (منحنی های \blacktriangle ، \times و \ast). این منحنی‌ها، براساس نتایج مرجع [۱۷] رسم شده‌اند، جهت مقایسه، نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر، مربوط به پیرسازی نمونه‌های دوفلزی تحت جریان الکتریکی 500 A (دمای اولیه نمونه‌ها معادل 250°C) و 250 A (دمای اولیه نمونه‌ها معادل 150°C) نیز رسم شده‌است.



شکل ۷. مقایسه نتایج حاصل از پیرسازی نمونه‌های دوفلزی به کمک جریان الکتریکی در دماهای ثابت [۱۷] با پیرسازی تحت جریان ثابت (دمای متغیر)

همان‌گونه که از شکل ۷ می‌توان درک کرد اگر چه در مورد آزمایش‌های پیرسازی تحت دمای ثابت، رابطه C بر حسب t ، به صورت خط مستقیم بدست می‌آید، اما در مورد نتایج حاصل از تحقیق حاضر که مطابق با شرایط واقعی عملکرد قطعات دوفلزی در صنایع برق و عبورجریان ثابت از قطعات است، رابطه X^2 بر حسب t ، به صورت خط مستقیم بدست نمی‌آید. این شرایط، به دلیل ثابت نبودن دمای فصل مشترک دوفلزی، در حین پیرسازی است. تفاوت نتایج حاصل از پیرسازی در شکل ۷ در زمان‌های اولیه پیرسازی نمونه‌ها، مربوط به نمونه‌های پیرشده در دمای ثابت 250°C و نتایج تحقیق حاضر پیرسازی تحت جریان الکتریکی 500 A (دمای اولیه نمونه‌ها معادل 250°C) و 250 A (دمای اولیه نمونه‌ها معادل 150°C)، اندک و قابل صرف نظر کردن است، در حالی که پس از گذشت زمان‌هایی در حدود 100 ساعت، این

جدول ۲. ترکیب شیمیایی فازهای مختلف تشکیل شده در نمونه پیرسازی شده تحت جریان الکتریکی 500 A و زمان پیرسازی 250 ساعت

محدوده	درصد اتمی مس	درصد اتمی آلومینیوم	نزدیک‌ترین ترکیب بین فلزی
آلومینیوم	۰/۶۴	۹۹/۳۶	Al
لایه اول	۳۰/۹۶	۶۹/۰۴	$\text{CuAl}_2 (\theta)$
لایه دوم	۵۱/۱۴	۴۸/۸۶	$\text{CuAl} (\eta_2)$
لایه سوم	۵۷/۳۴	۴۲/۶۶	$\text{Cu}_4\text{Al}_3 (\zeta_2)$
لایه چهارم	۶۱/۸۱	۳۸/۱۹	$\text{Cu}_3\text{Al}_2 (\delta)$
مس	۹۲/۵۷	۷/۴۳	محلول جامد Cu

به طور کلی، رابطه ضخامت لایه بین-فلزی با زمان پیرسازی در یک دمای ثابت، با معادله زیر تعریف می‌شود:

$$X = kt^n \quad (1)$$

در این رابطه، X ، ضخامت، t ، زمان و k ، ثابت نرخ رشد است. اگر نرخ رشد، با نرخ واکنش شیمیایی در فصل مشترک محدود شود، مقدار n ، برابر یا بزرگتر از ۱ می‌شود، اما اگر نرخ رشد، با نفوذ حجمی عناصر در فصل مشترک کنترل شود، مقدار n ، برابر یا بزرگتر از $0/5$ می‌شود. علاوه بر این، در مواردی که نفوذ به صورت مرزانه‌ای است، مقدار n ، کمتر از $0/5$ خواهد شد. در صورتی که از طرفین معادله (۱) لگاریتم گرفته شود، معادله به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\ln(X) = n \cdot \ln(t) + \ln(k) \quad (2)$$

با توجه به رابطه‌ی (۲)، می‌توان به محاسبه مقدار n ، برای حالت‌های مختلف آزمایش پرداخت. نتایج بسیاری از تحقیقات نشان داده است که در گرم کردن کوره‌ای یا گرم کردن از طریق جریان‌های الکتریکی، به شرط ثابت ماندن دما در حین آزمایش، مقدار پارامتر n در حین پیرسازی دوفلزی‌های مس-آلومینیوم، در حدود $0/5$ بدست می‌آید [۱، ۳، ۱۱، ۱۶ و

پیوستگی کامل در لایه‌های بین‌فلزی در فصل مشترک نمونه-های A ۵۰۰ صورت می‌گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

الف- با عبور جریان الکتریکی از اتصال، دمای فصل مشترک، بالا می‌رود و ترکیبات بین‌فلزی، شروع به جوانه‌زنی و رشد می‌کنند. با افزایش زمان پیرسازی، بر پیوستگی و ضخامت این لایه‌های بین‌فلزی، افزوده می‌شود. با توجه به آن‌که این ترکیبات بین‌فلزی، مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به آلومینیوم و مس دارند، این امر، سبب افزایش مقاومت الکتریکی و دمای موضعی فصل مشترک می‌گردد. در صورتی- که جریان الکتریکی گذرنده از دوفلزی، ثابت باشد، دمای موضعی، به‌طور مرتب، افزایش می‌یابد و نرخ نفوذ و رشد فازهای بین‌فلزی، تشدید می‌گردد.

