

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

تأثیر خواص فیزیکی و مکانیکی صفحات پایه و پرنده در شکل فصل مشترک جوش های انفجاری

مقاله پژوهشی

حمید بختیاری^۱، محمدرضا خانزاده^{۲*}

۱- دکتر، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک، کرج، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد مبارکه، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

*Khanzade@gmail.com

چکیده

این مطالعه تأثیر خواص فیزیکی و مکانیکی بر ریزساختار و جوش پذیری جوشکاری انفجاری را بررسی می کند. اتصال نمونه ها به روش موازی انجام شد. به منظور انجام بررسی آزمایشگاهی و بحث در مورد ریزساختار و نوع امواج فصل مشترک از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. همچنین برای بررسی تأثیر پارامترهای مواد مختلف فلزی بر شکل اتصال جوشکاری انفجاری از پارامتر عدم تطابق امپدانس^۱ (IMP) و فاکتور فصل مشترک موجی^۲ (WIF) استفاده شده است. در جفت های فلزی مورد بررسی، مشاهده شد که وقتی صفحه پرنده از صفحه پایه متراکم تر است، اختلاف چگالی قوی (ρ_R) بالاتر از $3/3$ می تواند از تشکیل فصل مشترک موج دار جلوگیری کند. همچنین اگر دمای ذوب صفحه پرنده به طور قابل ملاحظه ای بالاتر از صفحه پایه باشد (T_R بالاتر از $1/60$)، همین اتفاق رخ می دهد. نتایج برای WIF نیز نشان داد که با افزایش این فاکتور به مقدار بالاتر از $5/44$ ، ظاهر فصل مشترک به صورت تخت می شود.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۳

کلید واژگان:

جوشکاری انفجاری

شکل فصل مشترک

IMP

WIF

The Effect of Physical and Mechanical Properties of the Base and Flyer Plates on the Shape of the Interface of Explosive Welds

Hamid Bakhtiari¹, Mohammadreza Khanzadeh^{2*}

1- Ph.D. Materials and Energy Research Center, Ceramics Research Institute, Karaj, Iran.

2- Associate Professor, Faculty of Engineering, Mobarakeh Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

* Khanzade@gmail.com

Article Information

Original Research Paper

Doi:

Keywords:

Explosive Welding

Interface Morphology

IMP

WIF.

Abstract

This study examines the influence of physical and mechanical properties on the microstructure and weldability of explosive welding, specifically in the context of joining two metals with contrasting thermophysical properties. The parallel preparation was used for experimental group for explosive welding. Laboratory investigations utilized optical and scanning electron microscopes to explore the microstructure and interface wave patterns. The impedance mismatch parameter (IMP) and wave interface factor (WIF) were employed to analyze how different metal material properties affect the shape of explosive welding. In the studied metal pairs, it was observed that a substantial density difference (ρ_R greater than 3.3) can hinder the formation of a wavy interface when the flyer plate is denser than the base plate. Similarly, if the melting temperature of the flyer plate exceeds that of the base plate (T_R above 1.60), a similar effect is observed. Furthermore, the results for WIF indicated that increasing this factor beyond 5.44 results in a flat interface appearance.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Hamid Bakhtiari, Mohammadreza Khanzadeh. The Effect of Physical and Mechanical Properties of the Base and Flyer Plates on the Shape of the Interface of Explosive Welds, New Process in Material Engineering, 2025, 19(1), 33-43.

