

بررسی اثر پارامترهای متالورژیکی بر جوشکاری انفجاری صفحات مس - آلومینیم

حسن همتی نوین
دانشجوی کارشناسی ارشد

امیر عبدالله زاده
استادیار

غلامحسین لیاقت
استاد

بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

جوشکاری انفجاری، روش به کارگیری مواد منفجره برای ایجاد اتصال متالورژیکی فلزات در فشار بالا همراه با حداقل ذوب فلزات مورد نظر است. هدف اصلی از اتصال فلزات همجنس و یا غیر همجنس با جوشکاری انفجاری، بهبود خواص مکانیکی نظیر سختی سطحی، مقاومت به ضربه، استحکام، قابلیت شکل پذیری، مقاومت به خوردگی و همچنین خواص حرارتی و الکتریکی است. هدف این مقاله، بررسی اتصال مس خالص به آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ با جوشکاری انفجاری و تأثیر سختی صفحه پرنده (آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱) بر استحکام پیوند است. به این منظور، ابتدا آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ قبل از جوشکاری برای حصول سختی‌های متفاوت، تحت عملیات حرارتی قرار گرفت. سپس استحکام اتصال ایجاد شده با جوشکاری انفجاری با آزمایش استحکام برشی و مورفولوژی فصل مشترک به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سختی صفحه پرنده، استحکام باند ایجاد شده، کاهش می‌یابد و فصل مشترک از حالت موجی به صاف تغییر می‌کند. نتایج حاصل از بررسی‌های میکروسکوپی (SEM) و آنالیز EDX نشان می‌دهند، تشکیل ترکیبات بین فلزی با سختی بالا که حاوی ترکهای زیادی هستند، با افزایش سختی صفحه پرنده، اجتناب ناپذیر است.

کلمات کلیدی

جوشکاری انفجاری - مس - آلومینیم ۶۰۶۱ - استحکام - ترکیبات بین فلزی - فصل مشترک

The Influence of Metallurgical Parameters on Explosive Welding of Copper-Aluminium (6061) Plates

A. Abdollah-zadeh
Assistant Professor

H. Hemati-Novin
Graduate Student

G. Liaghat
Professor
Department

Abstract

Explosive welding is used to create a metallurgical bond between two metal components with minimal amount of melting. This method allows joining of similar and/or dissimilar metals, in order to improve surface hardness, impact resistance, strength, formability, corrosion resistance or thermal and electrical properties. The aim of this research is to join pure Cu to Al alloy 6061 by

explosive welding. Attention is paid to the effect of the hardness of flyer plate (Al alloy 6061) on the strength and morphology of the bond. Before welding, different heat treatment cycles were employed to produce different values of hardness for Al alloy 6061. The shear strength of the bond was studied by lap shear testing. The morphology of the interface was investigated by scanning electron microscopy (SEM). The results indicate that the strength of the bond decreases by increasing the hardness of the flyer plate. This is accompanied with the changing of interface morphology from wavy to flat. The results of SEM and EDS analyses indicate the presence of intermetallic compounds with high hardness and high crack density, especially at increased values of the hardness of the flyer plate.

