

جوشکاری اصطکاکی کامپوزیت $Al\ 6061-Al_2O_3$ / فولاد AISI 304 و ارزیابی خواص اتصال

علی سعیدی
دانشیار

مرتضی شمعیان
استادیار

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

در این تحقیق، خواص مکانیکی و متالورژیکی و همچنین شکست ذرات در جوشکاری اصطکاکی فولاد زنگ نزن AISI304 به کامپوزیت آلومینیوم 6061 بررسی شده است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که استحکام بهینه اتصال، زمانی به دست می‌آید که فشار اصطکاکی بالایی در عملیات جوشکاری اصطکاکی فولاد زنگ نزن AISI 304 و کامپوزیت آلومینیوم، به کار گرفته شود. فشار اصطکاکی بالا دو اثر مفید دارد؛ اول کاهش ضخامت لایه ترکیب بین فلزی $FeAl_3$ که در فصل مشترک اتصال، تشکیل می‌شود و دیگر احتمال شکست و پراکندگی فیلم‌های اکسیدی را در فصل مشترک بالا می‌برد. با توجه به خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم به پخش یکنواخت ذرات بستگی دارد و نیز با افزایش تعداد ذرات شکسته شده در موضع اتصال، خواص مکانیکی کاهش می‌یابد، برای این تأثیر عملیات جوشکاری اصطکاکی، بر شکست ذرات در فصل مشترک مهم است. بنابراین با توجه به خصوصیات قطعات در تماس، فشار اصطکاکی که باعث شکست ذرات می‌شود محاسبه شد و شبیه‌سازی شکست ذرات صورت گرفت. همچنین با توجه به حرارت تولیدی در جوشکاری اصطکاکی، مسأله ای کلیدی در این فرآیند است، این پدیده مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان می‌دهد که به علت ضریب هدایت حرارتی کامپوزیت آلومینیوم، نسبت به فولاد زنگ نزن بیشتر است، عمده حرارت ایجاد شده، وارد قسمت کامپوزیت آلومینیومی می‌شود و این امر باعث کاهش سختی قطعه کامپوزیت آلومینیوم تا فاصله‌ای از موضع اتصال می‌شود.

کلمات کلیدی

جوشکاری اصطکاکی - فولاد زنگ نزن - کامپوزیت زمینه فلزی - شکست ذرات - هدایت حرارتی.

Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of Al 6061- Al_2O_3 Composite/AISI 304 Friction Welds

M. Shamanian
Assistant Professor

A. Saidi
Associate Professor

Department of Materials Engineering,
Isfahan University of Technology

Abstract

The metallurgical and mechanical properties of aluminum composite/AISI 304 friction welds have been investigated. Notch tensile strength MMC/AISI 304 friction welds increased when high friction pressures were applied during the joining operation. High friction pressure had two beneficial effects, i.e., it decreased the thickness of the $FeAl_3$ intermetallic film and it promoted disruption and dispersal of oxide films at the joint interface. Also, since the mechanical properties of aluminum-based MMC material depend on a uniform distribution of particulate material, the

influence of friction joining operation on the particle characteristics in the interface region has been modeled. Heat input is an important quantity when examining friction welding because together with friction time determine the softened zone width and the peak temperature in material at and close to the joint interface. The temperature distribution during friction welding MMC/AISI 304 has been studied. Aluminum has a higher thermal conductivity, hence, it is expected that the aluminum substrate will conduct more heat. Softened zones are produced in aluminum composite because of the thermal cycle in friction welding and higher thermal conductivity of aluminum.

Keywords

Friction Welding, Stainless Steel, Metal Matrix composite, Particle Fracture, Thermal Conductivity.

مقدمه

کامپوزیت زمینه فلزی آلومینیوم (MMC)^۱ حاوی ذرات استحکام بخش Al_2O_3 دارای مزایایی از جمله استحکام ویژه و مدول الاستیک بالا و مقاومت سایشی مناسبی است. در بعضی از کاربردهای مواد MMC نیاز به اتصال این مواد به یکدیگر یا سایر مواد نظیر فولاد زنگ نزن AISI 304 است.

پیشنهاد شده است که خواص مکانیکی اتصالات اصطکاکی آلومینیوم و فولاد زنگ نزن، متأثر از تولید فازهای بین فلزی در ناحیه فصل مشترک است [۱]. بنابراین، باید از وجود فاز و نوع آن در فصل مشترک جوش غیرمشابه فولاد زنگ نزن AISI 304/ MMC به روش اصطکاکی اطمینان حاصل کرد. نظرات مختلفی درباره نقش ایفا شده توسط قطعه سخت تر (که دارای تنش سیلان بالاتری در دمای بالاست) در حین اتصال اصطکاکی ارائه شده است. چرنکو^۲ پیشنهاد کرده است که اندکی تغییر شکل پایه سخت تر (فولاد زنگ نزن) برای حصول خواص مکانیکی مناسب جوش فولاد زنگ نزن و آلومینیوم ضروری است [۲]. زمانی که اختلاف تنش سیلان پایه سخت تر و پایه نرم تر خیلی بالا باشد، پایه سخت تر فقط کمی تغییر شکل می دهد، برای همین خواص مکانیکی جوش حاصل، ضعیف خواهد بود. با وجود این، بهرانی و سادا^۳ نقش غیرفعال برای پایه سخت تر ارائه کرده اند [۳]؛ یعنی، ابتدا پایه سخت تر بطور کاملاً با یک لایه از ماده نرم تر و در حین مراحل اولیه جوشکاری اصطکاکی غیر مشابه پوشانده می شود و سپس این لایه به عنوان یک لایه ثابت به گونه ای عمل می کند که صفحه محل لغزش دو قطعه روی هم، به صورت محوری به سمت پایه نرم تر جابه جا می شود. پیشنهاد شده است که ایجاد فاز بین فلزی در اتصالات غیر مشابه فولاد زنگ نزن AISI 304/ Al در فصل مشترک با افزایش سرعت گردش و فشار اصطکاکی اندک در حین اتصال اصطکاکی غیر مشابه آلومینیوم و فولاد زنگ نزن، افزایش می یابد. کمترین مقادیر استحکام اتصال در سرعت های بالای چرخش قطعه متحرک به دست آمده است. سرعت های چرخش بالاتر باعث ایجاد دماهای بالاتر در فصل مشترک شده و برای همین رشد این فازهای بین فلزی به صورت دیفیوژیون در هم تسریع می شود [۵].

