

## تقویت کامپوزیت زمینه آلومینیومی با الیاف فولادی به روش جوشکاری انفجاری

مریم رودباری<sup>۱\*</sup>، نیما رفاهتی<sup>۲</sup>، علی مهدی پور عمرانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند

۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند

۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

\*Maryam.roudbari@yahoo.com

ارسال: مهر ماه ۹۸ پذیرش: مهر ماه ۹۸

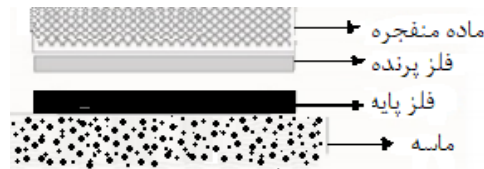
### چکیده

یکی از روش های نوین در تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی روش جوشکاری انفجاری می باشد. جوشکاری انفجاری یک فرآیند حالت جامد است که در آن از انرژی انفجار برای اتصال دو یا چند ماده با هم تحت فشار بالا استفاده می شود. در این تحقیق، صفحات آلومینیوم ۱۰۵۰ به روش جوشکاری انفجاری با الیاف فولادی تقویت شده اند. الیاف فولادی در چیدمان بین دو صفحه آلومینیومی قرار گرفته و با انجام فرآیند جوشکاری انفجاری اتصال صفحات و الیاف تقویت کننده ایجاد گردید. عوامل مختلفی بر روی اتصال قابل قبول تاثیر دارد. در این مقاله با استفاده از رسم پنجره جوشکاری پارامترهای مناسب فرآیند تعیین شده و چیدمان فرآیند جوشکاری انفجاری طراحی گردید. قطعات تولید شده با استفاده از این فرآیند مورد بررسی توسط میکروسکوپ نوری قرار گرفتند نتایج نشان داد با استفاده از این فرآیند می توان آلیاژهای مختلف آلومینیوم با تقویت کننده فولادی تهیه نمود.

کلمات کلیدی: کامپوزیت زمینه آلومینیومی، جوشکاری انفجاری، تقویت کننده فولادی، متالوگرافی.

### ۱- مقدمه

جوشکاری انفجاری عمدتاً برای تولید فلزات لمینیت به شکل ورق، میله یا لوله به منظور بهبود خواص خوردگی و یا مقاومت به سایش، هدایت حرارتی و غیره مورد استفاده قرار می گیرند. [۱] جوشکاری انفجاری فرآیند حالت جامد می باشد که با استفاده از انفجار ماده منفجره، صفحه پرنده در فاصله معینی شتاب گرفته و به صفحه پایه برخورد نموده و اتصال ایجاد می شود. [۲] سیستم آرایش تنظیمی موازی در فرآیند جوشکاری انفجاری در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- آرایش موازی در فرآیند جوشکاری انفجاری [۳]

جوشکاری انفجاری شامل پارامترهای زیادی است که در حین انجام فرآیند قابل کنترل نیستند و برای رسیدن به یک اتصال قابل قبول، بایستی پارامترها قبل از انجام فرآیند تا حد امکان به صورت بهینه انتخاب گردند. یکی از ابزارهای مفید، به منظور تعیین مقادیر بهینه پارامترها، استفاده از روش عددی، اجزا محدود است که در کاهش میزان آزمون و خطا و تعیین مقدار تقریبی پارامترها و به طور کلی طراحی سیستم جوشکاری انفجاری بسیار موثر است. [۴] جوشکاری انفجاری برای اولین بار در جنگ جهانی در اتصال پوسته جداره توپ ها به بدنه اصلی استفاده شده است. [۵،۶] همچنین در ابتدای دهه ۱۹۶۰ میلادی این روش به صورت صنعتی توسط شرکت دو پنت ۱ آمریکا برای اتصال مواد مختلف به یکدیگر مورد استفاده قرار گرفته است. [۷،۸]