مقدمه

جوشکاری انفجاری نخستین بار در تمرین آتش توپخانه دیده بدین ترتیب شد که سر گلوله توپ، پس از برخورد به هدف فولادی به آن جوش می‌خورد و نیز در انفجار همزمان انبار مهمات که جوش خوردن قطعات مجاور هم ملاحظه شد [۱]. این فرآیند یک نوع جوشکاری در فاز جامد است که از انفجار مواد منفجره برای نزدیک کردن سطوح جوش به یکدیگر در سرعت بالا و به صورت تصادم مایل یا موازی استفاده می‌شود. این فرآیند باعث به وجود آمدن جریان شدید پلاستیک فلز در مرز مشترک دو سطح می‌شود. در حالی که این، روش سرد نام گرفته است و هیچ نوع حرارت خارجی برای ایجاد پیوند بین فلزات مصرف نمی‌گردد، لیکن دمای موضعی زیادی، معمولاً، در محل تماس جوش به دلیل اثرات دینامیکی به وجود می‌آید [۴-۱]. تحت فشار و حرارت، سطح مشترکی به وجود می‌آید که می‌تواند استحکامی معادل و یا حتی بیشتر از دو فلز اصلی داشته باشد. بعضی از پژوهشگران، تحقیقاتی را درباره ریز ساختار فصل مشترک اتصالات مختلف حاصل از جوشکاری انفجاری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) انجام داده‌اند [۷-۵]. در این میان، تشکیل ذوب موضعی در نقاطی از فصل مشترک، مورد اختلاف آنهاست. بعضی معتقدند که افزایش دما به طور موضعی در بعضی از نقاط مشترک، به دلیل اثرات دینامیکی، باعث تشکیل ذوب موضعی می‌شود و لیکن میزان قابل توجهی از این ذوب، توسط جت ایجاد شده بین سطوح دو فلز خارج می‌شود [۶]. گروهی بر این باور هستند که تشکیل لایه باریکی از مذاب در فصل مشترک، باعث افزایش استحکام پیوند می‌شود و از سوی دیگر گروهی معتقدند که ذوب موضعی، باعث کاهش استحکام برشی اتصال می‌شود؛ چرا که پس از انجماد مذاب به وجود آمده، ترکیبات بین فلزی با سختی بالا به وجود می‌آیند [۷-۵]. آنها تنها عامل ایجاد اتصال را پیوند متالورژیکی و درگیری مکانیکی موج های دو فلز می‌دانند. بنابراین بررسی مورفولوژی، کیفیت و مکانیزم اتصال از دیدگاه متالورژیکی برای محققین مختلف، از اهمیت زیادی برخوردار است.

در پژوهش حاضر، صفحاتی از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به عنوان صفحات پرنده با شرایط مختلف عملیات حرارتی، به صفحاتی از جنس مس خالص، با جوشکاری انفجاری متصل شدند. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، فصل مشترک اتصالات مورد بررسی قرار گرفت و ارتباط بین استحکام برشی اتصالات و ترکیبات بین فلزی موجود در فصل مشترک مشخص شد.

مواد و روش اجرای آزمایش

در این تحقیق، قطعاتی از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و مس خالص به ترتیب با ابعاد $130 \times 60 \times 8$ mm و $134 \times 64 \times 4$ mm استفاده شد. قبل از اجرای آزمایش ها، سطوح صفحات پرنده (Al) و ساکن (Cu)، ابتدا ماشین کاری و سپس با استفاده از سمباده شماره ۶۰۰، کاملاً صاف شدند. در ادامه از استن برای زدودن آلودگی‌ها استفاده شد. صفحات آلومینیومی، قبل از جوشکاری در دمای 530°C به مدت ۲ ساعت آنیل و طبق جدول (۱) در دمای 160°C پیر سخت شدند و سپس سختی آنها اندازه‌گیری شد. پس از آماده‌سازی اولیه صفحات مسی و آلومینیومی، آزمایش های اتصال صفحات به یکدیگر با انفجار انجام شد. برای این منظور از پودر TNT شدید الانفجار به میزان ۶۵ گرم برای هر آزمایش استفاده شد. چاشنی مورد استفاده در آزمایش ها از نوع الکتریکی شماره ۸ بود. اندازه فاصله توقف ۶ mm و ضخامت ضربه‌گیر لاستیکی ۲ mm در نظر گرفته شد. نوع چیدمان مورد استفاده در همه آزمایش های انفجار، موازی بود. پس از اتصال صفحات عملیات حرارتی شده آلومینیومی به

صفحات مسی با جوشکاری انفجاری، نمونه‌های تست برشی برای تعیین استحکام برشی تهیه شد شکل (۱). برای تعیین استحکام برشی اتصالات از دستگاه کشش مدل Instron 8500 Digital Servohydraulic Instruments استفاده شد. ظرفیت بار استاتیکی این دستگاه ۶۰۰ KN و ظرفیت بار دینامیکی آن ۵۰۰ KN است. برای تعیین سختی بعضی از مناطق در فصل مشترک مس و آلومینیم از دستگاه میکرو سختی سنج مدل Reichert-Jung-Duromat 4000E استفاده شد. قبل از اجرای بررسی‌های میکروسکوپی (SEM) نمونه‌های جوش خورده، مانع و سپس پولیش شدند تا کیفیت لازم را از نظر صافی سطح دارا شوند. برای بررسی خصوصیات فصل مشترک نمونه‌های مختلف، از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل TOPCON SR-50 همراه با آنالیزگر EDX استفاده شد.