به طور کلی فرآیند جوشکاری اصطکاکی را می توان شامل یک سری مراحل متوالی در نظر گرفت، مرحله ۱: حرارت به وسیله اصطکاک تولید و نیروی گشتاوری به حداکثر مقدار خود می رسد. مرحله ۲: حرارت در ماده خمیری تولید می شود و ماده نرم شده به طور شعاعی به بیرون سیلان می یابد. مرحله ۳: یک حالت پایداری به دست می آید و نیروی گشتاوری، پخش دما و سرعت کوتاه شدن محوری لزوماً ثابت هستند. مرحله ۴: چرخش، پایان یافته و نیروی فورج اعمال می شود. به دلیل آن که اتصال اصطکاکی به تولید حرارت سریع و سیکل تنش/ کرنش بستگی دارد، باید انتظار داشت که خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال کامل شده، کاملاً متفاوت با ماده پایه باشد [۳-۴].

رفتار شکست ذرات در حین آزمایش کشش فلز مبنای Al_2O_3 -6061 مورد بررسی شده است. احتمال شکست ذرات با افزایش کرنش اعمالی، زیاد می شود و میزان ترک خوردن ذرات بستگی به توزیع اندازه ذرات و ریزساختار زمینه دارد. در حین اجرای آزمایش مکانیکی فلز مبنای MMC در شرایط فشار هیدروستاتیکی بالا، شکست ذرات تحت فشار حدود 1 MPa رخ می دهد [۱]. مشخص شده است در حالتی که فشار اصطکاکی بالا در جوشکاری فولاد زنگ نزن AISI 304/ MMC اعمال شده، قطر ذره و فاصله میان ذره ای کم می شود و کسر سطح ذرات در فصل مشترک تماس افزایش می یابد [۵-۷].

مواد و شرایط جوشکاری اصطکاکی

نمونه‌های آزمایش، شامل استوانه‌هایی به قطر ۱۹mm از کامپوزیت آلومینیوم (T6) 6061 حاوی ۱۰ درصد حجمی ذرات Al_2O_3 با شعاع متوسط $5/82\mu m$ و نمونه فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304 است. ترکیب شیمیایی ماده مبنای MMC و فولاد زنگ نزن AISI 304 بر حسب درصد وزنی عناصر در جدول (۱) و همچنین خواص مکانیکی و حرارتی آنها به ترتیب در جداول (۲) و (۳) ارائه شده است.

پیش از جوشکاری اصطکاکی هر دو سطح نمونه‌ها تا سنباده ۱۲۰۰ سنباده زنی و سپس با لآب و استن شست و شو داده شدند. جوشکاری اصطکاکی با ماشین جوشکاری اصطکاکی مداوم با مدل Thompson 10SW انجام شد. پارامترهای جوشکاری در حین فرآیند اتصال اصطکاکی شامل تغییر فشار اصطکاکی (p_1) ۲۴۰-۳۰۰ MPa، زمان اصطکاک (t_1) ۲-۴ ثانیه و فشار فورج (p_2) ۲۴۰-۱۲۰ MPa، زمان فورج (t_2) ۱ ثانیه و سرعت چرخش ۱۵۰۰ rpm انتخاب شد. برای ارزیابی خواص مکانیکی موضع اتصال از آزمایش کشش استفاده شد. طرح ساده‌ای از نمونه‌های آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. جزئیات کامل فرآیند شکست ذرات در حین اتصال فولاد زنگ نزن MMC / AISI 304 با مطالعه اتصالات در زمان‌های مختلف بررسی شد. این محدوده زمانی شامل دوره اولیه گرم شدن (مرحله I) و زمان پایداری^۴ است، زمان پایداری زمانی است که لایه خمیری کاملاً فصل مشترک اتصال را می‌پوشاند.

مشخصات ریز ساختارهای فصل مشترک جوش در بزرگ‌نمایی‌های مختلف مطالعه شد. فرآیند اچ کردن شامل دو مرحله بود: (a) اچ الکترولیتی پایه فولاد زنگ نزن با محلول اسید اگزالیک ۱۰ درصد و آمپراژ ۰/۳A به مدت ۳/۵ دقیقه. (b) اچ شیمیایی پایه MMC با محلول حاوی ۱۰ میلی لیتر اسید هیدرو فلوریک (HF)، ۵ میلی لیتر اسید نیتریک (HNO_3) و ۸۵ میلی لیتر آب.