جوشکاری انفجاری تنها برای انواع فلزات محدود نمی شود. [۹] با استفاده از فرآیند جوشکاری انفجاری فلزات به صورت لمینیت چند لایه به یکدیگر اتصال پیدا کرده اند. [۱۰] تکنیک جوشکاری انفجاری برای ساخت کامپوزیت پایه آلومینیومی که با الیاف مسی تقویت شده اند، مورد استفاده قرار گرفته است. [۱۱] در فرآیند جوشکاری انفجاری با استفاده از روابط قابل قبول، پنجره جوشکاری مناسبی برای اتصال ورقهای فلزی رسم نموده و سپس فرآیند جوشکاری انفجاری انجام شده است. [۱۲]

در این تحقیق با استفاده از پنجره جوشکاری و اطلاعات موجود درباره تکنولوژی جوشکاری انفجاری، پارامترهای بهینه فرآیند جهت تولید کامپوزیت پایه آلومینیومی به دست آمده. پس از تعیین پارامترهای موثر بر فرآیند، قطعات مورد نیاز جهت انجام تستهای انفجاری تهیه شده و با انجام تست نمونه تولید شده و مورد بررسی قرار خواهند گرفت. فلزات استفاده شده در این تحقیق سیم فولادی و آلومینیوم است این دو فلز به راحتی قابل دسترس هستند و با ترکیب آنها می توان یک کامپوزیت پایه آلومینیومی که با الیاف فولادی تقویت شده اند به دست آورد. هدف از این مقاله تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با الیاف فولادی است. خواص مکانیکی این صفحات و الیاف در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی فلزات مورد استفاده [۱۳]

ماد	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	سختی (H <sub>v</sub> )	ضریب پواسون	مدول یانگ (GPa)
AL1050	۲۷۱۰	۳۰	۰/۳۳	۶۹
Steel 1006	۷۸۷۲	۹۸	۰/۲۹	۲۰۶

## ۲- رسم پنجره جوشکاری

پنجره جوشکاری به وسیله تعدادی مرز محدود شده است که در این محدوده از مرزها، جوش پذیری قابل قبول ارائه شده است. پارامترهای بحرانی که می بایست جهت ایجاد پنجره جوشکاری در نظر گرفته شود عبارتند از: [۱۳]

- زاویه دینامیکی برخورد  $\beta$  جهت ایجاد جت و شکل امواج
- سرعت پیشروی نقطه برخورد  $V_c$  جهت تشکیل امواج و نیز ایجاد جوش
- انرژی جنبشی و فشار برخورد که متناسب با سرعت برخورد است.

<sup>1</sup> - two pent

در این مقاله تمامی این پارامترها را در دو محور مختصات بر حسب  $V_c$  و  $\beta$  رسم شده است که در شکل (۲) قابل مشاهده می‌باشد. اولین محدوده مربوط به حداقل زاویه دینامیک برخورد است که با توجه به اطلاعات جدول (۱) و رابطه (۱) برای فلزات مورد اتصال رسم شده است. [۱۴] که در رابطه (۱)  $k$  یک ضریب ثابت است که برای سطوح با کیفیت بالا ۰/۶ برای سطوح با کیفیت پایین ۱/۲ و در حالت معمول ۰/۸۵ در نظر گرفته شده است. [۱۴]

$$\beta_{\min} = k \left[ \frac{H_v}{\rho V_c^2} \right]^{1/2} \quad (1)$$

از نظر هندسی حداقل زاویه ای وجود دارد که در کمتر از آن امکان تشکیل اتصال وجود ندارد. همچنین در زوایای بسیار بالای دینامیکی برخورد ممکن است فشار لازم برای ایجاد اتصال فراهم نشود. براساس پیشنهاد کراسلند<sup>۱</sup> و بهرانی<sup>۲</sup> حداکثر زاویه برخورد برای ایجاد اتصال برابر ۳۱ درجه و حداقل ۲ درجه بیان شده که از این پیشنهاد برای رسم پنجره جوشکاری استفاده شده است. [۱۵] برای به دست آوردن مرز بالای پنجره جوشکاری یا حداکثر زاویه برخورد از رابطه تجربی دریباس<sup>۳</sup> برای این مرز استفاده شده است. این منحنی مرز ماکزیمم سرعت فلز پرنده را مشخص می‌کند که فراتر از آن بواسطه افزایش انرژی ضربه، عیوبی نظیر تشکیل نواحی مذاب و ... در فصل مشترک بروز خواهد کرد [۱۶]