نتایج و تحلیل

پس از انجام آنیل کامل صفحات آلومینیمی و پیر سخت کردن آنها در زمان‌های متفاوت، سختی هر یک از صفحات اندازه‌گیری شد. این نتایج در جدول (۱) ارائه شده است. پس از اتصال این صفحات به صفحات مسی با روش جوشکاری انفجاری، استحکام برشی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. تغییرات استحکام برشی نسبت به زمان پیرسازی در شکل (۲) ارائه شده است. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش زمان پیرسازی، استحکام برشی اتصالات کاهش می‌یابد. بیشترین و کمترین میزان استحکام برشی برابر با ۱۰۸ MPa و ۰/۹۶ MPa به ترتیب مربوط به نمونه آنیل کامل و نمونه‌ای که به مدت ۱۰ ساعت پیر شده، است. بیشترین نرخ کاهش میزان استحکام برشی، بین زمانهای ۵ و ۷ ساعت پیرسازی مشاهده می‌شود.

شکل (۳) تصویر SEM از سطح مقطع اتصال مس - آلومینیم (آنیل شده) را نشان می‌دهد. در همه تصاویر SEM، AI در قسمت پایین و Cu در قسمت بالای شکل‌ها قرار گرفته است. به دلیل سختی پایین صفحه پرنده (AI)، تنش اعمال شده بر اثر ایجاد شوک، صرف تغییر فرم پلاستیک دو فلز شده است. همان گونه که در شکل (۳-الف) دیده می‌شود، تغییر فرم پلاستیک ایجاد شده در صفحه پرنده، باعث درگیری مکانیکی دو فلز با یکدیگر شده است و موج‌های هر دو فلز به طور منظم و کامل در هم فرو رفته‌اند. شکل (۳-ب) بخش دیگری از فصل مشترک اتصال همان نمونه را نشان می‌دهد. در شکل (۳-ب)، این موج‌ها به طور پیوسته و منظم در طول فصل مشترک نمونه آنیل کامل، قابل مشاهده است. مقدار استحکام برشی به دست آمده برای این نمونه برابر ۱۰۸/۶۴ MPa است که نسبت به نمونه‌های دیگر با سختی بالاتر، بیشتر است. در این نمونه (آنیل کامل AI)، هیچ اثری از وجود ترکیبات دوتایی از مس و آلومینیم، مشاهده نشد.

شکل (۴) تصویر SEM از فصل مشترک اتصال مس - آلومینیم (زمان پیرسازی AI = ۳ ساعت) را نشان می‌دهد. طبق شکل (۴-الف) با افزایش زمان پیرسازی و سخت شدن صفحه پرنده، قسمت‌هایی از موج‌های آلومینیم، به صورت مناطق محبوس شده درون مس در می‌آیند. با افزایش سختی صفحه پرنده، تنش یا نیروی اعمال شده بر اثر انفجار، به جای آن که صرف تغییر فرم پلاستیک صفحه پرنده شود، باعث شکست موج‌های صفحه پرنده شده است.

