

شبیه‌سازی، تحلیل و انجام آزمون تجربی تولید کامپوزیت پایه آلومینیومی با تقویت کننده فولادی به روش جوشکاری انفجاری

مریم رودباری^۱، نیما رفاهتی^{۲*}، علی مهدی پور عمرانی^۳

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند ۳- دانشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر
(تاریخ وصول: ۹۸/۲/۳، تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۱۰)

چکیده

کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی به روش‌های مختلفی نظیر اختلاط در حالت مایع، آلیاژسازی مکانیکی و غیره تولید می‌شوند. یکی از روش‌های نوین مورد استفاده در تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی روش جوشکاری انفجاری است. 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 می‌شود. جوشکاری انفجاری روشی قابل قبول برای اتصال فلزات غیر هم جنس است. در این تحقیق، صفحات آلومینیوم ۱۰۵۰ به روش جوشکاری انفجاری با الیاف فولادی تقویت شده‌اند. الیاف فولادی در چیدمان بین دو صفحه آلومینیومی قرار گرفته و با انجام فرآیند جوشکاری انفجاری اتصال صفحات و الیاف تقویت کننده ایجاد شد. عوامل مختلفی مانند فاصله توقف، نوع و مقدار ماده منفجره، زاویه قرارگیری صفحات و ... بر روی اتصال قابل قبول تأثیر دارد. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی و رسم پنجره جوشکاری پارامترهای مناسب فرآیند تعیین شده و چیدمان فرآیند جوشکاری انفجاری طراحی شد. قطعات تولید شده با استفاده از این فرآیند مورد بررسی توسط میکروسکوپ نوری قرار گرفتند نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش بار انفجاری در فاصله توقف ثابت سرعت برخورد و زاویه دینامیکی برخورد افزایش یافته است. نتایج متالوگرافی نشان داد که با انتخاب پارامترهای بهینه به کمک شبیه‌سازی و رسم پنجره جوشکاری، اتصال کامل فاز زمینه و تقویت کننده با استفاده از فرآیند جوشکاری انجام پذیرفته است و هیچ‌گونه حفره و منطقه ذوبی و یا ترک در فصل مشترک بین آلومینیوم و الیاف فولادی به وجود نیامده است.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری انفجاری، کامپوزیت پایه آلومینیومی، پنجره جوشکاری، شبیه‌سازی، بار انفجاری.

Simulation, Analysis and Experimental Investigation of the Production of Aluminum Based Composite Reinforced by Steel Wire via Explosive Welding Method

M. Roudbari, N. Refahati*, A. Mehdipour

Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand

(Received: 4/23/2019, Accepted: 12/31/2019)

Abstract

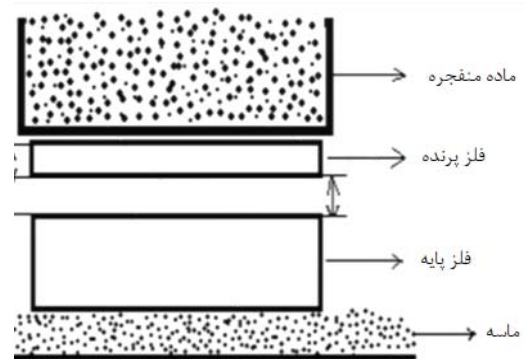
Aluminum based composites are manufactured in a variety of methods, such as mixing in liquid state, mechanical alloying and so on. Explosive welding is one of the modern ways of producing Aluminum based composite. Explosive welding is used for excellent bonding of similar and dissimilar materials with a wide variety of thicknesses, area dimensions and different thermal and mechanical properties. In this study, Aluminum plates were reinforced by steel wires by explosive welding. The steel wires are placed between two Aluminum plates and joint between plates and reinforcement were made by explosive welding process. The quality and morphology of the interface depend on standoff, the geometry of the welded plates, the properties of the metals, etc. In this paper, the appropriate parameters were determined using the numerical simulation and drawing of weldability window and layout of explosive welding was designed. The produced parts were examined by optical microscope. The simulation results showed that in the constant stand off by increasing the explosive ratio in constant standoff, velocities collision and dynamic collision angle increased. The metallography results showed that the composite obtained excellent bonding quality of interface without void and fracture.

Keywords: Explosive Welding, Aluminum Base Composite, Weldability Window, Simulation, Explosive Ratio.

