

# عوامل موثر بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت زمینه فلزی Al6061/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

صاحبعلی منافی، جواد عباس نژاد متی کلایی

گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود

چکیده:

در این تحقیق، به بررسی عوامل موثر بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) در ماده کامپوزیتی آلومینیومی تقویت شده با ذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به صورت پرداخته شده است. ماده کامپوزیتی Al6061/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به روش تولید حالت مایع و جوش اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از دستگاه فرز انجام شده است که به منظور ارزیابی محل جوش از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شده است. مقاومت محل جوش با استفاده از آزمون کشش و خمش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمون کشش، نشان دهنده مقاومت بالای محل جوش نسبت به قطعه مورد نظر می باشد. نتایج آزمون خمش نشان دهنده مقاومت مرکز جوش نسبت به دیگر نواحی جوش می باشد که ناشی از عواملی همچون تجمع ذرات در مرکز جوش می باشد. سختی سنجی محل جوش نیز با استفاده از آزمون سختی سنجی ماکرو به روش ویکرز انجام شده است. با توجه به نتایج آزمون های انجام شده بر روی محل جوش، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام شده دارای کیفیت بالایی می باشد.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، کامپوزیت Al6061/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، آزمون کشش، آزمون سختی سنجی

## ۱- مقدمه

کامپوزیت های پایه فلزی آلومینیومی تقویت شده با ذرات سرامیکی توسط فرآیندهای ذوبکاری به یکدیگر اتصال داده می شوند [۱]. اگر چه روش های جوشکاری ذوبی سنتی به این گونه مواد آسیب می رساند که ناشی از انبساط حرارتی و هدایت گرمایی بالا، ترکیب بالای گاز در حالت مذاب و ایجاد ترک ناشی از ذرات اکسید می باشد. وجود ذرات سرامیکی نیز باعث ایجاد مشکلاتی در جوشکاری می گردد که می توان به بالا بردن ویسکوزیته مذاب، وجود تنش های پسماند به خاطر ضریب انبساط حرارتی متفاوت و جدایش ذرات در هنگام سرد شدن اشاره کرد. روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک روش اتصال جدید می باشد که در سال ۱۹۹۱ در موسسه جوشکاری توسعه پیدا کرد و تا به حال به شدت مورد توجه قرار گرفته است [۲-۵]. در این روش جوشکاری، عضوی شبیه به پین با چرخش و حرکت در راستای طولی محل اتصال موجب می شود که دو لبه آلومینیوم در محل اتصال گرم و ذوب گردد و جوش مورد نظر بین دو لبه کامپوزیت آلومینیوم تقویت شده ایجاد گردد. مهم ترین عوامل تعیین کننده در این نوع جوشکاری شامل سرعت چرخش پین، ابعاد پین، سرعت حرکت طولی پین و میزان نیروی فشاری جهت نگهداشتن دو قطعه در کنار هم می باشد. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در ابتدا برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده قرار می گرفت اما در سال های بعد برای مواد دیگر از جمله آلومینیوم های تقویت شده با ذرات سرامیکی مورد استفاده گرفت [۶-۹] که تنها عیب آن آسیب رسیدن به پین می گردد که ناشی از زبری و اصطکاک ایجاد شده بین آلومینیوم تقویت شده و پین در حال گردش می باشد [۱۰]. البته در این روش مشکلات قبلی مانند ایجاد چین خوردگی و چروک در محل جوش بوجود نمی آید. در سال ۲۰۰۹، الانگون و همکارانش با استفاده از یک مدل ریاضی، به بررسی مقاومت یک جوش ایجاد شده به روش اصطکاکی اغتشاشی پرداختند و در مدل مورد نظر عوامل تاثیرگذار در مقاومت جوش را به کار گرفتند [۱۱] و در سال های بعد نیز در زمینه تخمین