شکل (۴-ب) بخش دیگری از فصل مشترک اتصال همان نمونه را نشان می‌دهد. در این شکل، جهت فلش نشان دهنده منطقه‌ای است که آنالیز EDX بر روی آن صورت گرفته است. نتایج این آنالیز (79%Cu + 21%Al) منطبق با ترکیب بین فلزی δ در دیگرام دوتایی AI-Cu است. با اجرای میکروسختی سنجی از این مناطق، سختی برابر ۳۶۵ ویکرز حاصل شد. وجود ترک را در این مناطق که با فلش در شکل (۴-ب) نشان داده شده است، می‌توان به گونه زیر توضیح داد. طبق تحقیقات صورت گرفته توسط محققین [۸]، با افزایش سختی صفحه پرنده، نیروی حاصل از شوک انفجاری به جای آنکه صرف تغییر فرم پلاستیک شود، در نقاطی از فصل مشترک متمرکز می‌شود و همین مسأله باعث افزایش موضعی دما می‌شود و در پی آن، ذوب موضعی ایجاد می‌شود. پس از انجماد مناطق ذوبی، ترکیبات مختلف بین فلزی با تردی بالا باعث کاهش استحکام پیوند می‌شوند. وجود ترک‌های متعدد درون این مناطق به عنوان محلی برای گسیختگی اتصال در حین اعمال نیروهای برشی است. طبق شکل (۴-الف)، با افزایش سختی نسبت به حالت آنیل کامل AI، فصل مشترک از حالت موجی خارج و تقریباً به حالت صاف تبدیل می‌شود. موج‌های فصل مشترک، به عنوان موانعی در برابر نیروهای برشی عمل می‌کنند. استحکام برشی به دست آمده برای این نمونه برابر ۸۴/۴۴ MPa است که نسبت به نمونه‌های آنیل و ۲ ساعت پیر شده کمتر است. ترکیبات بین فلزی، در صورتی که متصل به فصل مشترک نباشند، اثرات زیان‌بار کمتری خواهند داشت [۸ و ۶].

نتایج حاصل از نمونه‌ای که در آن آلومینیم به مدت ۵ ساعت تحت پیرسازی مصنوعی قرار گرفته است نسبت به نتایج زمانهای کمتر پیرسازی آلومینیوم، حاکی از آن است که مناطق محبوس شده آلومینیوم درون مس افزایش یافته است. این مسأله باعث کاهش تعداد موج ها یا قفل های مکانیکی در فصل مشترک می‌شود. در ضمن، عرض ترکیب بین فلزی به وجود آمده در فصل مشترک و پیوستگی نسبی آن شکل (۵)، نسبت به زمانهای کمتر پیرسازی آلومینیوم، افزایش یافته است. بر اساس میکرو سختی اندازه‌گیری شده از منطقه عریض موجود در فصل مشترک اتصال (۳۸۴ ویکرز) و نتایج آنالیز EDX به دست آمده ($53\%Cu + 47\%Al$) و تطبیق آن دیاگرام دو فازي Al-Cu، ترکیب موجود، ترکیب بین فلزی θ تشخیص داده شد. استحکام برشی به دست آمده برای این نمونه برابر $69/9$ MPa بود. کاهش استحکام برشی این نمونه نسبت به زمان های کمتر پیرسازی آلومینیوم، به دلیل تشکیل ترکیب بین فلزی θ با عرض زیاد متصل به فصل مشترک است. در نمونه‌هایی که زمان پیرسازی کمتری داشتند، این ترکیبات به صورت محبوس بودند که اثرات زیان‌بار آنها به مراتب کمتر از حالت اخیر است. بیشترین میزان کاهش استحکام برشی، مربوط به نمونه ۷ ساعت پیر شده است. استحکام برشی این نمونه برابر $2/57$ MPa به دست آمد که نسبت به زمان های کمتر پیرسازی، کاهش شدیدی را نشان می‌دهد. آنالیزهای صورت گرفته از فصل مشترک اتصال شکل (۶)، نشان داد که ترکیب بین فلزی θ با میانگین سختی ۳۸۴ ویکرز به صورت ممتد در سرتاسر فصل مشترک و به صورت آشفته وجود دارند. هر چقدر این ترکیبات پیوسته‌تر باشند، ترک های موجود در آنها بیشتر باعث گسیختگی عرض آنها می‌شود.

شکل (۷) تصویر SEM را از فصل مشترک اتصال مس - آلومینیوم (زمان پیرسازی $\lambda=Al$ ساعت) نشان می‌دهد. نمونه‌های ۷، ۸ و ۱۰ ساعت پیر شده به دلیل اینکه سختی یکسانی دارند، تقریباً دارای خواص یکسان از جهت مقدار استحکام برشی و مورفولوژی فصل مشترک هستند. در نمونه ۸ ساعت پیر شده، دو نوع ترکیب بین فلزی مشاهده شد. در شکل ۷، دو نوع منطقه که با S و K علامت‌گذاری شده‌اند، دیده می‌شود. بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که ترکیبات موجود در دو منطقه S و K به ترتیب ترکیبات بین فلزی θ و ξ_2 هستند. عرض این ترکیبات متصل به فصل مشترک، نسبت به زمانهای کمتر پیرسازی، بسیار بیشتر هستند. کاهش شدید استحکام برشی این نمونه را می‌توان ناشی از وجود ترکهای طولانی در عرض این ترکیبات دانست.