* Corresponding Author E-mail: nimarefahati@yahoo.com

۱- مقدمه

جوشکاری انفجاری عمدتاً برای تولید فلزات چند لایه به شکل ورق، میلله یا لوله به منظور بهبود خواص خوردگی و یا مقاومت به سایش، هدایت حرارتی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. جوشکاری انفجاری فرآیند حالت جامد است که با استفاده از انفجار ماده منفجره، صفحه پرنده در فاصله معینی شتاب گرفته و به صفحه پایه برخورد نموده و اتصال ایجاد می‌شود [۲]. سامانه 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 مختلفی است که در حین انجام فرآیند قابل کنترل نیستند و برای رسیدن به یک اتصال قابل قبول، می‌بایست پارامترها قبل از انجام فرآیند تا حد امکان به صورت بهینه انتخاب شوند. یکی از ابزارهای مفید، به منظور تعیین مقادیر بهینه پارامترها، استفاده از روش عددی، اجزاء محدود است که در کاهش میزان آزمون و خطا و تعیین مقدار تقریبی پارامترها و به‌طور کلی طراحی سامانه جوشکاری انفجاری بسیار مؤثر است [۴]. جوشکاری انفجاری برای اولین بار در جنگ جهانی در اتصال پوسته جداره توپ‌ها به بدنه اصلی استفاده شده است [۵ و ۶]. همچنین در ابتدای دهه ۱۹۶۰ میلادی این روش به صورت صنعتی توسط شرکت دو پنت آمریکا برای اتصال مواد مختلف به یکدیگر مورد استفاده قرار گرفته است [۷ و ۸].

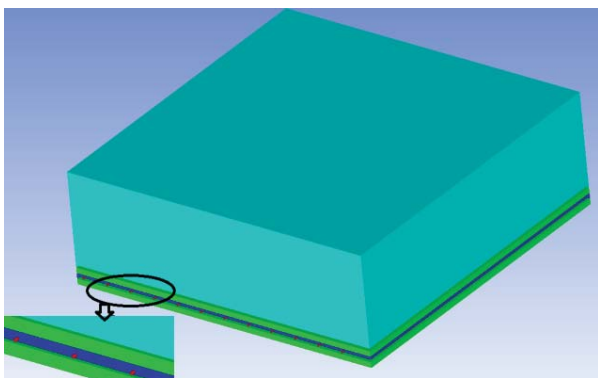
جوشکاری انفجاری تنها برای انواع فلزات محدود نمی‌شود [۹]. با استفاده از فرآیند جوشکاری انفجاری فلزات به صورت لایه‌های چند لایه به یکدیگر اتصال پیدا کرده‌اند [۱۰]. تکنیک جوشکاری انفجاری برای ساخت کامپوزیت پایه آلومینیومی که با الیاف مسی تقویت شده‌اند، مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱]. در فرآیند جوشکاری انفجاری با استفاده از روابط مربوطه، 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، شبیه‌سازی و اطلاعات موجود درباره تکنولوژی جوشکاری انفجاری، پارامترهای بهینه فرآیند

جهت تولید کامپوزیت پایه آلومینیومی به‌دست آمده و در ادامه پس از تعیین پارامترهای مؤثر بر فرآیند، قطعات مورد نیاز جهت انجام آزمون‌های انفجاری تهیه شده و با انجام آزمون، 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 می‌توان یک کامپوزیت پایه آلومینیومی که با الیاف فولادی تقویت شده‌اند به‌دست آورد. هدف از این مقاله تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با الیاف فولادی است.

۲- شبیه‌سازی

برای تعیین متغیرهای مؤثر در فرآیند جوشکاری انفجاری، هر کدام از نمونه‌ها با شرایط خاص خود، با استفاده از نرم‌افزار اتوداین مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است و سرعت برخورد و زاویه برخورد نمونه‌ها توسط شبیه‌سازی محاسبه شده است. در شکل (۲) مدل سه‌بعدی شبیه‌سازی شده، قبل از انجام فرآیند جوشکاری انفجاری نشان داده شده است.



شکل ۲- مدل سه‌بعدی ایجاد شده در نرم‌افزار اتوداین.

در جدول (۱) انواع طراحی‌های مورد نظر جوشکاری انفجاری، در شبیه‌سازی نشان داده شده است.

جدول ۱- طراحی آزمایش جوش انفجاری در شبیه‌سازی.