۱- مقدمه

پیشرفت‌های فعلی در فناوری‌های پیشرفته برای مواد جدید با خواص برتر مانند خوردگی، مقاومت در برابر سایش برای کاربردهای صنعتی مورد نیاز است؛ بنابراین، کارهای متعددی برای توسعه مواد جدید برای چنین اهدافی انجام شده است. جوشکاری انفجاری به دلیل قابلیت اتصال مستقیم به طیف گسترده‌ای از ترکیبات مشابه و غیرمشابه از فلزات که با هیچ تکنیک دیگری نمی‌توانند به یکدیگر متصل شوند، شناخته شده است. علاوه بر این، این فرآیند به دلیل توانایی آن در توزیع چگالی انرژی بالا از طریق انفجار، قادر به پیوستن به سطوح بالای سطح است. تاکنون فلزات مشابه (فولاد به فولاد [۱]، مس به مس [۲]، آلومینیوم به آلومینیوم [۳])، فلزات غیرمشابه مانند فولاد و آلومینیوم [۴]، فولاد و تیتانیوم [۵]، فیلم نیکل و آلیاژهای آلومینیوم [۶]، آهن و مس [۷]، آلومینیوم و منیزیم [۸]، تیتانیوم و فولاد [۹] و آلومینیوم به تیتانیوم [۱۰] با موفقیت توسط این فرآیند روکش شده‌اند.

جوشکاری انفجاری روشی است که در آن از انرژی کنترل شده یک ماده منفجره استفاده می‌شود تا سطوح جوش شونده که نسبت به هم در فاصله توقف معینی قرار گرفته‌اند با سرعت بالایی به یکدیگر نزدیک شده و به هم برخورد کنند [۱۱]. در اثر برخورد دو سطح به یکدیگر، میدان خمیری موضعی در فصل مشترک اتصال ایجاد می‌شود و در اثر فشار برخوردی بالا، درجه حرارت افزایش می‌یابد. همچنین یک جت جهنده با سرعت بالا از دو سطح اتصال تشکیل شده که موجب ایجاد سطوح اتصالی تمیز در فصل مشترک جوشکاری و حذف آلودگی‌های سطحی می‌شود، تشکیل این جت از شرایط اساسی ایجاد پیوند مناسب در جوشکاری انفجاری است [۱۲-۱۳]. از فرآیند جوشکاری انفجاری می‌توان جهت اتصال دهی چندلایه فلزات که عمدتاً جهت جلوگیری از خوردگی، بهبود کیفیت انتقال حرارت، افزایش مقاومت در برابر تنش‌های اعمالی، بهبود خواص الکتریکی و نیز بهبود خواص سایشی سطح ایجاد می‌شود، استفاده کرد [۱۴]. این فرآیند در صنایعی مانند صنایع تولید نیروگاهی، ساخت مخازن تحت فشار و مبدل‌های حرارتی و نیز صنایع کشتی‌سازی کاربرد دارد [۱۵].

یکی از مزایای عمده روش جوشکاری انفجاری همانند روش‌های دیگر جوشکاری حالت جامد، توانایی و قابلیت جوشکاری آلیاژها و فلزات غیر هم‌جنس است که ممکن است به دلیل اختلاف در میزان درجه حرارت ذوب و امکان ایجاد ترکیبات بین فلزی مضر، نتواند با روش‌های جوشکاری ذوبی به یکدیگر اتصال یابند. مشکلات متالورژیکی بسیاری در فرآیندهای جوشکاری ذوبی وجود دارد و در مقایسه با آن روش‌ها، جوشکاری انفجاری دارای مشکلات متالورژیکی کمتری است؛ اما با این وجود نیز برخی مشکلات مهم متالورژیکی در جوشکاری انفجاری امکان به وجود آمدن دارد [۱۶].

ساختارهای ایجاد شده در فصل مشترک یک جوش انفجاری می‌تواند تابع نوع طراحی جوش بوده و تحت شرایط طراحی‌های متفاوت تغییر نماید. طبیعت ساختار فصل مشترک جوشکاری بستگی به میزان بار انفجاری، خصوصیات مواد منفجره مورد استفاده، تنظیمات آزمایشی، ضخامت صفحه پرندۀ و خواص صفحات پرندۀ و پایه دارد [۱۶].

یکی از مشکلات اساسی که در زمینه جوشکاری انفجاری وجود دارد، عدم ارائه یک مدل تئوری جامع در زمینه تشریح مکانیزم ایجاد اتصال و تشکیل امواج در فصل مشترک اتصال است که به کمک آن بتوان ساختارها و نوع مورفولوژی‌های تشکیل شده در فصل مشترک حاصل از اتصال را به‌طور کامل و صحیح توجیه نمود. ارائه یک چنین مدلی ابزاری قدرتمند جهت کنترل مورفولوژی فصل مشترک در کنار فرآیند جوشکاری فراهم می‌آورد [۱۶-۱۷].