در این تحقیق، ترکیبات غیر تعادلی آلومینیوم و مس در فصل مشترک اتصال نمونه‌ها مشاهده نشد. ترکیبات غیر تعادلی آلومینیوم و مس که ترکیبات ناپایداری هستند، در زمان و دمای مشخصی به ترکیبات پایداری تبدیل می‌شوند. سختی کلیه ترکیبات غیر تعادلی آلومینیوم و مس بالای ۴۵۰ ویکرز است [۹]. با توجه به دامنه سختی حاصله در تحقیق حاضر برای انواع ترکیبات آلومینیوم و مس (۳۹۱-۳۶۵ ویکرز) و انطباق آن با دامنه سختی انواع ترکیبات بین فلزی (۴۱۵-۳۶۰ ویکرز) [۹] و همچنین آنالیزهای EDX به دست آمده و انطباق آنها با دیاگرام دوتایی Al-Cu، وجود ترکیبات مختلف بین فلزی همچون (δ, ξ_2, θ) نتیجه‌گیری شد.

نتیجه‌گیری

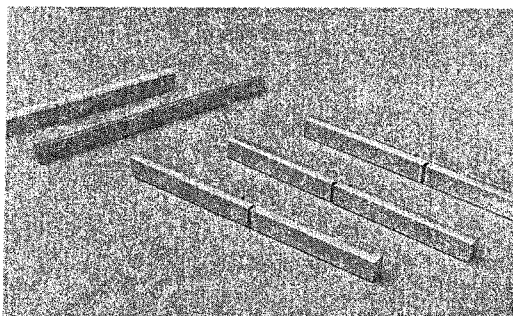
- ۱- با افزایش سختی صفحه پرنده، شمار نقاطی از فصل مشترک که در آنها دما به طور موضعی بالا می‌رود، بیشتر می‌شود. چرا که نیروی حاصل از شوک انفجاری به جای آنکه صرف تغییر فرم پلاستیک صفحه پرنده شود، به دلیل سختی بالای صفحه پرنده، در نقاطی از فصل مشترک متمرکز می‌شود و باعث ایجاد ذوب موضعی و به تبع آن ترکیبات بین فلزی می‌شود.
- ۲- تشکیل فازهای بین فلزی (δ, θ, ξ_2) به طور پیوسته و با عرض زیاد در فصل مشترک، با افزایش سختی صفحه پرنده افزایش می‌یابد.
- ۳- با افزایش سختی صفحه پرنده، موج های آلومینیوم به علت تمرکز تنش شکسته شده و به صورت جزایر جداگانه‌ای درون مس محبوس می‌شوند. همین مسئله باعث تغییر مورفولوژی فصل مشترک از حالت موجی به حالت صاف می‌شود.
- ۴- اثرات زیان بار محبوس شدن فازهای بین فلزی در داخل فلزات نسبت به حالتی که متصل به فصل مشترک هستند، کمتر است. چرا که در حالت اول گسترش ترک، باعث گسیختگی اتصال می‌شود.