شماره نمونه	فاصله توقف mm	ضخامت ماده منفجره mm	بار انفجاری
۱	۴	۵۰	۴/۲۹
۲	۴	۶۰	۵/۱
۳	۴	۷۰	۶/۰۱
۴	۴	۸۰	۶/۸۷

برای شبیه‌سازی از معادله حالت جونز ویلکینز لی برای مدل کردن ماده منفجره استفاده شده است که به صورت زیر آمده است [۱۳]:

- انرژی جنبشی و فشار برخورد که متناسب با سرعت برخورد است. همه این عوامل را می‌توان تحت عنوان دو پارامتر کلی زاویه دینامیکی برخورد (β) و سرعت برخورد (V_c) بر روی دو محور مختصات رسم نمود.

جدول ۳- خواص مکانیکی مواد مورد استفاده در این مطالعه و پارامترهای مربوط به معادله جانسون کوک برای شبیه‌سازی آلیاژها [۱۳ و ۱۴].

مواد	Al 1050	Steel 1006
Density (kg/m^3)	۲۷۱۰	۷۸۹۶
Hardness (H _v)	۳۰	۹۸
Poisson's ratio	۰/۳۳	۰/۲۹
modulus of Elasticity (GPa)	۶۹	۲۰۶
A Yield stress (Mpa)	۱۱۰	۳۵۰
C Strain-rate constant	۰/۰۱۴	۰/۰۲۲
M exponent Thermal softening	۱	۱
N Hardening exponent	۰/۳۶	۰/۳۶
Bulk modulus (Gpa)	۶۷/۴	۱۶۳
point Melting	۹۲۳/۱۵	۱۸۱۱

اولین محدوده مربوط به حداقل زاویه دینامیک برخورد است که با توجه به اطلاعات جدول (۳) و رابطه (۴) برای فلزات مورد اتصال رسم شده است [۱۵].

$$\beta_{\min} = k \left[\frac{H_v}{\rho V_c^2} \right]^{0.5} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، 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 [۱۵].

از نظر هندسی حداقل زاویه‌ای 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. بر اساس پیشنهاد کراسلند و بهرانی 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 [۱۶].

برای به‌دست آوردن مرز بالای پنجره جوشکاری یا حداکثر زاویه برخورد از رابطه تجربی دریاس برای این مرز استفاده شده است. این منحنی مرز بیشینه سرعت فلز پرنده را مشخص می‌کند که فراتر از آن به واسطه افزایش انرژی ضربه، عیوبی نظیر تشکیل نواحی مذاب و ... در فصل مشترک بروز خواهد کرد [۱۷].

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{k_3}{(t^{0.25} V_c^{1.25})} \quad (۵)$$

که در رابطه (۵)، k_3 مربوط به خواص مکانیکی صفحه پرنده است و از رابطه (۶) به‌دست می‌آید [۱۷].

$$k_3 = \left[\frac{E}{12\rho(1-2\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۶)$$

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V} \quad (۱)$$

که در آن، p فشار، V حجم ویژه و A ، B ، R_1 ، R_2 ، ω ثابت ماده منفجره است که در جدول (۲) ضریب‌های معادله حالت جونز ویلکینز لی برای ماده منفجره آنفو نشان داده شده است.

جدول ۲- ثابت مربوط به معادله حالت جونز ویلکینز لی برای شبیه‌سازی ماده منفجره [۱۴].

ماده منفجره	آنفو
velocity Detonation (m/s)	۴۱۶۰
Density (kg/m^3)	۹۳۱
E Energy (G J/m^3)	۲/۴۸
A (Gpa)	۴۹/۴۶
B (Gpa)	۱/۸۹۱
R_1	۳/۹۰
R_2	۱/۱۱
ω	۰/۳۳

برای تغییر شکل پلاستیک صفحات از رابطه (۲) جانسون کوک استفاده شده است که در آن تنش سیلان تابعی از کرنش پلاستیک، نرخ کرنش و دما (رابطه (۲)) تنش تسلیم فون میز هر آلیاژ به صورت زیر بیان شده است [۴]:

$$Y = [A + B \epsilon^n] (1 + C \ln \epsilon^*) [1 - (T_H)^m] \quad (۲)$$

T_H دمای همولوگ است که نشانگر نسبت دمای ماده به دمای ذوب آن است که برای هر آلیاژ از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$T_H = \frac{T - T_{\text{اتاق}}}{T_{\text{ذوب}} - T_{\text{اتاق}}} \quad (۳)$$