نتایج و بحث

ریز ساختار فصل مشترک جوش

شکل ۲ مشخصات ریز ساختاری جوش اصطکاکی فولاد زنگ نزن MMC/AISA 304 را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه تنش سیلان دمای بالای فولاد زنگ نزن AISI 304 بسیار بالاتر از ماده مبنای MMC پایه آلومینیومی است [۵]، تقریباً همه تغییر شکل محوری در حین جوشکاری اصطکاکی در پایه MMC رخ می‌دهد. این مطلب، توجه کننده شکل صفحه‌ای اتصال فولاد زنگ نزن MMC / AISI 304 پس از تکمیل آن است (شکل ۲ب).

باید یاد آور شد که شکل‌گیری ترجیحی نواحی با دانه‌های تبلور مجدد جزئی در ناحیه نیم شعاع در پایه MMC تنها در آزمایش‌های با زمان کوتاه دیده می‌شود. زمانی که مدت اصطکاک از ۱/۲ ثانیه تجاوز کند، تعادل دمایی بین محیط جوش و خط مرکزی اجازه می‌دهد، نواحی با تبلور مجدد جزئی در پایه MMC در کل فصل مشترک جوش گسترش یابد. با وجود این، تغییرات ریز ساختاری در اثر سیلان پلاستیکی در هر دو پایه دیده می‌شود که گواه روشنی بر سیکل بارگذاری و حرارتی اعمال شده در مراحل اولیه جوشکاری اصطکاکی است (شکل ۲ج).

تولید میان لایه

تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که میان لایه تولید شده در فصل مشترک اتصال MMC/AISI304، مخلوطی از اکسیدهای پلی کریستال $Fe(Al,Cr)_2O_4$ یا $FeO(Al,Cr)_2O_3$ و فاز $FeAl_3$ است [۱]. عموماً فرض می‌شود که تولید فاز بین فلزی در فصل مشترک جوش غیر مشابه، تعیین کننده خواص مکانیکی اتصال فولاد زنگ نزن MMC/AISI304 با روش اصطکاکی است. ولی در این مطالعه، مشابه تحقیقات پیشینی هم اکسیدها و هم لایه‌های بین فلزی در فصل مشترک جوش غیر مشابه دیده می‌شود [۶]. اکسید آلومینیوم بسیار پایدار است. برای مثال خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیومی جوش داده شده به روش نفوذی عموماً بستگی به شکست و پراکندگی این فیلم اکسیدی دارد [۱]. در مقایسه، اکسید فلزاتی نظیر تیتانیم

و مس به راحتی شکسته و در حین اتصال دیفوزیونی برطرف می‌شود. در جوشکاری اصطکاکی غیر مشابه انتظار می‌رود که پراکندگی و شکست اکسید آلومینیوم در مراحل اولیه فرآیند جوشکاری اصطکاکی انجام شود. ولی در مرحله اول جوشکاری اصطکاکی، شرایط جوشکاری، اکسیداسیون مجدد سطوح تماس را فراهم می‌کند. زمانی که لایه اکسیدی $Fe(Al,Cr)_2O_4$ در فصل مشترک اتصال تولید شود، سدی ایجاد می‌شود که مانع تولید لایه بین فلزی در حین ادامه فرآیند اصطکاکی می‌شود. بوستد و بدفرد^۵ ثابت کرده‌اند که وجود فاز اسپینل $FeAl_2O_4$ در فصل مشترک آهن/آلومینیوم باعث ممانعت شدید از تولید فاز بین فلزی در اتصالات آهن/آلومینیوم در دمای بالا و به مدت زمان طولانی می‌شود [۶]. در تحقیق حاضر با بررسی‌ها و مطالعات به عمل آمده توسط سایر محققان پیش‌بینی می‌شود که در فصل مشترک اتصال ترکیب بین فلزی $FeAl_3$ ایجاد شده باشد [۵].

اثر جوشکاری اصطکاکی بر توزیع ذرات در خط جوش

سه شکل اصلی شکست ذرات در حین آزمایش مکانیکی ماده مینا MMC دیده می‌شود: ترک خوردن، جدا شدن اتصال و خرد شدن [۵]. از موارد مذکور تنها ترک خوردن و جدا شدن ذرات در نزدیکی خط جوش مشاهده شده است (شکل ۳). با وجود این باید خاطر نشان کرد که کرنش پلاستیکی شدید ایجاد شده در فصل مشترک جوش باعث می‌شود که ذرات شکسته شده از محل دور شوند و بنابراین شواهد وجود حالت خرد شدن^۶ ذرات به این ترتیب از بین می‌رود. شکل ۴ اثر جوشکاری اصطکاکی بر روی شعاع متوسط ذرات در خط جوش فولاد زنگ نزن MMC/AISI304 را نشان می‌دهد. تعداد ذرات تقویت کننده با قطر کم به شدت در نزدیکی خط جوش زیاد شده است. همچنین، حجم ذرات تقویت کننده در خط جوش ۲/۸ برابر بیشتر از ماده مینای MMC است. در شکل ۵ دیده می‌شود که درصد ذرات شکسته شده با افزایش زمان اصطکاک کاهش می‌یابد و به مقدار پایدار ۳/۸٪ می‌رسد. این امر به دلیل آن است که مرحله ۲ جوشکاری وقتی شروع می‌شود که یک لایه کاملاً پلاستیکی در سطح مقطع تماس ایجاد شود. در مورد جوشکاری اصطکاکی MMC/AISI304 شاید این مرحله در زمان‌های بین ۰/۸ تا ۱/۲ ثانیه رخ دهد. مرحله دوم در جوشکاری اصطکاکی وقتی است که گشتاور، پایین و درجه حرارت بالاست. با افزایش درجه حرارت، شکست ذرات بسیار کمتر رخ می‌دهد. با توجه به محاسبات قسمت توزیع دما جوشکاری اصطکاکی در این مقاله دیده می‌شود که درجه حرارت در طی جوشکاری اصطکاکی و در زمانی حدود ۲ ثانیه به حدود $616^{\circ}C$ می‌رسد و در این دماها تنش سیلان MMC کاهش می‌یابد و از احتمال شکست ذرات کاسته خواهد شد.