مکانیزم‌های گوناگونی جهت توصیف فرآیند جوشکاری انفجاری در مراحل اولیه گسترش آن ارائه گردید. بعضی از محققین این فرآیند را اساساً یک فرآیند جوش ذوبی در نظر گرفته‌اند که در آن اضمحلال و تبدیل انرژی جنبشی در فصل مشترک اتصال به‌عنوان عاملی در جهت ایجاد حرارت کافی به‌منظور ذوب دوجانبه در سرتاسر فصل مشترک و نفوذ عناصر تشکیل‌دهنده از طریق لایه‌های مذاب تشکیل یافته، در نظر گرفته می‌شود. محققان دیگری مانند کراسلند ویلیامز^۳ [۱۸]، این فرآیند را اساساً جزو فرآیند جوشکاری

را بررسی می‌کند. تمرکز بر شکل فصل مشترک جوش‌های انفجاری بوده و پارامترهای عدم تطابق امپدانس و ضریب واسط شکل موج را تحلیل می‌کند. این پارامترها برای درک بهتر عملکرد ویژگی‌های جوش‌های انفجاری بسیار مهم هستند.

۲- مواد و روش‌ها

اتصال نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش که در مطالعات قبلی انجام و چاپ شده است به روش جوشکاری انفجاری و به صورت چیدمان موازی مستقر در سکوی بتنی و لایه بافر (شن نرم) انجام گرفته است. شکل (۱) نحوه تنظیم اولیه صفحات برای جوشکاری انفجاری را نشان می‌دهد. در این حالت دو صفحه یکی به عنوان صفحه پایه و دیگری به عنوان صفحه پرنده تحت فاصله توقف قرار داده شده‌اند. برای اتصال آن‌ها از ماده منفجره آماتول^۶ ۹۵/۵ با ترکیب تری نیترو تولوئن^۷، ۵ درصد و نیترات آمونیوم ۹۵ درصد استفاده شده است. چگالی مواد منفجره ۰/۸۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب با دانه‌بندی ۲۰۰ میکرومتر بوده که در داخل یک جعبه از جنس چوب بالای صفحه پرنده قرار داده شدند. همچنین به منظور آنکه در حین انفجار به قطعه آسیب نرسد بین صفحه پرنده و ماده منفجره از یک حائل^۸ یا ضربه گیر (ورق لاستیکی پلی-اتیلن یا پوست ضخیمی از رنگ) استفاده شد است تا ماده منفجره در تماس مستقیم با قطعه نباشد. قبل از انجام جوشکاری نیز سطوح تمام نمونه‌ها با استفاده از محلول استون تمیزکاری شدند. برای مشاهده اطلاعات بیشتر در مورد فاصله توقف و بار انفجاری برای اتصال نمونه‌ها می‌توانید منابع ۲۷ تا ۳۴ را مطالعه کنید.

به منظور انجام بررسی و بحث در مورد ریزساختار و نوع امواج فصل مشترک از تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی‌های مختلف استفاده شده است. همچنین برای بررسی تأثیر پارامترهای مواد مختلف فلزی بر شکل اتصال جوشکاری انفجاری از پارامتر عدم تطابق امپدانس (IMP) و فاکتور فصل مشترک موجی شکل (WIF) استفاده شده است.

فشاری تقسیم‌بندی نموده‌اند. به طوری که اتصال تحت تغییر فرم‌ها و کرنش‌های پلاستیکی شدید در فصل مشترک و متعاقباً وقوع پدیده نفوذ حالت جامد تحت اثر فشارهای بالا و در مدت زمان کافی ایجاد می‌شود.