مقاومت اتصال، سختی و خوردگی به روش جوشکاری اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲]. یکی دیگر عوامل موثر بر میکروساختار و خواص مکانیکی جوش اصطکاکی اغتشاشی، سرعت چرخش و اصطکاک موجود بین پین در حال چرخش و آلیاژهای آلومینیوم در جوشکاری می‌باشد که مورد توجه محققین قرار گرفته است [۱۳-۱۴]. در سال ۲۰۱۴ کومار و موروگان به بهینه سازی عوامل موثر بر مقاومت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در کامپوزیت AA6061-T6/AlN<sub>p</sub> پرداختند [۱۵]. در این پژوهش کامپوزیت مورد استفاده از روش حالت مایع تولید شده اند در ابتدا شمش آلومینیوم ۶۰۶۱ ذوب را در کوره قوس ذوب کرده و سپس پس از رسیدن به درجه حرارت مد نظر پودر آلومینا را از طریق گاز آرگون به درون مذاب تزریق کرده. به منظور جوشکاری از دستگاه فرز استفاده کرده، به این ترتیب که نیروی لازم برای اصطکاک را از دستگاه فرز تامین کرده و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام گرفته است. به منظور بررسی مقاومت جوش، آزمون‌های مختلفی همچون آزمون کشش و آزمون خمش بر روی محل جوش انجام می‌شود. به منظور سختی سنجی سطح جوش نیز آزمون سختی سنجی به روش ویکرز انجام شده است.

## ۲- روش انجام تحقیق

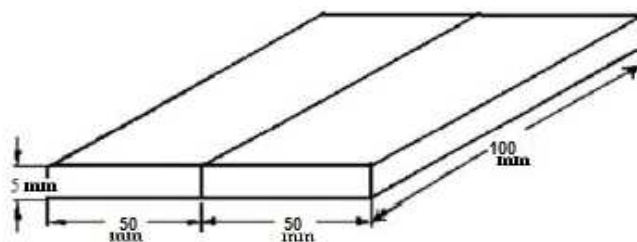
### ۲-۱- مواد اولیه و ابعاد هندسی

آلومینیوم به کار گرفته شده در این تحقیق از گروه ۶۰۰۰ و شمش آلومینیومی ۶۰۶۱ بوده است که میزان ترکیبات شیمیایی به کار گرفته شده شمش مورد نظر در جدول ۱ نشان داده شده است. آلومینای مورد استفاده با مش بندی ۴ میکرون و به مقدار ۱۵ درصد وزنی بوده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی شمش آلومینیومی ۶۰۶۱ [۱۶]

Si	Fe	Cu	Mu	Mg	Zn	Ti	Cr
۰/۱۶۵	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۱۰	۰/۹۷	۰/۰۰۹	۰/۰۲	۰/۱۹

ابعاد در نظر گرفته شده برای ورق‌های آلومینیومی تقویت شده با آلومینا برابر با  $100 \times 50 \times 5$  (mm<sup>3</sup>) می‌باشد که دارای ضخامت ۵ (mm) می‌باشد و به صورت ریختگی تهیه شده است. شماتیکی از ابعاد نمونه و نحوه قرار گرفتن آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نحوه قرار گرفتن نمونه‌ها و ابعاد هندسی در نظر گرفته شده

### ۲-۲- ساخت کامپوزیت Al6061-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به روش تولید حالت مایع و روش همزدن

به منظور ساخت کامپوزیت Al6061-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، ابتدا اکسید آلومینیوم را به منظور رطوبت‌زدایی حرارت داده می‌شود تا از گرانول شدن اکسید در داخل مذاب جلوگیری شود. سپس با تنظیم دمای کوره بر ۷۵۰ درجه سانتیگراد، شمش آلومینیومی را درون کوره قرار داده می‌شود. پس رسیدن دمای آلومینیوم به ۷۵۰ درجه سانتیگراد، اکسید مورد نظر را در داخل نازل ریخته شده و انتهای نازل را به کپسول گاز آرگون وصل می‌شود و انتهای دیگر نازل در داخل مذاب قرار می‌دهیم، سپس در حین همزدن مذاب توسط همزن ذرات اکسید آلومینیوم را به وسیله گاز به داخل مذاب تزریق می‌کنیم. پس از تزریق، اکسید مذاب را در داخل درجه تخلیه کرده و کامپوزیت مد نظر حاصل می‌شود.