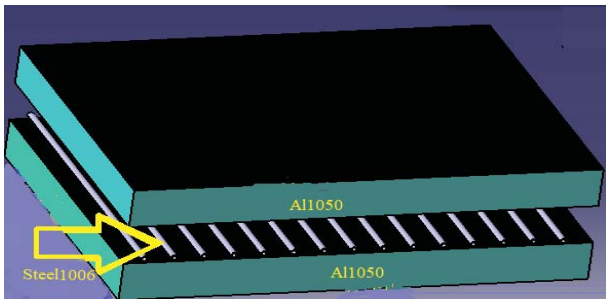
که در آن، T درجه حرارت مطلق، ϵ^* میزان نرخ کرنش پلاستیک (غالباً برابر S^{-1})، ϵ کرنش پلاستیک و m ، C ، A ، B ، n ثابت‌های معادله هستند.

عبارت اول، تنش تسلیم را به‌عنوان تابعی از کرنش با $T_H=0$ می‌دهد. عبارات دوم و سوم به ترتیب، نرخ کرنش و اثرات دمایی را ارائه داده است. ثابت‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول (۳) آورده شده است.

۳- رسم پنجره جوشکاری

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

- زاویه دینامیکی برخورد β جهت ایجاد جت و شکل امواج؛
- سرعت پیشروی نقطه برخورد V_c جهت تشکیل امواج و ایجاد جوش؛

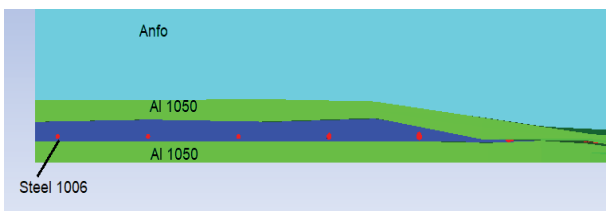


شکل ۴- مدل سه بعدی از چیدمان اولیه صفحات با الیاف فولادی تحت زاویه صفر درجه.

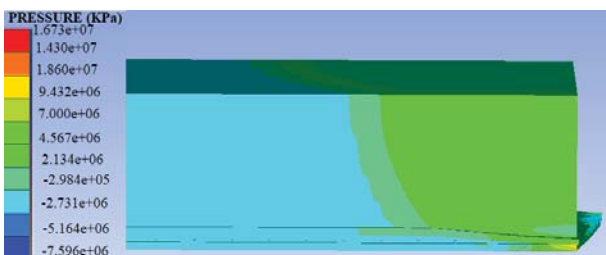
۵- نتایج و بحث

۵-۱- نتایج شبیه سازی و پنجره جوشکاری

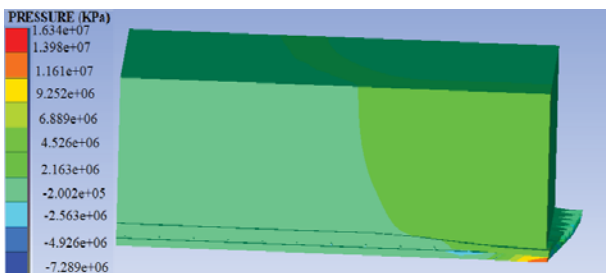
نتایج شبیه سازی کامپوزیت پایه آلومینیومی که با الیاف فولادی تقویت شده اند. در شکل های (۵-۹) نشان داده شده است. شکل (۵) شمای از مراحل پیشرفت جوشکاری در هنگام شبیه سازی را نشان داده است. بعد از گذشت زمان ۲ میلی ثانیه ورق ها تحت تنش و تغییر شکل قرار گرفته اند.



شکل ۵- نمای جانبی شبیه سازی شده نمونه شماره ۳ بعد از گذشت ۲ میلی ثانیه.



شکل ۶- نمایشی از کانتور فشار جوشکاری صفحات و الیاف فولادی در حین فرآیند در ۳ میلی ثانیه در نمونه شماره ۳.