شبیه سازی شکست ذرات

ذرات تقویت کننده آلومینا زمانی می‌شکنند که تنش اعمال شده، حداقل برابر با استحکام کششی آنها باشد [۸]. تنش کششی لازم برای ایجاد ترک در یک ماده ترد عبارتست از [۵]:

$$\sigma = \left[\frac{2E\gamma_s}{\pi c} \right]^{1/2} \quad (1)$$

که در این رابطه σ تنش کششی، E مدول الاستیک ذره، C شعاع ذره و γ_s انرژی سطحی ماده است. با استفاده از اطلاعات جدول ۲ و ۳ در مورد MMC و با در نظر گرفتن مقادیر $E = 81/4GPa$ [۵]، $\gamma_s = 1Jm^{-2}$ و $C = 5/12\mu m$ ، تنش محاسبه شده $94/36MPa$ است. زمانی که دو پایه کنار هم باشند تماس میان برجستگی‌های سطحی رخ می‌دهد (با فرض آنکه بخشی از ذره Al_2O_3 بالاتر از سطح زمینه پایه MMC قرار گیرد). مقدار فشار تماس بستگی به ماهیت سطوح تماس، مدول‌های الاستیکی پایه‌ها، ضریب اصطکاک و توپوگرافی سطح دارد. تنش‌های شدید، در نقاط تماس شکل می‌گیرد و شکست ذرات و تغییر فرم زمینه را تسهیل می‌کند. اگر پایه MMC دارای سطحی موجی باشد که روی یک سطح تخت فولادی می‌لغزد و فاصله میان نقاط تماس λ باشد (فاصله بین ذره‌ای)، تماس اولیه می‌تواند به شکل هر تزی^۷ در نظر گرفته شود [۸]. از طرفی فشار تماسی p_0 در هر برآمدگی (هر ذره Al_2O_3) با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۵]:

$$p_0 = \frac{3\sigma}{1-2\nu} \quad (2)$$

بنابراین حداکثر بار تماسی در هر برآمدگی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد [۵]:

$$P = \frac{p_0^3 \pi^3 R^2}{6E^*2} \quad (3)$$

جایی که E^* مدول الاستیک ترکیبی و R شعاع ترکیبی انحناس و با روابط زیر محاسبه می‌شوند [۵]:

$$E^* = \left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$R = \left[\frac{4\pi^2 \Delta}{\lambda^2} \right]^{-1} \quad (5)$$

با فرض سطح تماس دو بعدی موجی (شکل ۶) با فاصله بین ذره ای $\lambda = 10.4/8 \mu\text{m}$ و مقدار برآمدگی Δ برابر $1 \mu\text{m}$ و مدول الاستیک ترکیبی MMC و فولاد زنگ نزن برابر با $E^* = 63/88 \text{GPa}$ (با کمک اطلاعات جدول ۲ و رابطه ۶)، شعاع انحناء این سطح موجی برابر $2/78 \times 10^{-4} \text{m}$ به دست می‌آید.

در حالت $\sigma = 94/36 \text{MPa}$ و $\nu = 0/332$ و به کمک رابطه ۲ مقدار $p_0 = 842/5 \text{MPa}$ به دست می‌آید. از معادله ۳ نیروی اعمالی P برابر $0/58 \text{N}$ محاسبه می‌شود و تنش عمودی اعمال شده را به کمک رابطه $\left(p = \frac{P}{\lambda^2} \right)$ می‌توان محاسبه کرد که برابر $p = 5/28 \text{MPa}$ است. همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار فشار نرمال، به طور محسوسی به اندازه برآمدگی (Δ) بستگی دارد (که می‌تواند به زبری اولیه سطح نسبت داده شود).

تنش شعاعی لازم، برای شکست ذرات آلومین زمانی حاصل می‌شود که فشار عمودی در مرحله اول اتصال اصطکاکی در حدود $5/28 \text{MPa}$ باشد. این مقدار محاسبه شده با مقادیر تجربی اندازه‌گیری شده در مورد فشار عمودی که در آزمایش سایش لغزنده کامپوزیت زمینه آلومینیومی با ۱۰ درصد حجمی ذرات Al_2O_3 به دست آمده همخوانی دارد [۵ و ۷]. زمانی که از این فشار عمودی تجاوز شود، سایش، بسیار شدید می‌شود. به علت آن که حداقل فشار عمودی اعمال شده در حین اتصال اصطکاکی برابر 30MPa است، شکست ذرات در مراحل اولیه فرآیند رخ می‌دهد.