ب- در تمامی نمونه‌های A ۲۵۰، با افزایش زمان پیرسازی، مقاومت الکتریکی، افزایش می‌یابد. در نمونه‌های A ۵۰۰ نیز، افزایش زمان پیرسازی نمونه‌ها، سبب افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود که نشان دهنده تغییرات در فصل مشترک اتصال است.

ج- پس از گذشت مدت زمان معین، چهار لایه بین‌فلزی، در فصل مشترک، ایجاد می‌شود و پس از آن، تعداد لایه‌ها، تغییر نکرده و تنها ضخامت آنها، تغییر می‌کند. مدت زمان لازم برای رسیدن به شرایط پایدار، به جریان پیرسازی بستگی دارد. در فصل مشترک نمونه‌ای که به حالت پایداری می‌رسد، لایه‌ها از سمت آلومینیوم، به ترتیب، حاوی فازهای $CuAl$ ، Cu_4Al_3 ، Cu_3Al_2 و محلول جامد مس است.

د- پس از ۲۵ ساعت پیرسازی، فازهای بین‌فلزی در فصل مشترک نمونه‌های پیرسازی شده تحت جریان الکتریکی A ۵۰۰، به‌صورت منقطع تشکیل می‌شوند و پس از ۱۰۰ ساعت پیرسازی، این فازها پیوسته می‌شوند. با پیوسته شدن فازهای بین‌فلزی، دمای فصل مشترک، نسبت به دمای اولیه نمونه (C ۲۵۰)، افزایش می‌یابد و این، باعث افزایش قابل ملاحظه سرعت رشد فازهای بین‌فلزی، نسبت به نمونه‌های پیرشده در دمای ثابت C ۲۵۰ می‌گردد (۲۳ برابر در زمان پیرسازی ۵۰۰ ساعت).

تفاوت بیشتر شده و با گذشت زمان، بر میزان این تفاوت افزوده می‌شود. به نظر می‌رسد در زمان‌های اولیه پیرسازی که هنوز فازهای بین‌فلزی، دارای ضخامت کمی بوده و به-خصوص، پیوستگی کاملی در فصل مشترک ایجاد نکرده‌اند (شکل ۲)، دمای فصل مشترک، تغییر چندانی نسبت به شرایط اولیه نکرده باشد. لیکن، پس از پیوسته شدن فازهای بین‌فلزی در فصل مشترک (شکل ۳)، با توجه به مقاومت الکتریکی بالای این فازها و ثابت ماندن جریان الکتریکی، متناسب با رابطه RI^2 ، دمای فصل مشترک نسبت به شرایط اولیه (یعنی C ۱۵۰ و C ۲۵۰) افزایش می‌یابد. از آنجا که افزایش دما، خود باعث تسریع فرایند نفوذ و رشد لایه‌های بین‌فلزی می‌گردد، با گذشت زمان، انحراف منحنی نتایج مربوط به پیرسازی در دمای ثابت، از منحنی نتایج مربوط به پیرسازی در جریان ثابت، بیشتر می‌شود.

پس از گذشت ۲۵ ساعت از پیرسازی در نمونه‌های پیرسازی شده تحت جریان الکتریکی A ۵۰۰ و A ۲۵۰، فازهای بین‌فلزی، به‌صورت منقطع، در فصل مشترک نمونه، تشکیل می‌شوند؛ در حالی‌که پس از گذشت ۱۰۰ ساعت از زمان پیرسازی، فازهای بین‌فلزی، به‌صورت یکنواخت و پیوسته، در فصل مشترک، تشکیل می‌شوند. با مقایسه این نتایج و شکل‌های ۲ و ۳، می‌توان مشاهده کرد که تفاوت اصلی در نتایج حاصل از پیرسازی نمونه‌ها در جریان ثابت یا دمای ثابت، در حوالی ۱۰۰ ساعت، به‌وقوع می‌پیوندد. وقتی فازهای بین‌فلزی، لایه پیوسته‌ای را در فصل مشترک تشکیل می‌دهند، تشکیل فازهای پیوسته با مقاومت الکتریکی بالا، منجر به افزایش موضعی دمای فصل مشترک می‌شود. مسئله دیگر، تفاوت معنادار ضخامت فازها در حالت A ۲۵۰ و A ۵۰۰ است که پس از گذشت زمان ۲۵۰ ساعت، دارای تفاوتی در حدود ۳ برابر می‌شود.

در شکل‌های ۱ و ۷، رابطه معنادار و خوبی بین تغییرات ریزساختاری در فصل مشترک نمونه‌های پیرسازی شده تحت جریان‌های الکتریکی ثابت و تغییرات مقاومت الکتریکی آنها، نمایان است. این شکل‌ها، نشان می‌دهد که بعد از حدود ۵۰ تا ۱۰۰ ساعت، تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین نمونه‌های A ۲۵۰ و A ۵۰۰ به وقوع می‌پیوندد و این، همان زمانی است که

۵- سپاسگزاری

از تمامی پرسنل آزمایشگاه براق آلات پژوهشگاه نیرو،

که ما را در انجام آزمایشها یاری کردند، تشکر می نمائیم.