مکانیزم متفاوتی توسط هامر اشمیت و کری^۵ [۱۹]، ارائه شده که در آن فرآیند تشکیل اتصال انفجاری به صورت یک فرآیند ذوبی می‌باشد. به طوری که در حین فرآیند فصل مشترک اتصال برای مدت چند میکروثانیه به دمای بسیار بالاتر از نقطه ذوب دو قطعه رسیده و به دنبال آن تحت سرعت سرمایش بالا، در حدود ۱۰^۵ درجه کلوین بر ثانیه قرار می‌گیرد. این امر منجر به تشکیل دانه‌های بسیار ریز در فصل مشترک اتصال خواهد شد.

نکته قابل ذکر این است که تنوع در امواج وجود دارد؛ بنابراین، این امکان نیز هست که هریک از مکانیزم‌های پیشنهادی فقط بتوانند یک مکانیزم را توصیف نمایند؛ لذا به منظور رسیدن به مکانیزمی که قادر باشد انواع متعدد موج را در فصل مشترک تحلیل نماید نیاز به بررسی بیشتر در مکانیک سیال ناحیه برخورد، دارد [۲۰].

جوشکاری انفجاری یک روش مؤثر برای اتصال فلزات غیرمشابه با ابعاد بزرگ بدون نیاز به حرارت است. تفاوت در چگالی، رسانایی حرارتی و دمای ذوب بین صفحه پرنده و صفحه پایه ممکن است مانع جوشکاری شود و موضوع مهم تحقیق باشد. چگالی مواد در مرحله برخورد نقش مهمی دارد و با افزایش فشار، رفتار سیال مانند (تشکیل موج و جت) رخ می‌دهد و تقارن در سطح مشترک از بین می‌رود. پرداختن به موضوعات مرتبط با توسعه فرآیند برای افزایش حجم دانش در رابطه با جوشکاری غیرمشابه مواد با خواص فیزیکی و مکانیکی مختلف ضروری است.

هدف این تحقیق تجزیه و تحلیل پدیده‌های فرآیند جوشکاری انفجاری در اتصال مواد با تضادهای قابل توجه در خواص ترموفیزیکی، فیزیکی و مکانیکی است تا عوامل کنترل‌کننده اصلی بر ریزساختار فصل مشترک ویژگی‌های مشابه و غیرمشابه را بهتر درک کنیم. این کار تأثیر خواص گفته شده بر جوشکاری انفجاری را مورد بحث قرار می‌دهد و جنبه‌هایی مانند جوش‌پذیری و مورفولوژی سطحی/موجی

رفتار و شکل فصل مشترک مؤثر باشد. عدم تطابق بالای امپدانس‌ها مابین مواد می‌تواند باعث مقادیر بالاتری از موج شوک برگشتی باشد. در نتیجه اختلاف امپدانس‌ها می‌تواند به‌طور مؤثری روی رفتار موج شوک در فصل مشترک تأثیرگذار باشد. پارامتر عدم تطابق امپدانس از طریق رابطه‌های ۲ تا ۵ محاسبه می‌شود [۲۲-۲۳].

$$Z_{ratio} = \frac{Z_{flyer}}{Z_{base}} = \frac{\rho_{flyer}}{\rho_{base}} \times \frac{C_{b\ flyer}}{C_{b\ base}} \quad (2)$$

$$C_b = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (3)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (4)$$