تشکر و قدردانی

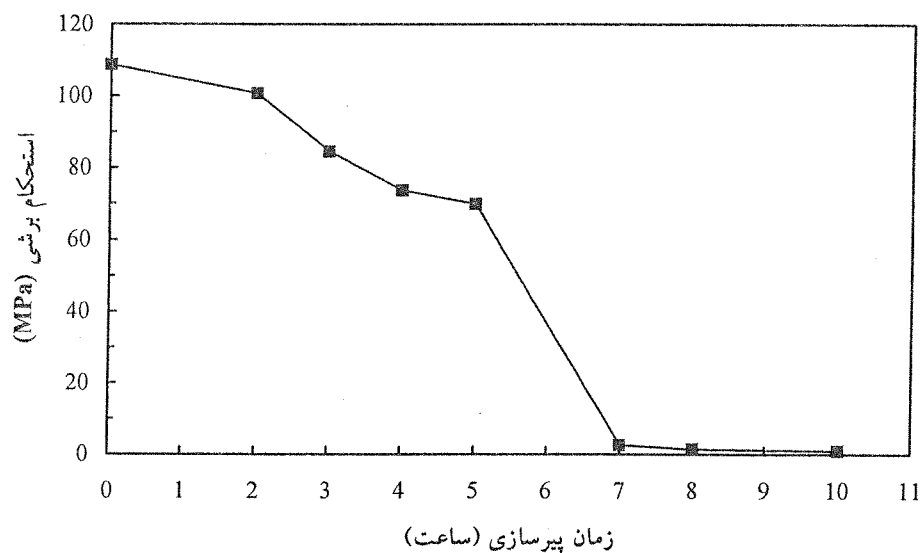
نویسندگان این مقاله، از حمایت مالی صنایع مهمات سازی و متالورژی و راهنمایی‌های آقای دکتر حمید اسدی، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

جدول (۱) تغییرات میانگین سختی بر حسب زمان پیر سختی برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ پیر سخت شده در دمای ۱۶۰C. میانگین سختی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در حالت آنیل کامل، ۲۸/۲ برینل می باشد.

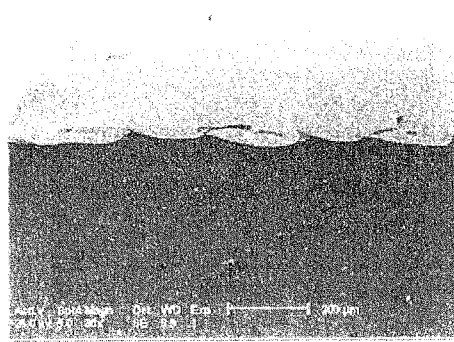
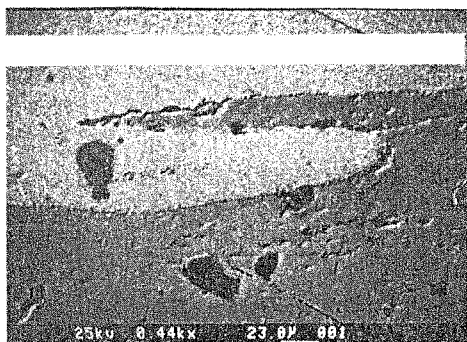
شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
زمان پیر سختی (ساعت)	۲	۳	۴	۵	۷	۸	۱۰
مقدار سختی (برینل)	۳۶/۵	۳۷/۳	۳۸/۹	۳۹/۸	۴۱/۶	۴۱/۸	۴۱/۹



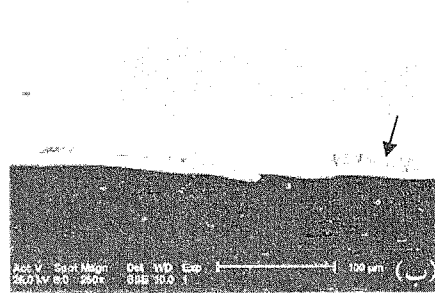
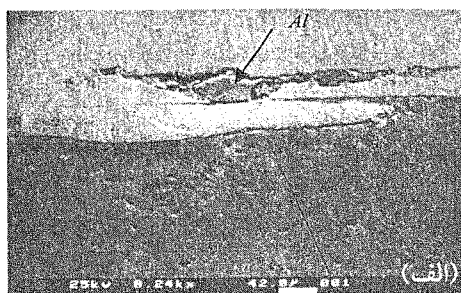
شکل (۱) تصویری از نمونه‌های تست برشی.



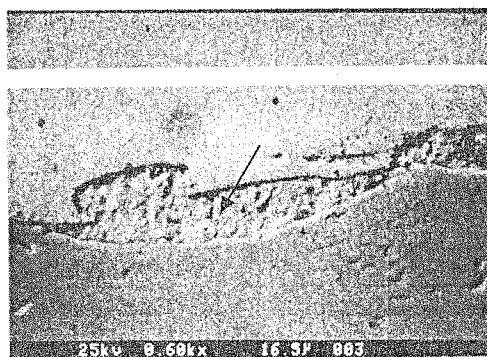
شکل (۲) استحکام برشی نمونه‌های جوشکاری شده بر حسب زمان پیر سازی آلومینیوم.