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{K_3}{(t^{0.25} \cdot V_c^{1.25})} \quad (2)$$

که در رابطه (۲)  $K_3$  مربوط به خواص مکانیکی صفحه پرنده و  $t$  ضخامت صفحه پرنده است، که  $K_3$  از رابطه (۳) به دست می‌آید که در آن  $E$  مدول یانگ صفحه پرنده،  $\rho$  چگالی صفحه پرنده است [۱۶].

$$k_3 = \left[ \frac{E}{12\rho(1-2\nu)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

مرز سمت راست پنجره جوشکاری حد فاصل تشکیل و عدم تشکیل جت است به عبارتی با عبور از این خط دیگر پدیده تشکیل جت را نخواهیم داشت. ۱/۲ برابر سرعت صوت فلز در نظر گرفته شده است. [۱۵]  
مرز سمت چپ پنجره جوشکاری که حداقل سرعت پیشروی نقطه جوش است که در این سرعت فصل مشترک از حالت صاف به موجی تغییر پیدا می‌کند و از رابطه (۴) به دست می‌آید، که در این رابطه عدد ۱۰.۶ به عنوان عدد رینولدز استفاده شده است و خواص صفحه پرنده و صفحه مادر در رابطه (۴) جایگزین شده است. [۴]

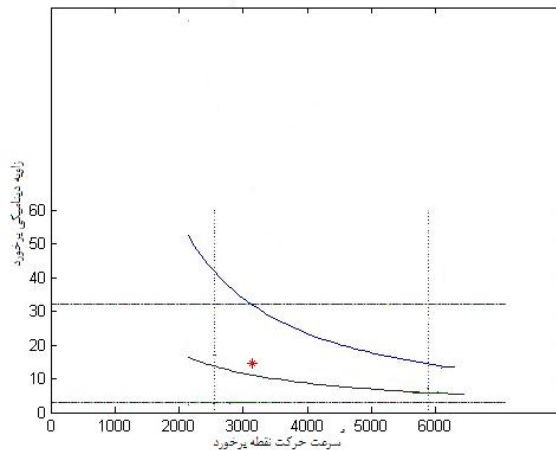
$$Re = \frac{(\rho_f + \rho_p)V_c^2}{2(H_f + H_p)} \quad (4)$$

پنجره جوشکاری انفجاری ما بین صفحات آلومینیومی در شکل (۲) نشان داده شده است.