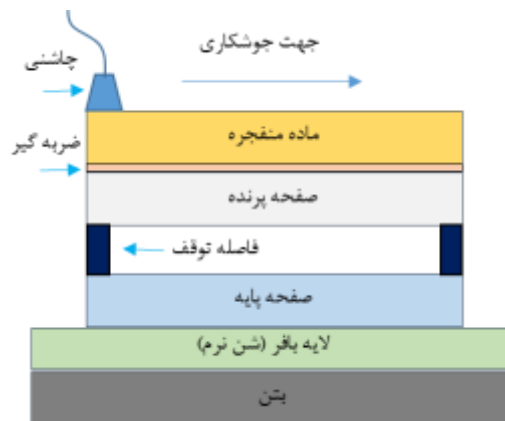
$$IMP = |1 - Z_{ratio}| \quad (5)$$

در این رابطه‌ها، Z امپدانس، ρ چگالی، C_b سرعت صوت در ماده (ms^{-1})، K مدول حجمی، E مدول یانگ و ν نسبت پواسون است. محاسبه فاکتور IMP در تشخیص رفتار فصل مشترک بسیار مهم است. در جوش‌های هم‌جنس فاکتور IMP برابر صفر خواهد بود و هرچه این مقدار از ۱ بزرگ‌تر شود عدم تطابق امپدانس زیاد شده و موج‌ها تمایل به خم شدن بیشتر دارند [۲۲]. به‌منظور بررسی بیشتر تأثیر دو ویژگی فیزیکی چگالی و دمای ذوب با توجه به (رابطه ۶)، نسبت چگالی (ρ_R) و نسبت دمای ذوب (T_R) در یکدیگر ضرب می‌شوند و فاکتور فصل مشترک موجی شکل (WIF) نامیده می‌شود.

$$WIF = \frac{\rho_{flyer}}{\rho_{base}} \times \frac{T_{flyer}}{T_{base}} = \rho_R \times T_R \quad (6)$$

در جدول (۱) پارامترهای موردنیاز برای محاسبه IMP و WIF نشان شده است.

جدول (۱): پارامترهای موردنیاز برای محاسبه مقدارهای IMP ، WIF



شکل (۱): سیستم تنظیم موازی آزمون‌های جوشکاری.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- فاکتورهای IMP و WIF

در فرآیند جوشکاری انفجاری، اتصالات موجی شکل معمولاً استحکام پیوند بالایی را به دست می‌آورند. هنگامی که سرعت نقطه برخورد V_c کوچک‌تر از مقدار معینی باشد، ناحیه پیوند به‌جای یک فصل مشترک موجی، یک فصل مشترک خطی است. محققان در گزارش‌های خود نشان دادند که سرعت به خواص فلزاتی که باید جوش داده شوند بستگی دارد. بر اساس تئوری دینامیک سیالات، سرعت نقطه برخورد V_c را می‌توان تابعی از سختی و چگالی دو فلز توصیف کرد (رابطه ۱) [۲۱].

$$R_e = \frac{(\rho_f + \rho_p)V_c^2}{2(H_f + H_p)} \quad (1)$$

هنگامی که پیکربندی جوش انفجاری نامتقارن است، عدد رینولدز (R_e) حدود ۸/۰ تا ۱۳/۰ است. در این رابطه ρ_f و ρ_p به ترتیب چگالی صفحه پرندۀ و صفحه پایه هستند و H_f و H_p به ترتیب سختی و یک‌کُز آنها هستند. بر اساس تحلیل‌های ارائه شده، انتقال از فصل مشترک موجی به غیر موجی برای بیشتر فلزها در $R_e = 10/6$ رخ می‌دهد که این مقدار در آزمایش‌های مختلف تأیید شده است [۲۱].

امپدانس مواد می‌تواند به مقاومت در برابر انتشار سرعت موج شوک در بدنه اطلاق گردد. امپدانس شوک (Z) می‌تواند بر اساس چگالی و سرعت انتشار صوت در ماده محاسبه گردد. نسبت امپدانس‌ها بین صفحه پرندۀ و صفحه پایه می‌تواند بر

پدیده‌های سطحی که امواج را شکل می‌دهند تأثیر بگذارد. موج همیشه ماده‌ای با چگالی و امپدانس بالاتر است. این تفاوت‌های مورفولوژیکی احتمالاً مربوط به نحوه انتقال یا انعکاس امواج ضربه‌ای در سطح مشترک است. فیزیک پشت این پدیده‌ها پیچیده است و ممکن است ویژگی‌های دیگری وجود داشته باشد که بر شکل موج‌ها تأثیر بگذارد؛ بنابراین، این جنبه باید به‌صراحت برای جزئیات بیشتر مورد مطالعه قرار گیرد [۲۴-۲۶].