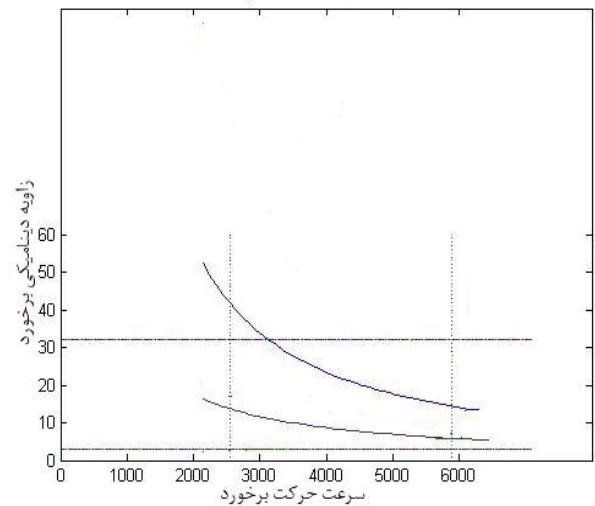


شکل ۷- نمایشی از کانتور فشار جوشکاری صفحات و الیاف فولادی در حین فرآیند در ۴ میلی ثانیه در نمونه شماره ۲.

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 که ۱/۲ برابر سرعت صوت فلز در نظر گرفته شده است [۱۶]. 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 می کند و از رابطه (۷) به دست می آید. در این رابطه عدد ۱۰/۶ به عنوان عدد رینولدز استفاده شده است و خواص صفحه پرند و صفحه مادر در رابطه (۷) جایگزین شده است [۴].

$$Re = \frac{(\rho_f + \rho_p) V_c^2}{2(H_f + H_p)} \quad (7)$$

در شکل (۳) پنجره جوشکاری انفجاری ما بین صفحات آلومینیومی با استفاده از روابط بیان شده، رسم شده است.



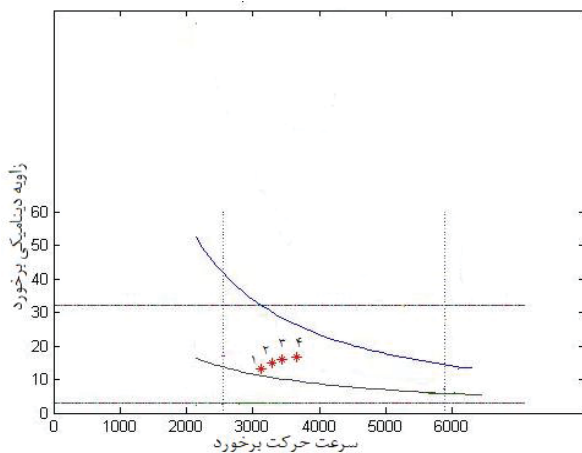
شکل ۳- پنجره جوشکاری انفجاری ما بین صفحات آلومینیومی ۱۰۵۰.

۴- چیدمان آزمون تجربی

صفحه های آلومینیوم ۱۰۵۰ به عنوان صفحات پرند و مادر در نظر گرفته شده است و از سیم های فولادی به عنوان تقویت کننده در این صفحات استفاده شده است. صفحات ابتدا به ابعاد ۲۵۰×۲۵۰×۴ میلی متر برشکاری شده اند سطوح این صفحات پولیش و پرداخت شده اند تا کاملاً 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 پرند بدون فاصله مستقر شده است. شکل (۴) مدل سه بعدی مورد نظر از نحوه چیدمان ورق ها برای تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی با الیاف فولادی تحت زوایای صفر درجه را نشان داده است. کل مجموعه جهت انجام آزمون انفجاری بر روی بستری از شن نرم قرار گرفته 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.

نتایج نمایانگر افزایش زاویه دینامیکی برخورد با افزایش میزان بار انفجاری است. همچنین با استفاده از خروجی نرم‌افزار سرعت برخورد (Vc) نیز قابل محاسبه است که در ستون ۵ و ۴ جدول (۴)، نتایج پیش‌بینی شبیه‌سازی زاویه برخورد و سرعت برخورد نشان داده شده است.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت ماده منفجره و در نتیجه بار انفجاری، سرعت برخورد و زاویه دینامیکی برخورد افزایش یافته است. در این تحقیق پنجره جوشکاری بر اساس زاویه دینامیکی برخورد (β) و سرعت حرکت نقطه برخورد (Vc) با کمک نتایج شبیه‌سازی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی براساس شماره نمونه‌ها در پنجره جوشکاری نشان داده شده است.