## ۳-۲- جوشکاری کامپوزیت تولید شده

در این پژوهش جهت انجام جوشکاری از دستگاه فرز مدل FP4M استفاده شده است. پس از اطمینان از تمیز بودن محل اتصال، پین مورد نظر را در جای خود قرار داده و قطعه را با استفاده از گیره دستگاه محکم می‌کنیم. مشخصات پین مورد استفاده در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- مشخصات پین مورد استفاده

جنس پین	ارتفاع پین (mm)	قطر پین (mm)	قطر شولدر (mm)
فولاد H-13	۱۰۰	۲۵	۲۲

در این پژوهش با توجه به اثر سرعت دوران و پیشروی ابزار بر منطقه جوش از لحاظ ظاهری و خواص مکانیکی و فیزیکی، سرعت پیشروی به صورت ثابت و برابر با ۸ mm/min و سرعت دوران ابزار برابر ۱۰۰۰ rpm در نظر گرفته شده است [۱۶]. نمونه‌هایی از قطعات جوشکاری شده در شکل ۲ نشان داده شده است.



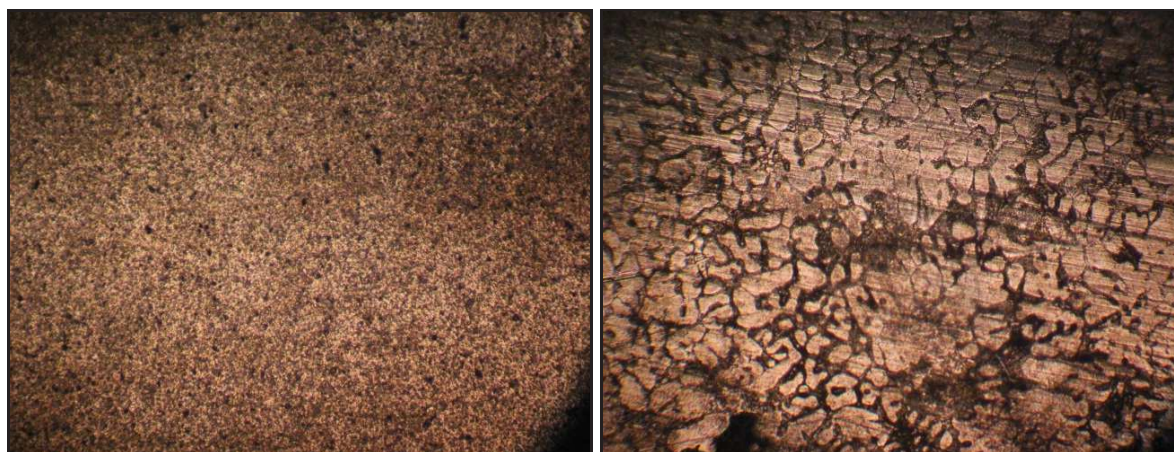
الف ب

شکل ۲- الف و ب نمونه‌ای از قطعات جوشکاری شده

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- ارزیابی ریز ساختاری

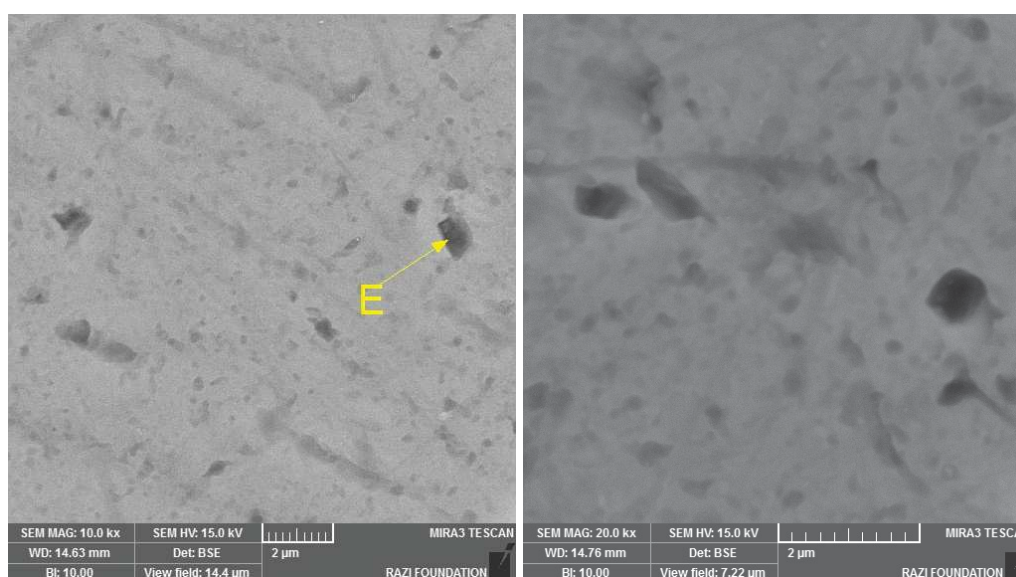
برای مشاهده ریز ساختار و بررسی چگونگی توزیع ذرات تقویت کننده در منطقه اغتشاش، از میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است. تصاویر SEM و میکروسکوپ نوری جوش بدست آمده نشان می‌دهد که در ناحیه مرکزی جوش به سبب اغتشاش ناشی از چرخش ابزار و سطح کار، دما نسبت به دیگر نواحی افزایش یافته و شرایط برای انحلال ذرات آلومینا فراهم شده است. با توجه به وجود شرایط تبلور مجدد، در این ناحیه دانه‌های جدید با اندازه بسیار ریزتر از دانه‌های فلز پایه متبلور می‌شوند که باعث توزیع همگن ذرات تقویت کننده در زمینه شده است، در شکل ۳ و شکل ۴ نشان داده شده است. سچینی و فرناندز به همراه همکارانشان [۱۷-۱۸] نیز در گذشته نشان داده بودند که در ناحیه جوش به علت افزایش دما نسبت به دیگر نواحی و به وجود آمدن تبلور مجدد شرایط برای انحلال ذرات آلومینا فراهم شده است