توزیع دما در جوشکاری اصطکاکی

تحقیقات وسیعی در زمینه محاسبه حرارت تولیدی و توزیع دما در جوشکاری اصطکاکی صورت گرفته است. در جوشکاری اصطکاکی، وقتی یک گشتاور T بر سطح تماس اعمال شود، تقریباً تمامی کار پلاستیکی ایجاد شده بوسیله بار برشی به حرارت تبدیل می‌شود، متوسط حرارت تولیدی برابر است با [۸]:

$$\frac{q_0}{A} = \frac{2}{3} \mu P V_{\text{max}} \quad (6)$$

جایی که q_0/A (wmm^{-2}) حرارت تولیدی ویژه، μ ضریب اصطکاک، P (MPa) فشار اصطکاکی و V_{max} (ms^{-1}) حداکثر سرعت چرخشی است. رابطه ۶ نشان‌دهنده حرارت تولیدی در فصل مشترک اتصال در فرآیند جوشکاری اصطکاکی و بدون حضور ناهمواریهای ذوب شده است.

برای ارزیابی توزیع درجه حرارت در نمونه تحت جوشکاری اصطکاکی رابطه زیر ارائه شده است [۸]:

$$T - T_0 = \frac{q_0 \sqrt{t}}{\rho c \sqrt{\pi a}} \left[\exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right) - \left(\frac{\sqrt{\pi x}}{\sqrt{4at}}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4at}}\right) \right] \quad (7)$$

در این رابطه، T (°C) دما در هر لحظه و در هر فاصله از سطح تماس، T_0 دمای محیط، t (S) هر زمان در جوشکاری اصطکاکی، x (mm) فاصله از سطح تماس، a ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) نفوذپذیری حرارتی و ρc ($\text{J}/\text{mm}^3 \cdot \text{C}$) ظرفیت حرارتی حجمی هستند. در حالتی که $P_1 = 30 \text{ MPa}$ ، $t_1 = 2 \text{ sec}$ ، $V = 1/49 \text{ m/s}$ به کمک اطلاعات جدول ۳ و رابطه ۷ و ضریب اصطکاک حدود ۰/۵ برای اصطکاک بین MMC و فولاد زنگ نزن [۴] و با توجه به اینکه ظرفیت گرمایی میانگین و نفوذپذیری حرارتی میانگین مجموعه MMC/AISI304 به ترتیب $\rho c = 3/2 \times 10^{-3}$ و $a = 39/52$ است، مقدار درجه حرارت در فصل مشترک اتصال در حدود 616°C $T =$ به دست می‌آید.

از آنجا که آلومینیوم دارای ضریب هدایت حرارتی بالاتری در مقایسه با فولاد زنگ نزن AISI 304 است (جدول ۳)، عمده حرارت ایجاد شده در فصل مشترک از طریق آلومینیوم انتقال می‌یابد. یک آنالیز ساده در مورد انتقال حرارت در جوشکاری اصطکاکی با رابطه زیر بیان می‌شود [۹]:

$$\gamma = \frac{K_1}{K_1 + K_2} \quad (8)$$

در این رابطه K_1 و K_2 بیانگر ضریب هدایت حرارتی دو قطعه است. با توجه به اطلاعات جدول ۳ و با در نظر گرفتن خواص حرارتی دو جزء (K_1 و K_2 مربوط به MMC و AISI304) و به کمک رابطه ۸ دیده می‌شود که حدود ۹۱ درصد حرارت ایجاد شده در فصل مشترک توسط MMC به بیرون انتقال می‌یابد. با توجه به آنکه عمده حرارت، وارد قسمت کامپوزیت آلومینیومی می‌شود، انتظار می‌رود که سختی قطعه آلومینیومی تا فاصله‌ای از موضع اتصال شروع به کاهش کند. چنین حالتی را می‌توان در شکل ۷ مشاهده کرد. همچنین با توجه به شکل ۷ دیده می‌شود که با افزایش فشار اصطکاکی پهنای منطقه نرم شده کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که درجه حرارت در فصل مشترک اتصال با افزایش فشار اصطکاکی کاهش می‌یابد [۳ و ۱]. با توجه به شکل ۸ - الف و دیده می‌شود که با افزایش فشار اصطکاکی، پهنای منطقه نرم شده، کاهش و سختی این منطقه افزایش یافته است، در حالی که مطابق شکل ۸ - ج استحکام کششی با افزایش فشار اصطکاکی افزایش یافته است. دلیل کاهش پهنای منطقه نرم شده و افزایش سختی آن بدلیل کاهش درجه حرارت در فصل مشترک اتصال با افزایش فشار اصطکاکی است [۳ و ۱]. همچنین به دلیل آن که با افزایش فشار اصطکاکی پهنای منطقه نرم شده در مجاورت فصل مشترک اتصال کاهش یافته برای این استحکام کششی افزایش خواهد یافت. بنابراین می‌توان گفت که استحکام کششی اتصالات بستگی شدیدی به خواص مکانیکی MMC مجاور فصل مشترک اتصال دارد.