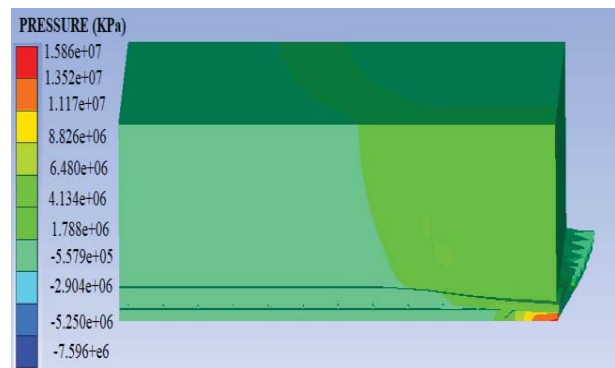
شکل ۱۰- پنجره جوشکاری انفجاری ما بین صفحات آلومینیومی ۱۰۵۰.

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده شده است، همه مقادیر سرعت‌های محاسبه شده نمونه‌ها از مرز حداقل سرعت لازم برخورد بیشتر بوده و در نتیجه شرایط جهت برقراری اتصال در کلیه آزمون‌ها فراهم است. همچنین سرعت و زاویه برخورد به‌دست آمده از نتایج شبیه‌سازی در هر آزمون، به خوبی با روابط پنجره جوشکاری مطابقت داشته به‌طوری که نمونه‌ها درون منطقه قابل اتصال پنجره جوشکاری قرار گرفته است. مکان‌یابی آزمون جوشکاری انفجاری در پنجره جوشکاری نشانگر قرارگیری آزمون در محدوده جوش پذیری بوده است.

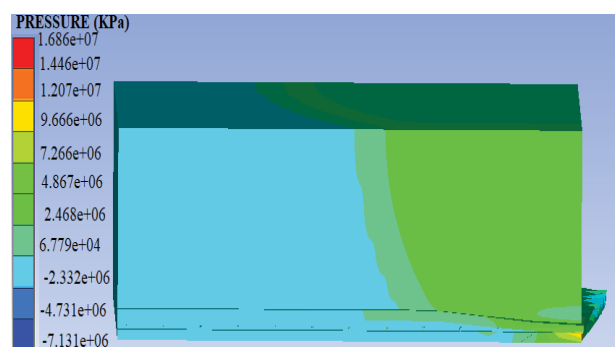
در انتخاب پارامترهای بهینه این نکته حائز اهمیت است که در هنگام جوشکاری با تنظیم پارامترهای جوشکاری انفجاری باید تا حد امکان از نزدیک شدن به مرزها جلوگیری و همیشه فاصله مطمئن نسبت به آن‌ها حفظ شود.

۵-۲- نتایج آزمون تجربی

با انجام آزمون‌های انفجاری نمونه‌های کامپوزیت به ابعاد ۲۵۰×۲۵۰ به ضخامت ۸ میلی‌متر تهیه شده برای بررسی خواص نمونه‌ها، نمونه ساخته شده ابتدا با استفاده از دستگاه نورد صاف شده و بخش‌هایی از آن برای بررسی اتصال زمینه آلومینیوم به الیاف فولادی تحت فرآیند متالوگرافی با استفاده از میکروسکوپ نوری قرار گرفت. در شکل (۱۱)



شکل ۸- نمایشی از کانتور فشار جوشکاری صفحات و الیاف فولادی در حین فرآیند در ۴ میلی‌ثانیه در نمونه شماره ۱.



شکل ۹- نمایشی از کانتور فشار جوشکاری صفحات و الیاف فولادی در حین فرآیند در ۴ میلی‌ثانیه در نمونه شماره ۴.

در جدول (۴)، نتایج شبیه‌سازی برای آزمایش‌ها با بارهای انفجاری مختلف نشان داده شده است. در ستون ۲ و ۳ به ترتیب ضخامت ماده منفجره و مقدار بار انفجاری، برای هر کدام از آزمایش‌ها، آورده شده است. بار انفجاری نشان دهنده نسبت جرم ماده منفجره در واحد سطح، به جرم بار صفحه پرند در واحد سطح، است. همان‌طور که در جدول (۴) نشان داده شده است، با افزایش ضخامت ماده منفجره، نسبت بار انفجاری افزایش می‌یابد.

جدول ۴- پارامترهای به‌دست آمده از آزمون‌های شبیه‌سازی شده.