ب

الف

شکل ۳- توزیع ذرات آلومینا در زمینه آلومینیومی (الف) قبل از جوش (ب) بعد از جوش



ب

الف

شکل ۴- الف و ب تصاویر SEM از کامپوزیت تهیه شده بعد از جوشکاری

### ۳-۲- خواص مکانیکی

جهت بررسی سختی سنجی نیز، آزمون سختی سنجی به روش ویکرز (VH) طبق استاندارد ISO 65075-1(2005) انجام شده است. آزمون سختی از مرکز جوش تا فاصله ۱۰ (mm) در دو طرف جوش اندازه گیری شده است، که سختی دوطرف جوش برابر ۴۵ VH و سختی در مرکز جوش برابر با ۶۲ VH بدست آمده است که ناشی از اندازه دانه، کارسختی باقیمانده، دانسیته بالای ذرات آلومینا بر اثر تبلور مجدد در ناحیه مرکزی جوش اتفاق افتاده است. ساتو [۱۹] نیز در گذشته نشان داده بود که کمترین ناحیه سختی در مرکز ناحیه جوش قرار ندارد بلکه در ۱۰ (mm) از مرکز جوش واقع است. آزمون کشش عرضی و خمش نیز از نوارهای جوشکاری شده، مطابق استاندارد ASME SEC IX در دمای محیط انجام شده است. آزمون خمش شکست در زاویه ۱۸۰ درجه را نشان داده است که ناشی از تنش‌های باقیمانده در منطقه جوش می‌باشد. جمیز و همکارانش [۲۰] با انجام عملیات حرارتی می‌توان تنش‌های باقیمانده را کاهش داد. در آزمون کشش انجام شده، نمونه در باری برابر با ۹۷۰۰ (KN) از ناحیه فلز پایه، دچار شکست شده است. تحت آزمون کشش منطقه جوش کمی دچار کشش می‌گردد اما گلوبی شدن و شکست در فلز پایه اتفاق افتاده که خود این امر نشان دهند کیفیت جوش می‌باشد.

## ۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج میکروسکوپ الکترونی (SEM)، ذرات اکسید آلومینیوم به طور یکنواخت در نمونه پخش شده است. نتایج مربوط به آزمون سختی که به روش ویکرز نیز انجام شده است، نشان دهنده که سختی بیشتر مرکز جوش نسبت به اطراف جوش می باشد که ناشی از تجمع ذرات اکسید و ریزتر شدن آن ها می باشد. نمونه مورد نظر، تحت آزمون خمش نیز گرفته شده است که در این آزمون شکست در محل جوش اتفاق افتاده است. عامل اصلی شکست جوش در آزمون خمش، وجود تنش های باقیمانده در محل جوش می باشد که می توان از عملیات حرارتی جهت کاهش تنش های پسماند استفاده کرد و مقاومت جوش را افزایش داد. علاوه بر سختی سنجی و آزمون خمش، آزمون کشش نیز انجام شده است. شکست آزمون کشش در محلی خارج از ناحیه جوش رخ داده است که نشان دهنده کیفیت بالای جوش می باشد بنابراین روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روش مناسبی جهت اتصال کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات آلومینا می باشد.