نتیجه گیری

با توجه به نتایج این پژوهش دیده می‌شود که فشار اصطکاکی، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر استحکام کششی اتصال MMC/AISI304 دارد و زمانی که فشار اصطکاکی بالا به کار گرفته شود استحکام این اتصال حداکثر خواهد شد. به کارگیری فشار اصطکاکی بالا باعث می‌شود که احتمالاً ضخامت لایه ترکیب بین فلزی FeAl_3 شکل گرفته در فصل مشترک کاهش یافته و شکست و پراکندگی فیلمهای اکسیدی در فصل مشترک اتصال را بالا ببرد. همچنین با افزایش فشار اصطکاکی، سختی منطقه مجاور جوش افزایش و پهنای منطقه نرم شده کاهش می‌یابد. فشار عمودی محاسبه شده شکست ذرات Al_2O_3 برابر $5/82 \text{ MPa}$ است. به علت آن که حداقل فشار اعمالی در حین اتصال اصطکاکی برابر 30 MPa است، شکست ذرات در مراحل اولیه فرآیند رخ می‌دهد.

بررسی ساختار میکروسکوپی خط اتصال جوش نشان می‌دهد که تغییرات ریزساختاری در اثر سیلان پلاستیکی در هر دو

پایه رخ می‌دهد که ممکن است دلیلی بر سیکل بارگذاری و حرارتی اعمال شده در مراحل اولیه جوشکاری اصطکاکی باشد. ارزیابی درجه حرارت در فصل مشترک اتصال نشان می‌دهد که درجه حرارت در این ناحیه تا حدود 616°C افزایش یافته است و با توجه به آنکه عمده حرارت از طریق کامپوزیت زمینه آلومینیومی انتقال می‌یابد، برای این تا فاصله ای از موضع اتصال سختی قطعه کاهش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند نهایت تشکر و قدردانی را از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان برای کمک‌های مالی به طرح پژوهشی جوشکاری فولادهای مقاوم در دمای بالا اعلام نمایند.

زیر نویس‌ها

- 1- Metal Matrix Composite (MMC)
- 2- Cherneko
- 3-Bahrani & Sada
- 4- Steady State

- 5-Boustead & Bedford
- 6-Shattering
- 7-Hertzian

جدول (۱) ترکیب شیمیایی MMC و فولاد زنگ نزن AISI304.

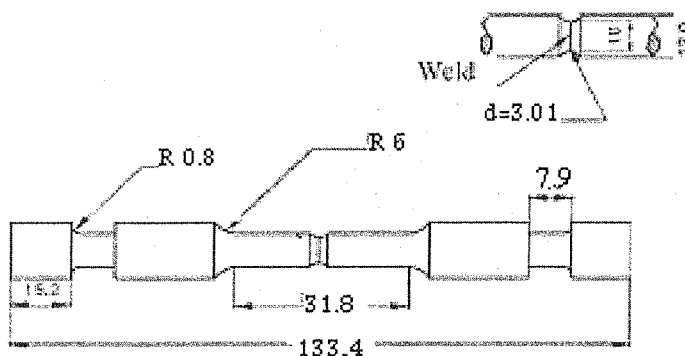
MMC	Al	Mg	Si	C	Cu	Fe	Zn
	۹۷/۷۶	۱/۱۵	۰/۵۳	۰/۰۹۹	۰/۲۲۵	۰/۱۲۱	۰/۰۲۲
AISI304	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V
	۰/۰۴	۰/۰۰۶	۱/۱۵	۹/۵	۱۷/۱۹	۰/۵۴	۰/۰۸

جدول (۲) خواص مکانیکی MMC و فولاد زنگ نزن AISI304.

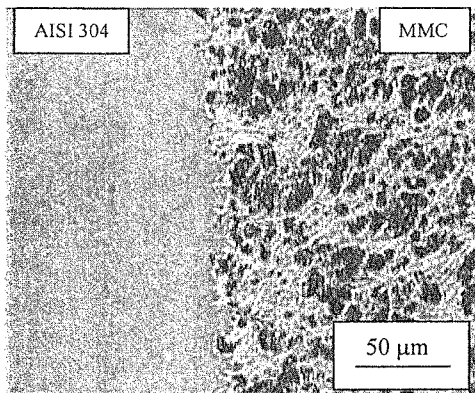
	UTS(MPa)	Y.S(MPa)	EI%	E(GPa)	ν
MMC	۳۲۲	۲۹۰	۷/۹	۸۱/۴	۰/۳۳۲
AISI304	۶۹۸	۳۳۳	۶۹	۱۹۶	۰/۳

جدول (۳) مشخصات حرارتی MMC و فولاد زنگ نزن AISI304.

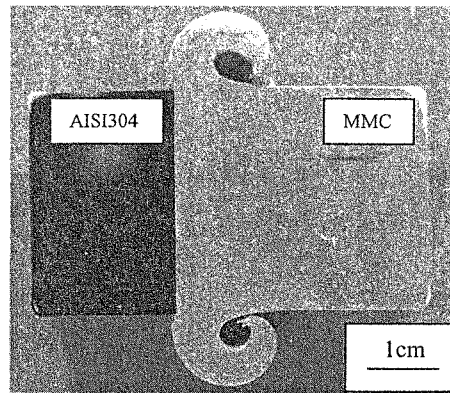
	$K(\text{W}/\text{mm}^{\circ}\text{C})$	$\rho c (\text{J}/\text{mm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$	$a (\text{mm}^2/\text{s})$	$T_m(^{\circ}\text{C})$
MMC	۰/۱۶۷	۰/۰۰۲۴	۷۵	۶۵۲
AISI304	۰/۰۱۶۲	۰/۰۰۴	۴/۰۵	۱۴۰۰-۱۴۵۰