جدول (۲) مقادیر IMP را به ترتیب نزولی از بالاترین به کمترین نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش فاکتور IMP، عدم تطابق امپدانس افزایش می‌یابد و امواج تمایل به خمیدگی بیشتری دارند. شکل (۲) نتایج جدول (۲) را به‌صورت گرافیکی نشان می‌دهد. نتایج به‌وضوح اتصال‌های انفجاری انجام شده را به دو گروه امواج خمیده و امواج معمولی تقسیم می‌کنند. لازم به ذکر است که پارامترهای جوشکاری نیز تأثیر قابل توجهی بر سطح مشترک جوش دارند و می‌توانند ظاهر نشدن امواج یا حتی تشدید شکل موج را تعیین کنند. برخی از مهم‌ترین این پارامترها عبارت‌اند از:

الف) سرعت ضربه یا سرعت برخورد

ب) سرعت پیشروی نقطه برخورد

ج) سرعت انفجار ماده منفجره

پ) زاویه دینامیکی برخورد

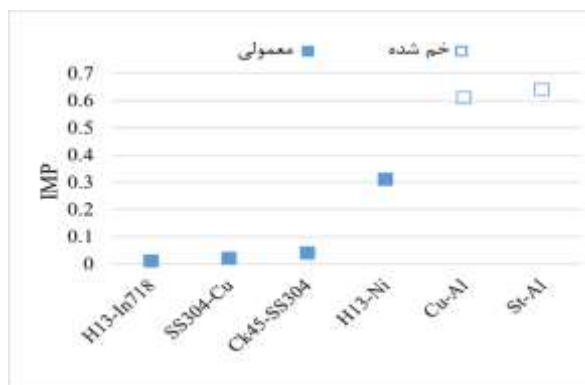
ه) انرژی ضربه

آ	نقطه ذوب (°C)	$Z (kg m^{-2} s^{-1} \times 10^4)$	ترتیب صوت (m/s)	چگالی (kg/m ³)	جدول باتک	چگالی (kg/m ³)	جدول جرمی
Al	۶۶۰	۱۳/۵	۵۰۰	۳۵	۲۷۰	۲۷۰	۷
Cu	۱۰۸۳	۳۴/۰	۳۸۱	۳۴	۸۹۳	۸۹۳	۱۴۰
SS304	۱۴۵۰	۳۴/۷	۴۳۴	۳۰	۸۰۰	۸۰۰	۱۵۱
Ck45	۱۴۵۰	۳۵/۸	۴۵۵	۲۹	۷۸۷	۷۸۷	۱۶۳
St 321	۱۴۲۵	۳۴/۹	۴۳۵	۲۷	۸۰۲	۸۰۲	۱۵۲
In 718	۱۳۳۶	۳۳/۵	۴۰۹	۳۵	۸۱۹	۸۱۹	۱۳۷
H13	۱۴۲۷	۳۳/۲	۴۲۱	۳۰	۷۸۷	۷۸۷	۱۴۰
Ni	۱۴۵۰	۴۳/۶	۴۹۰	۳۱	۸۹۰	۸۹۰	۱۸۰
St	۱۵۴۰	۳۷/۷	۴۸۰	۰/۳	۷۸۵	۷۸۵	۱۵۲

ناپایداری در فصل مشترک دو جریان موازی با سرعت نسبی بین یکدیگر به‌عنوان یکی از مکانیسم‌های تشکیل موج در جوشکاری انفجاری پذیرفته شده است. این امر باعث ایجاد تغییرات موضعی در فشار می‌شود که منجر به ایجاد گردابه‌ها در سطح مشترک اتصال می‌شود. جریان مواد این گرداب‌ها را به حرکت درمی‌آورد. در ادامه مکانیسم، آن‌ها به یک گرداب ناپایدار تبدیل می‌شوند و به‌صورت مارپیچی، می‌پیچند [۲۳-۲۴]. این واقعیت که تفاوت عدم امپدانس بین مواد ممکن است بر مسیر موج ضربه، رفتار و توزیع در سطح مشترک تأثیر بگذارد، نشانه‌ای از این است که می‌تواند بر

جدول (۲): مقدار IMP محاسبه شده برای اتصال‌های مختلف.