شماره نمونه	ضخامت ماده منفجره mm	بار انفجاری	زاویه برخورد پیش‌بینی (درجه)	سرعت برخورد پیش‌بینی شده (m/s)
۱	۵۰	۴/۲۹	۱۱/۲	۳۱۵۲
۲	۶۰	۵/۱	۱۲	۳۴۳۸
۳	۷۰	۶/۰۱	۱۲/۶	۳۴۸۸
۴	۸۰	۶/۸۷	۱۴/۱	۳۵۰۸

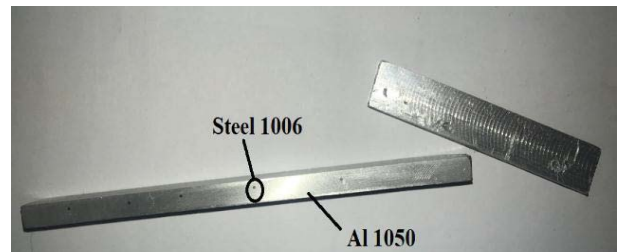
با استفاده از تصاویر نشان داده شده مقادیر زاویه برخورد (β) را به صورت تقریبی می‌توان محاسبه نمود. زاویه دینامیکی برخورد برای تمامی آزمون‌ها مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و نتایج آن در جدول (۴) نشان داده شده است.

است و ضخامت ماده منفجره بهینه ۶۰ میلی‌متر است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در فاصله توقف ثابت با افزایش ۶۰ درصدی بار انفجاری، سرعت برخورد ۱۱ درصد و زاویه دینامیکی برخورد هم ۲۵ درصد افزایش یافته است. نتایج متالوگرافی نشان داد که انتخاب پارامترهای بهینه به درستی انجام شده است و حل تحلیلی، شبیه‌سازی و آزمون تجربی با یکدیگر در تطابق کامل هستند.

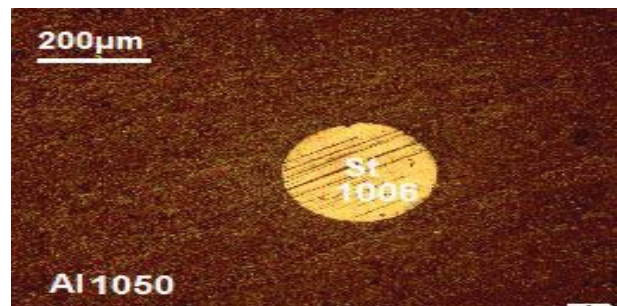
مراجع

- [1] Mendes, R.; Ribeiro, J. B.; Loureiro, A. "Effect of Explosive Characteristics on the Explosive Welding of Stainless Steel to Carbon Steel in Cylindrical Configuration"; Mater. Des. 2013, 51, 182-192.
- [۲] رودباری، مریم؛ مهدی پور عمرانی، علی؛ آذرافزا، رضا "تأثیر عملیات حرارتی بر روی قطعات دو جنسی تیتانیوم و فولاد زنگ نزن ۳۱۶L تولید شده به روش جوشکاری انفجاری"؛ سیزدهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران تهران، ۱۳۹۲.
- [3] Roudbari, M.; Mehdipoor, A.; Azarafza, R. "Heat treatment of Stainless Steel 316L- Titanium Bimetal Manufactured By Explosive Welding"; Int. Res. J. Applied & Basic Sci. 2013, 7, 687-692.
- [۴] خانزاده قره شیران، محمدرضا؛ بختیاری، حمید؛ سیدی، مهران؛ احمدی، حمیدرضا "شبیه‌سازی و مطالعه پنجره جوشکاری اتصال سه لایه انفجاری آلومینیوم AA5083-AA1050 به فولاد کربنی"؛ مجله علمی پژوهشی مواد پرنرزی، سال ۱۲، شماره ۳، صفحه ۱۵۲، پاییز ۱۳۹۶.
- [5] Blazynski, T. Z. "Explosive Welding Forming and Compaction"; Springer: Netherlands, 1983.
- [6] Pocalyko, A. "Fabrication of Explosion-Welded Titanium-Clad Composites"; Weld. J. 1987, 25, 24-30.
- [7] Nobili, A.; Masri, T.; Lafont, M. C. "Recent Development in Characterization of a Titanium-steel Explosion Bond Interface"; Proc. Reactive Metal in Corrosion Application Conf. Wah Chang, Albany. 1999, 89.
- [8] Crossland, B. "Explosive Welding of Metals and Its Applications"; Oxford University Press: Oxford, 1982.
- [9] Xunzhong, G.; Jie, T.; Wentao, W.; Huaguan, L.; Chen, W. "Effects of the Inner Mould Material on the Aluminium-316L Stainless Steel Explosive Clad Pipe"; Mater. Des. 2013, 49, 116-122.
- [10] Lazurenko, D. V.; Bataev, I. A.; Mali, V. I.; Bataev, A. A.; Maliutina, Iu. N.; Lozhkin, V. S.; Esikov, M. A.; Jorge, A. M. J. "Explosively Welded Multilayer Ti-Al Composites: Structure and Transformation During Heat Treatment"; Mater. Des. 2016, 102, 122-130.
- [11] Los, I. S.; Khorin, A. V.; Troshkina, E. G.; Guskov, M. S. "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. 2010, 7-11, 1-14.
- [12] Saravanan, S.; Raghukandan, K. "Weldability Windows for Explosive Cladding of Dissimilar Metals"; Adv. Mater. Res. Switzerland 2012, 445, 729-734.
- [13] Li, Y.; Liu, C.; Yu, H.; Zhao, F.; Wu, Zh. "Numerical Simulation of Ti/Al Bimetal Composite Fabricated by Explosive Welding"; Metals 2017, 7, 407.
- [14] Zamani, E.; Light, G. H. "Explosive Welding of Stainless Steel-Carbon Steel Coaxial Pipes"; J. Mater. Sci. 2012, 47, 685-95.