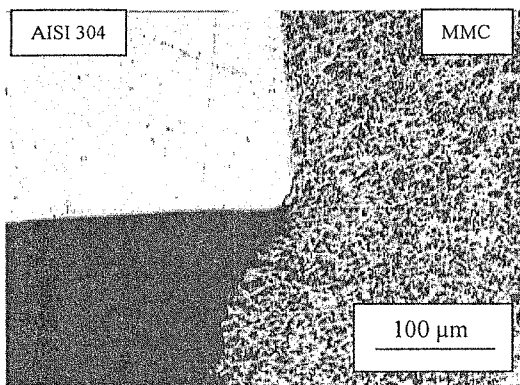
شکل (۱) نمونه آزمایش کشش گرد (واحدها mm).



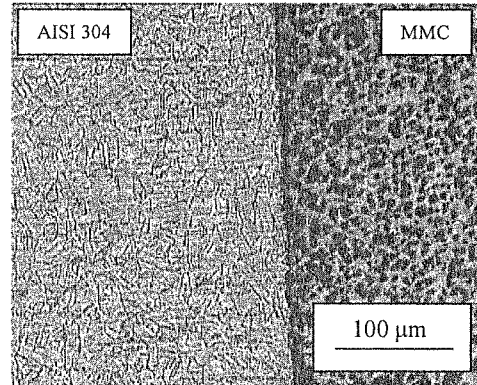
(ب)



(الف)

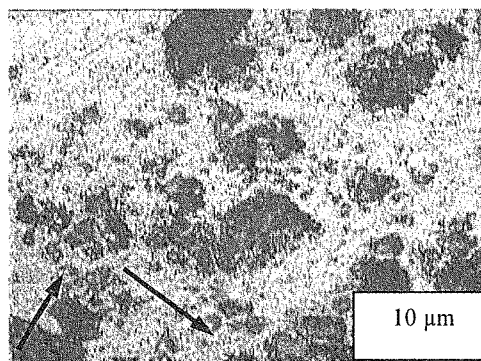


(د)

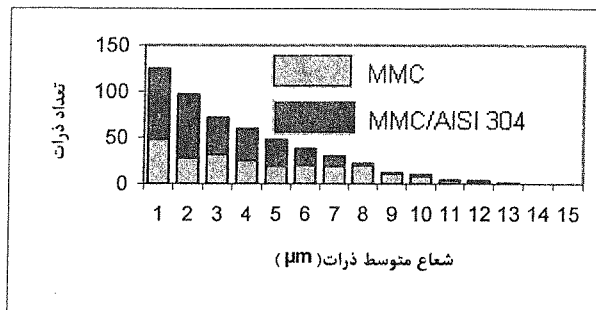


(ج)

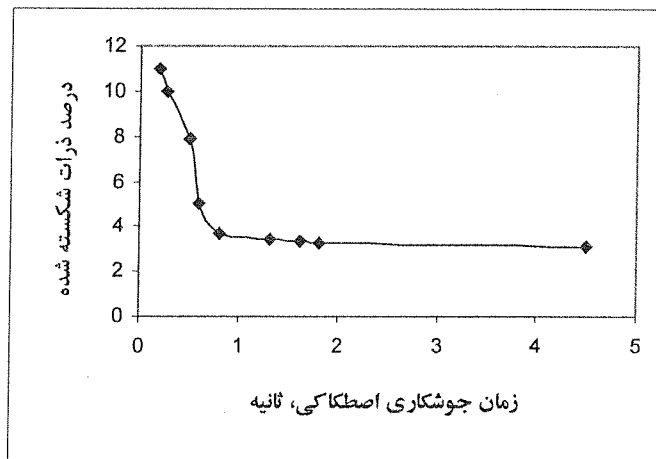
شکل (۲) الف - تصویر ماکروسکوپی جوش اصطکاکی MMC / AISI 304، ب - ساختار میکروسکوپی نمونه اچ نشده، ج - ساختار میکروسکوپی نمونه اچ شده و د - ساختار میکروسکوپی قسمت بیرون زدگی. (فشار اصطکاکی ۱۲۰MPa، زمان اصطکاک ۴ ثانیه و فشار فورج ۲۴۰MPa، زمان فورج ۱ ثانیه و سرعت چرخش ۱۵۰۰ rpm)



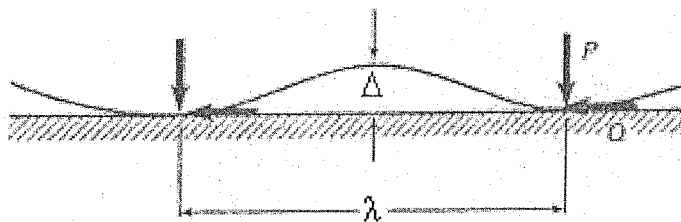
شکل (۳) شکست ذرات مجاور فصل مشترک در اتصال فولاد زنگ نزن MMC/AISI304.