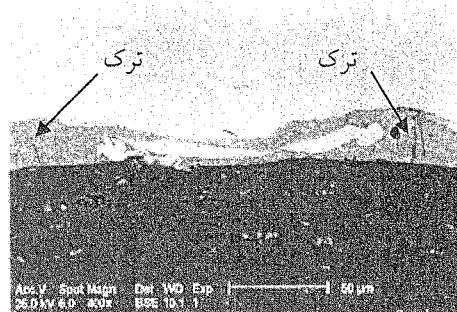
شکل (۳) تصویر SEM از فصل مشترک اتصال آلومینیوم (آنیل کامل) - مس، نشان دهنده الف) موج آلومینیوم نفوذ کرده در داخل مس و ب) موج های منظم مس و آلومینیوم.



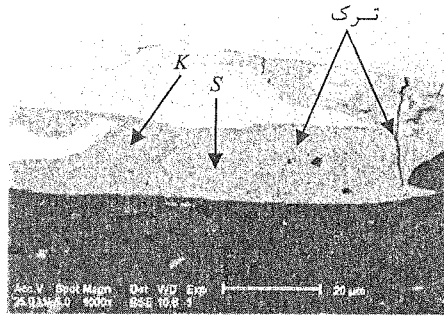
شکل (۴) تصویر SEM از فصل مشترک اتصال آلومینیوم (زمان پیرسازی: ۳ ساعت) - مس، نشان دهنده الف) آلومینیوم محبوس شده درون مس و ب) ترکیب بین فلزی θ (جهت فلش).



شکل (۵) تصویر SEM از فصل مشترک اتصال آلومینیوم (زمان پیرسازی: ۵ ساعت) - مس، نشان دهنده ترکیب بین فلزی θ با عرض زیاد در فصل مشترک.



شکل (۶) تصویر SEM از فصل مشترک اتصال آلومینیوم (زمان پیرسازی: ۷ ساعت) - مس، نشان دهنده ترکیب بین فلزی θ به طور آشفته همراه با ترک.



شکل (۷) تصویر SEM از فصل مشترک اتصال آلومینیم (زمان پیر سازی: ۸ ساعت) مس، نشان دهنده ترکیبات بین فلزی θ (منطقه S) و θ_2 (منطقه K).

مراجع

- [1] T.Z. Blazynki, *Explosive welding Forming and Compaction*, London Publication, London 1983. pp. 358-412.
- [۲] علی جم‌پور، بررسی تئوریک و تجربی اتصال ورق‌های ضخیم آلومینیم - مس از طریق انفجار، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مکانیک، ۱۳۷۹.
- [۳] محمد دامغانی نوری، جوشکاری انفجاری لوله‌ها، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مکانیک، ۱۳۸۰.
- [4] A. Darvizeh, G.H. Liaghat and M.D. Noori, Numerical Simulation oh High Rate Deformation of Tube in Explosive Weding Process, *Modarres Technical and Engineering*, No. 12, 2003, pp. 89-106.
- [5] M.J. Hammer Schmidt and H. Kreye, Microstructural Features Determining the Properties of Explosive Welds, *Proc. of 7th Int. Conf. on High Energy Rate Fabrication*, Sept. 14-18, Leeds, U.K., 1981, pp. 60-68.
- [6] M.J. Hammer Schmidt and H. Kreye, The Rate of Adiabatic Shearing in Explosive Welding, *Proc. of 2nd Meeting on Explosive Working of Materials*, Sept. 8-10, Novosibirsk, Russia 1981, pp. 1-10.
- [7] B. Crossland, *Explosive Welding of Metals and Its Application*, London publication, London, 1985, pp. 179-193.
- [8] A.M. Staver, Merallurgical Effect Under Shock Compression of Powder Materials, in *Shock Waves and Explosion Phenomena*, Ed. by M.A. Meyers and L.E. Murr, London Publication, London. 1981, Chapter 49, pp. 1531-1540.
- [9] ASM International, *Metals Handbook*, Ninth Edition, ASM, Vol. 9, 1985, pp. 354-357.