تصویر نمونه‌ای از اتصال آلومینیوم به الیاف فولادی پس از فرآیند جوشکاری انفجاری و بعد از فرآیند ماشینکاری نشان داده شده است. در شکل (۱۲) اتصال آلومینیوم به الیاف فولادی با بزرگنمایی ۲۰۰ میکروسکوپ نوری نشان داده شده است.



شکل ۱۱- تصویر اتصال آلومینیوم به الیاف فولادی پس از فرآیند جوشکاری انفجاری.



شکل ۱۲- تصاویر متالوگرافی نوری از مقطع فولادی در زمینه آلومینیومی.

در نمونه در قسمت وسط که به صورت دایره‌ای شکل با تصاویر روشن، مقطع رشته فولادی نشان داده شده است و در قسمت اطراف آنکه تیره‌تر است، آلومینیوم قرار گرفته است. به علت انتخاب صحیح پارامترهای جوشکاری به کمک شبیه‌سازی و پنجره جوشکاری، حفره یا منطقه ذوب و یا ترک در فصل مشترک بین آلومینیوم و فولاد مشاهده نشده است و به دلیل نفوذ در یکدیگر، هیچ نوع گسستگی مشاهده نمی‌شود. با توجه به اتصال آلومینیوم / آلومینیوم فصل مشترک در تصویر مشترک نوری به وضوح مشخص نیست. همان‌طور که شکل (۱۲) نشان می‌دهد در آزمون اتصال بین صفحات و الیافهای فولادی ایجاد شده است. از روش تحقیق گولنک و همکارانش که بر روی کامپوزیت پایه آلومینیومی که با الیاف فولادی به زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه تقویت شده‌اند، استفاده شده است [۱۸].

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اتصال موفق کامپوزیت 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، شبیه‌سازی و آزمون‌های تجربی انجام شده نشان داد که فاصله توقف بهینه بین صفحات آلومینیومی ۴ میلی‌متر

- [17] Ribeiro, Jb.; Mendes, R.; Loureiro, A. "Review of the Weldability Window Concept and Equations for Explosive Welding"; J. Phys. Conf. Ser. May 2014.
- [18] Gülenç, B.; Kaya, Y.; Durgutlu, A.; Gülenç, İ. T. "Production of Wire Reinforced Composite Materials through Explosive Welding"; Archives of Civil and Mechanical Eng. 2016, 16, 1-8.
- [15] Akbari Mousavi, S. A. A.; Al-Hassani, S. T. S. "Finite Element Simulation of Explosively-Driven Plate Impact with Application to Explosive Welding"; Mater. Des. 2008, 29, 1-19.
- [16] Akbari Mousavi, S. A. A.; Farhadi Sartangi, P. "Experimental Investigation of Explosive Welding of Cp- Titanium/AISI 304 Stainless Steel"; Mater. Des. 2009, 195, 459-468.