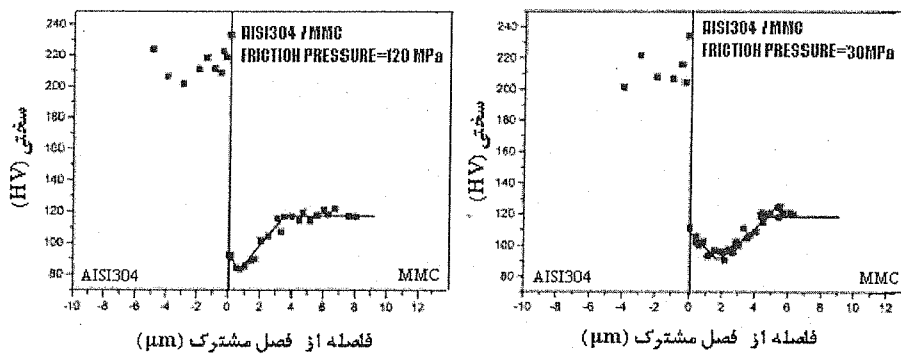
شکل (۴) تأثیر اتصال اصطکاکی بر تعداد و اندازه ذرات در جوشکاری اصطکاکی MMC / AISI 304 (فشار اصطکاکی ۱۲۰ MPa، فشار فورج ۲۴۰ MPa، زمان اصطکاک ۴ ثانیه و زمان فورج ۱ ثانیه).



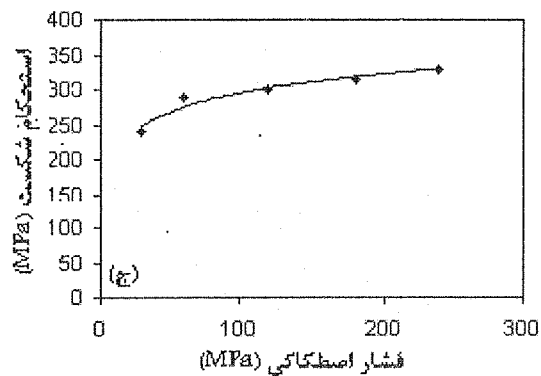
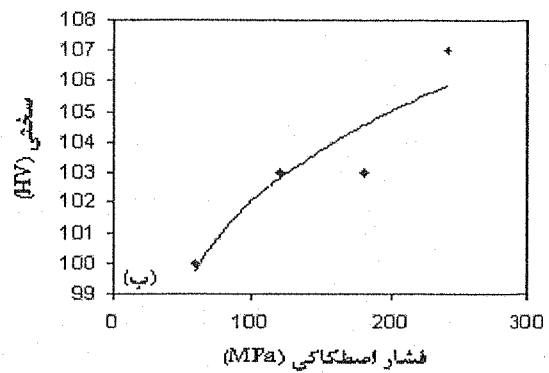
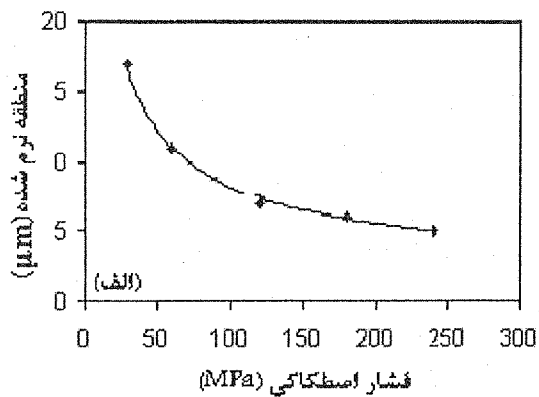
شکل (۵) تأثیر زمان جوشکاری اصطکاکی بر درصد ذرات شکسته شده در اتصالات اصطکاکی MMC / AISI304 (فشار اصطکاکی ۱۲۰ MPa).



شکل (۶) مدل سطح موج دار منظم [۵].



شکل (۷) نمودار سختی بر حسب فاصله از فصل مشترک اتصال (فشار فورج ۲۴۰ MPa، زمان اصطکاک ۴ ثانیه و زمان فورج ۱ ثانیه).



شکل (۸) نمودارهای تغییرات الف - منطقه نرم شده، ب - سختی ویکرز، ج - استحکام کششی، بر حسب فشار اصطکاکی ۲۴۰ و زمان فورج ۱ ثانیه. (MPa) زمان اصطکاک ۴ ثانیه، فشار فورج

مراجع

- [1] C.PAN, L.HU and Z.L, T.H.NORTH, Journal of Materials Science, Vol.31, 1996, pp.3667-3674.
- [2] I.A.CHERNEKO, Welding Research International, 7, 1989, p.586-570.
- [3] N.B.SADA and A.S.BAHRANI, Welding Institute, UK, 1981, pp.38-46.
- [4] T.J.JESSOP and W.O.DINSDALE, Proceedings of the Conference "Advances in Welding Processes", Welding Institute, Harrogate, UK, 1978, pp.23-36.
- [5] C.MALDONADO, T.H.NORTH, Journal of Materials Science, Vol.32, 1997, pp.4739-4748.
- [6] G.M.BEDFORD and J.BOUSTED, Journal of Materials Science, 13, 1978, p. 253-257.
- [7] Y.ZHOU, J.ZHANG, T.H.NORTH, Z.WANG, Journal of Materials Science, Vol.32, 1997, pp.3883-3889.
- [8] M.SHAMANIAN, M.SALEHI, A.SAATCHI and T.H.NORTH, , Materials and Manufacturing Processes, Vol.18, No.4, 2003, pp.581-598.
- [9] N.P.SUH, Tribophysics, New Jersey, Prentice-Hall, 1986.