## مراجع

- [1] Ellis, M.B.D, Joining of aluminium based metal matrix composites. International Materials Reviews, 41 (1996), pp.41-58.
- [2] Miles, M.P., B.J. Decker and T.W. Nelson, Formability and Strength of Friction-Stir-Welded Aluminum Sheets. Metallurgical and Materials Transactions A, 35 (2004), pp.3461-3468.
- [3] Thomas, W.M. et al. Friction Stir Butt Welding. International Patent Appl. No.PCT/GB92/02203 and GB Patent Appl. No. 9125978.8, U.S. Patent No. 5460, 317 (1991).
- [4] Dawes, C. and Thomas W. TWI Bulletin 6 (1995), p.124.
- [5] Ellis, M. and M. Strangwood. TWI Bulletin 6 (1995), p.138.
- [6] Gould, J. E., Z. Feng and P. Ditzel. Preliminary modeling of the friction stir welding process. Proceedings of ICAWT, EWI, Columbus, (1996), pp.297-310.
- [7] Mishra R.S., Z.Y. Ma Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering R 50, (2005) pp. 1-78.
- [8] Marzoli, L., A. Von Stombeck, J.F. Dos Santos, C. Gambaro, M.L. Volpone and E. Rizzuto. Giunzioni di Al-CMM mediante Friction Stir Welding: influenza sulla distribuzione e sulle dimensioni delle particelle della fase dispersa. 29° Convegno Nazionale AIM, Modena, Novembre, 2002.
- [9] Fernandez, G.J. and L.E. Murr. Characterization of tool wear and weld optimization in the friction-stir welding of cast aluminium 359+20% SiC metal-matrix composite. Mat Charact, 52 (2004), pp. 65-75.
- [10] Wert, J.A. Microstructures of friction stir weld joints between an aluminium-base metal matrix composite and a monolithic aluminium alloy. Scripta Mat, 49 (2003), p. 607.
- [11] Elangovan, K. Balasubramanian, V. Babu, S. Predicting tensile strength of friction stir welded AA6061 aluminium alloy joints by a mathematical model, Materials and Design, 30 (2009), PP 188-193.
- [12] Rajakumar, S. Muralidharan, C. Balasubramanian, V. Predicting tensile strength, hardness and corrosion rate of friction stir welded AA6061-T6 aluminium alloy joints, Materials and Design, 32 (2011), pp 2878-2890.
- [13] Liu, H.J. Hou, J.C. Guo, H. Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy, Materials and Design, 50 (2013), pp872-878.
- [14] Dinaharan. I, Murugan. N, Effect of friction stir welding on microstructure, mechanical and wear properties of AA6061/ZrB2 in situ cast composites, Materials Science and Engineering A, 543 (2012), pp 257-266.
- [15] Ashok Kumar. B, Murugan. N, Optimization of friction stir welding process parameters to maximize tensile strength of stir cast AA6061-T6/AlNp composite, Materials and Design, 55 (2014), pp 176-182.
- [16] Marzoli, L. M. Strombeck, A. v. Dos Santos, J. F. Gambaro, C and Volpone L.M, Friction stir welding of an AA6061/Al2O3/20p reinforced alloy. Composites Science and Technology, 66 (2006), pp 363-371.
- [17] Ceschini, L. Boromei, I. Minak, G. Morri, A and Tarterini F.a, Effect of friction stir welding on microstructure, tensile and fatigue properties of the AA7005/10 vol.%Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub> composite, Composites Science and Technology, 67 (2004), pp 605-615.
- [18] Fernandez, G.J and Murr L.E, Characterization of tool wear and weld optimization in the friction-stir welding of cast aluminum 359+20% SiC metal-matrix composite, Materials Characterization, 52 (2004), pp 65-75.
- [19] Sato Y. S., Kokawa, H. Enmoto, M and Jogan S, Precipitation sequence in friction stir weld of 6063 aluminum during aging, 30(1999), pp 3125-3130.
- [20] James M and Mahoney M., Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding "CA, USA, June 14-16, 1999.