1 - Crossland

2 -Bahrani

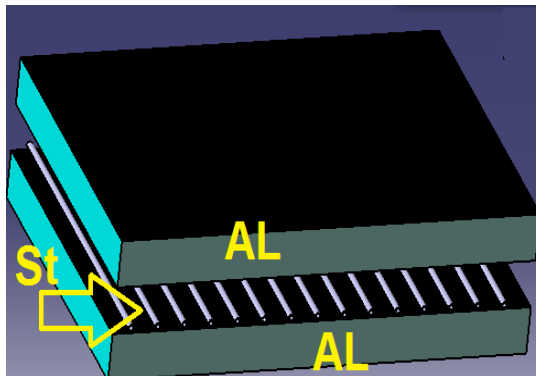
3 -Deribas



شکل ۲- پنجره جوشکاری انفجاری ما بین صفحات آلومینیومی ۱۰۵۰

### ۳- چیدمان تست تجربی

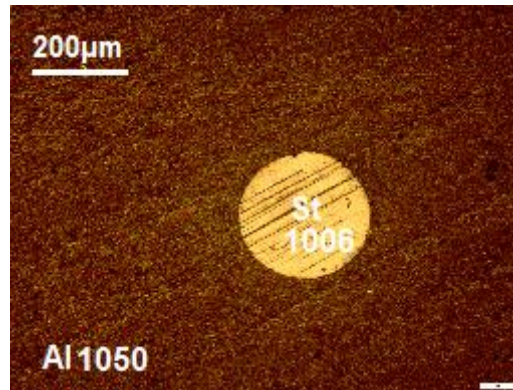
صفحه های آلومینیوم ۱۰۵۰ به عنوان صفحات پرنده و مادر در نظر گرفته شده است و از سیمهای فولادی به عنوان تقویت کننده در این صفحات استفاده شده است. صفحات ابتدا به ابعاد  $۲۵۰ \times ۲۵۰ \times ۴$  میلیمتر برشکاری شده اند سطوح این صفحات پولیش و پرداخت شده اند تا کاملا تمیز و عاری از هر گونه آلودگی سطحی باشند. صفحات با استون شستشو داده شده است. از ماده منفجره آنفو جهت انجام آزمون استفاده شده است و در داخل یک جعبه با ابعاد مناسب در بالای صفحه پرنده بدون فاصله مستقر گردیده است. شکل (۳) مدل سه بعدی مورد نظر از نحوه چیدمان ورقها برای تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی تحت زوایای صفر درجه را نشان داده است. کل مجموعه جهت انجام آزمون انفجاری بر روی بستری از شن نرم قرار گرفت و آغازگری ماده منفجره با استفاده از چاشنی الکتریکی انجام شده است. با توجه به پارامترهای بهینه به دست آمده این آزمون، انجام گرفته است.



شکل ۳- مدل سه بعدی از چیدمان اولیه صفحات تحت زاویه صفر درجه

### ۴- نتایج

با انجام آزمونهای انفجاری نمونه های کامپوزیت به ابعاد  $۲۵۰ \times ۲۵۰$  به ضخامت ۸ میلیمتر تهیه شده برای بررسی خواص نمونه ها، نمونه ساخته شده ابتدا با استفاده از دستگاه نورد صاف شده و بخش هایی از آن برای بررسی اتصال زمینه آلومینیوم به الیاف فولادی تحت فرآیند متالوگرافی با استفاده از میکروسکوپ نوری قرار گرفت. در تصویر (۴) اتصال آلومینیوم به الیاف فولادی با بزرگنمایی ۲۰۰ نشان داده شده است.



شکل ۴- تصاویر متالوگرافی نوری از مقطع فولادی در زمینه آلومینیومی

نتایج بررسی ها توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۲۰۰ از اتصال صفحات آلومینیوم و الیافهای فولادی در شکل نشان داده شده است. در نمونه در قسمت وسط که به صورت دایره ای شکل با تصاویر روشن، مقطع رشته فولادی نشان داده شده است و در قسمت اطراف آن که تیره تر است آلومینیوم قرار گرفته است. به علت انتخاب صحیح پارامترهای جوشکاری، حفره یا منطقه ذوب و یا ترک در فصل مشترک مشاهده نشده است و به دلیل نفوذ در یکدیگر، هیچ نوع گسستگی مشاهده نمی شود. با توجه به اتصال آلومینیوم/آلومینیوم فصل مشترک در تصویر مشترک نوری به وضوح مشخص نیست. همانطور که تصویر نشان می دهد در آزمونهای اتصال بین صفحات و الیافهای فولادی ایجاد شده است. از نتایج تحقیق گولنک و همکارانش که بر روی کامپوزیت پایه آلومینیومی که با الیاف فولادی به زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه تقویت شده اند استفاده شده است. [۱۷]

#### ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق اتصال موفق زمینه آلومینیومی ۱۰۵۰ به سیم فولادی ۱۰۰۶ با استفاده از فرآیند جوشکاری انفجاری انجام پذیرفته و تصاویر میکروسکوپ نوری نیز موید اتصال کامل بین آلومینیوم و فولاد است. نتایج حل تحلیلی و آزمونهای تجربی با یکدیگر در تطابق کامل هستند.