مراجع

- Innovations*, Vol. 2, No. 3, 150-163. <https://doi.org/10.1007/s100190050078>
- Abdollah-Zadeh, A., Saeid, T., Szagari, B., "Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints", *Journal of alloys and Compounds*, Vol. 460, No. 1-2, (2008), 535-538. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.06.009>
 - Chih-Yuan, C. H. E. N., Weng-Sing, H., "Effect of annealing on the interfacial structure of aluminum-copper joints", *Materials Transactions*, Vol. 48, No. 7, (2007), 1938-1947. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MER2006371>
 - Xu, H., Liu, C., Silberschmidt, V., "Effect of thermal aging on interfacial behaviour of copper ball bonds", *Proceedings of 2nd Electronics System-Integration Technology Conference*, IEEE, (2008), 891-896. <https://doi.org/10.1109/ESTC.200804684470>
 - Ming, X., Zhang, Y., "Temperature effect on IMC growth behavior of thin film copper-aluminum system in electronic packaging", *Proceedings of 11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*, IEEE, (2010), 371-375. <https://doi.org/10.1109/ICEPT.2010.5582355>
 - Lu, Y. H., Wang, Y. W., Appelt, B. K., Lai, Y. S., Kao, C. R., "Growth of CuAl intermetallic compounds in Cu and Cu (Pd) wire bonding", *Proceedings of 2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, IEEE, (2011), 1481-1488. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2011.5898706>
 - Tan, Y. Y., Yong, F. K., "Cu-Al IMC micro structure study in Cu wire bonding with TEM", *Proceedings of 17th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits*, IEEE, (2010), 1-4. <https://doi.org/10.1109/IPFA.2010.5532226>
 - Braunovic, M., Aleksandrov, N., "Intermetallic compounds at aluminum-to-copper and copper-to-tin electrical interfaces", *Proceedings of the Thirty-Eighth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, (1992), 25-34. <https://doi.org/10.1109/HOLM.1992.246938>
 - Braunovic, M., Alexandrov, N., "Intermetallic compounds at aluminum-to-copper electrical interfaces: effect of temperature and electric current", *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, Vol. 17, No. 1, (1994), 78-85. <https://doi.org/10.1109/95.296372>
 - Kim, D. G., Jung, S. B., "Intermetallic compound formation and growth kinetics in flip chip joints using Sn-3.0 Ag-0.5 Cu solder and Ni-P under bump metallurgy", *Materials Transactions*, Vol. 46, No. 6, (2005), 1295-1300. <https://doi.org/10.2320/matertrans.46.1295>
 - Yoon, J. W., Kim, S. W., Jung, S. B., "Interfacial reaction and mechanical properties of eutectic Sn-0.7 Cu/Ni BGA solder joints during isothermal long-term aging", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 391, No. 1-2, 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.09.001>
 - Abbasi, M., Taheri, A. K., Salehi, M. T., "Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 319, No. 1-2, (2001), 233-241. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(01\)00872-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(01)00872-6)
 - Berski, S., Stradomski, Z., Dyja, H., "Quality of bimetal Al-Cu joint after explosive cladding", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 22, No. 1, (2007), 73-76. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.527.8310&rep=rep1&type=pdf>
 - Lee, W. B., Bang, K. S., Jung, S. B., "Effects of intermetallic compound on the electrical and mechanical properties of friction welded Cu/Al bimetallic joints during annealing", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 390, No. 1-2, (2005), 212-219. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.07.057>
 - Koberna, M., Fiala, J., "Intermetallic phases in cold-welded Al-Cu joints", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 159, No. 2, (1992), 231-236. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(92\)90293-A](https://doi.org/10.1016/0921-5093(92)90293-A)
 - Xue, P., Xiao, B. L., Ni, D. R., Ma, Z. Y., "Enhanced mechanical properties of friction stir welded dissimilar Al-Cu joint by intermetallic compounds", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 21-22, (2010), 5723-5727. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.05.061>
 - Cheng, X., Gao, Y., Fu, H., Xing, J., Bai, B., "Microstructural characterization and properties of Al/Cu/steel diffusion bonded joints", *Metals and Materials International*, Vol. 16, No. 4, (2010), 649-655. <https://doi.org/10.1007/s12598-009-0092-5>
 - Ouyang, J., Yarrapareddy, E., Kovacevic, R., "Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, No. 1, (2006), 110-122. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.013>
 - Liu, P., Shi, Q., Wang, W., Wang, X., Zhang, Z., "Microstructure and XRD analysis of FSW joints for copper T2/aluminium 5A06 dissimilar materials", *Materials letters*, Vol. 62, No. 25, (2008), 4106-4108. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.06.004>
 - Murr, L. E., Li, Y., Flores, R. D., Trillo, E. A., McClure, J. C., "Intercalation vortices and related microstructural features in the friction-stir welding of dissimilar metals", *Materials Research*