#### ۶- مراجع

- Mendes, R. and Ribeiro, J.B. and Loureiro, A. (2013). Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration, *Materials and Design*, 51, 182-192.
- رودباری، م و مهدی پور عمرانی، ع و آذرآفزا، ر. (۱۳۹۲). تاثیر عملیات حرارتی بر روی قطعات دو جنسی تیتانیوم و فولاد زنگ نزن ۳۱۶L تولید شده به روش جوشکاری انفجاری، مجموعه مقالات سیزدهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران، تهران، ایران، ۱۳-۱۵ اسفند.
- Roudbari, M. and Mehdiipoor, A. and Azarafza, R. (2013). Heat treatment of Stainless steel 316L-Titanium Bimetal Manufactured By Explosive Welding, *IRJABS*, 7 (10), 687-692.
- خانزاده قره شیران، م و بختیاری، ح و سیدی، م و احمدی، ح. (۱۳۹۶). شبیه سازی و مطالعه پنجره جوشکاری اتصال سه لایه انفجاری آلومینیوم AA5083-AA1050 به فولاد کربنی، مواد پرانرژی، ۳، ۳۵، ۱۳۹-۱۵۲.
- Patterson, R. (1986). *Fundamentals of Explosion Welding*, ASM Handbook, 16.
- Pocalyko, A. (1987). Fabrication of Explosion-Welded Titanium-Clad Composites, *Welding*, 24-30.
- Nobili, A. and Masri, T. and Lafont, M.C. Recent Development in Characterization of a Titanium-steel Explosion Bond Interface, *Wah Chang*, Albany, 89.
- Cleland, D.B. (1983). Basic Consideration For Commerical Processes. *Explosive Weling ,Forming and Compaction*, 159-183.

9. Xunzhong, G. and Jie, T. and Wentao, W. and Huaguan, L. and Chen, W. (2013). Effects of the inner mould material on the aluminium-316L stainless steel explosive clad pipe, *Materials and Design*, 49, 116–122.
10. Lazurenko, D.V. and Bataev, I.A. and Mali, V.I. and Bataev, A.A. and Maliutina, Iu.N. and Lozhkin, V.S. and Esikov, M.A. and Jorge, A.M.J. (2016). Explosively welded multilayer Ti-Al composites: Structure and transformation during heat treatment, *Materials and Design*, 102, 122–130.
11. Los, I.S. and Khorin, A.V. and Troshkina, E.G. and Guskov, M.S. (2010). Al–Cu composite by explosive welding, in: X International Symposium on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business and Innovations (EPNM-2010), Bechichi, Montenegro, June 7–11, 1–14.
12. Saravanan, S. and Raghukandan, K. (2012). weldability windows for explosive cladding of dissimilar metals. *Advanced materials research*, trans tech publications, Switzerland, (445), 729-734.
13. Yan, Li. and Cuirong, Liu. and Haibo, Yu. and Fei, Zhao. and Zhisheng, Wu. (2017). Numerical Simulation of Ti/Al Bimetal Composite Fabricated by Explosive Welding. *Metals*.
14. Akbari Mousavi, S.A.A. and Al-Hassani, S.T.S. (2008). Finite element simulation of explosively-driven plate impact with application to explosive welding, *Materials and Design*, 29, 1–19.
15. Akbari Mousavi, S.A.A. and Farhadi Sartangi, P. (2009). Experimental investigation of explosive welding of cp- titanium/AISI 304 stainless steel, *Materials and Design*, 195, 459-468.
16. Ribeiro, Jb. and Mendes, R. and Loureiro, A. (2014). Review of the weldability window concept and equations for explosive welding. *Physics Conference series*, May. <https://www.researchgate.net/publication/262343071>.
17. Gülenç, B. and Kaya, Y. and Durgutlu, A. and Gülenç, İ.T. (2016). Production of wire reinforced composite materials through explosive welding, *archives of civil and mechanical engineering*, 16, 1-8.