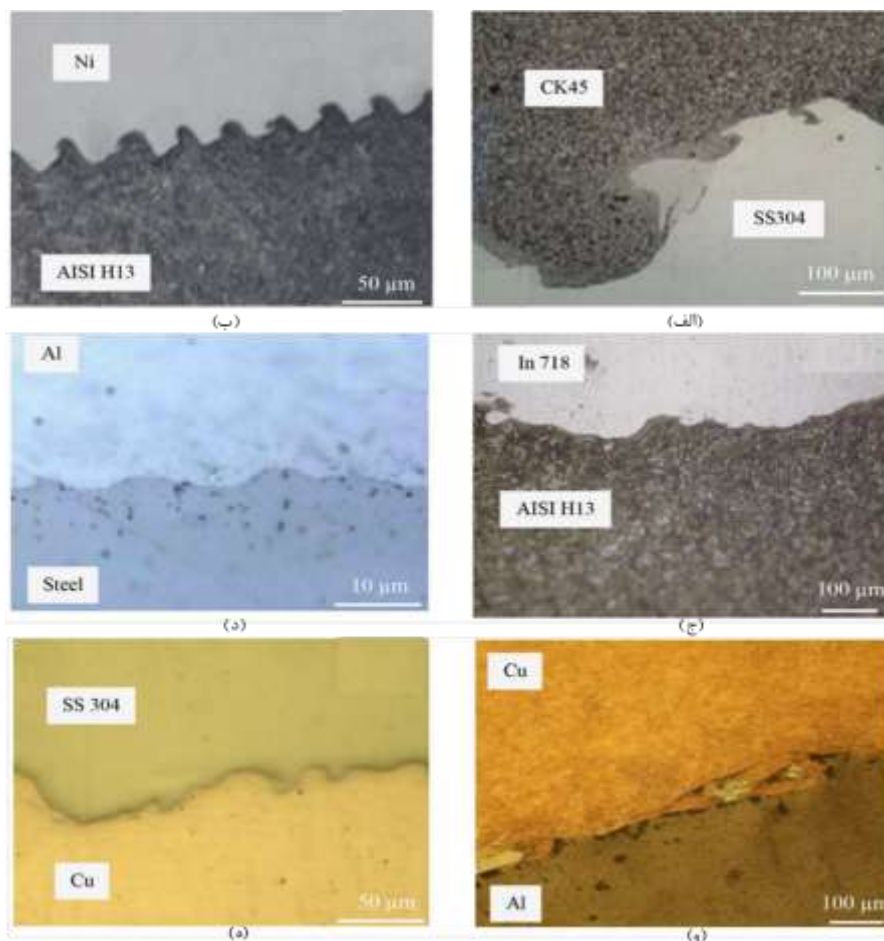
کد نمونه	ترکیب	$Z (kg m^{-2} s^{-1} \times 10^6)$		IMP	نوع موج	مرجع
		پایه	پرنده			
۱	SS304	CK45	۳۴/۷	۰/۹۶	معمولی	[۲۷]
۲	Ni	H13	۴۳/۶	۱/۳۱	معمولی	[۲۸]
۳	In 718	H13	۳۳/۵	۱/۰۱	معمولی	[۲۹]
۴	Al	St	۱۳/۵	۰/۳۶	خم شده	[۳۰]
۵	Al	Cu	۱۳/۵	۰/۳۹	خم شده	[۳۱]
۶	Cu	SS304	۳۴/۰	۰/۹۸	معمولی	[۳۲]



شکل (۲): پارامتر عدم تطابق امپدانس (IMP) برای ترکیبات مختلف جوش‌های غیر مشابه.

تصاویر شامل دو گروه می‌باشند: یک گروه دارای فصل مشترک با امواج خم شده (موجی شکل) و گروه دیگر دارای فصل مشترک با امواج معمولی هستند.

در شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به اتصالات جوشکاری انفجاری اشاره شده در جدول (۲) نشان داده شده است. در این شکل نیز همان‌طور که مشخص است.



شکل (۳): تصاویر میکروسکوپ نوری فصل مشترک‌های جوشکاری انفجاری مربوط به نمونه‌های جدول (۲): الف تا ه به ترتیب تصاویر نمونه‌های ۱ تا ۶.

فصل مشترک در جوشکاری انفجاری تحت تأثیر چندین جنبه به هم پیوسته است که تجزیه و تحلیل آن را بسیار مهم می‌کند. علاوه بر پارامترهای جوشکاری، خصوصیات

فیزیکی نیز از اهمیت بالایی برخوردار هستند؛ زیرا تقریباً بر هر جنبه‌ای از به دست آوردن مورفولوژی فصل مشترک و کیفیت جوش تأثیر می‌گذارند. چگالی مستقیماً بر انرژی جنبشی حاصل، هدایت حرارتی بر توزیع دما و دمای ذوب بر تغییر شکل، حضور ذوب و تشکیل فازهای بین فلزی در سطح مشترک تأثیر می‌گذارند. این عوامل به هم پیوسته بر انرژی منتقل شده به فرآیند، تغییر شکل، انتقال حرارت، برهم کنش متالورژیکی و در نتیجه مورفولوژی نهایی و کیفیت کلی جوش تأثیر می‌گذارند. یکی از راه‌های تجزیه و تحلیل این اثرات، ارتباط دادن خواص فیزیکی به مشاهدات تجربی برای بررسی تغییرات در نتایجی است که ممکن است به یکی از ویژگی‌ها مرتبط باشد [۲۲-۲۳]. محققان ادعا می‌کنند که در جوشکاری انفجاری هر چه اختلاف بین چگالی دو جزء بیشتر باشد، اتصال دشوارتر می‌شود [۲۰ و ۲۵].

تفاوت در چگالی و دمای ذوب بین صفحه پرنده و صفحه پایه ممکن است باعث تغییر مورفولوژی سطح مشترک شود. جدول (۳) همبستگی احتمالی بین خواص فیزیکی و مورفولوژی‌های فصل مشترک برخی جوش‌های انفجاری غیرمشابه را از طریق فاکتور فصل مشترک موجی شکل نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد بر اساس رابطه (۵) قابل محاسبه است و از ضرب نسبت چگالی‌ها (ρ_r) و نسبت دمای ذوب (T_r) به دست می‌آید.

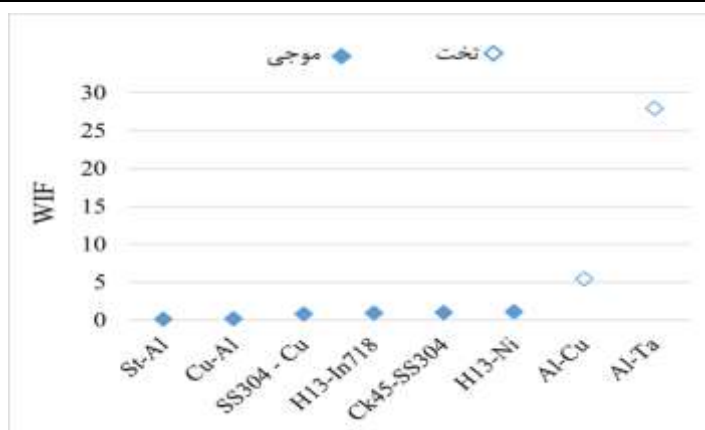
وقتی صفحه پرنده چگال‌تر از صفحه پایه و دارای نقطه ذوب بالاتر باشد، بالای یک حد نسبی معین، اختلاف مابین چگالی و نقطه ذوب جلوی شکل‌گیری امواج در فصل مشترک را می‌گیرد [۲۳ و ۲۶].

جدول (۳): مقدار فاکتور فصل مشترک موجی شکل (WIF)، محاسبه شده برای اتصال‌های مختلف.

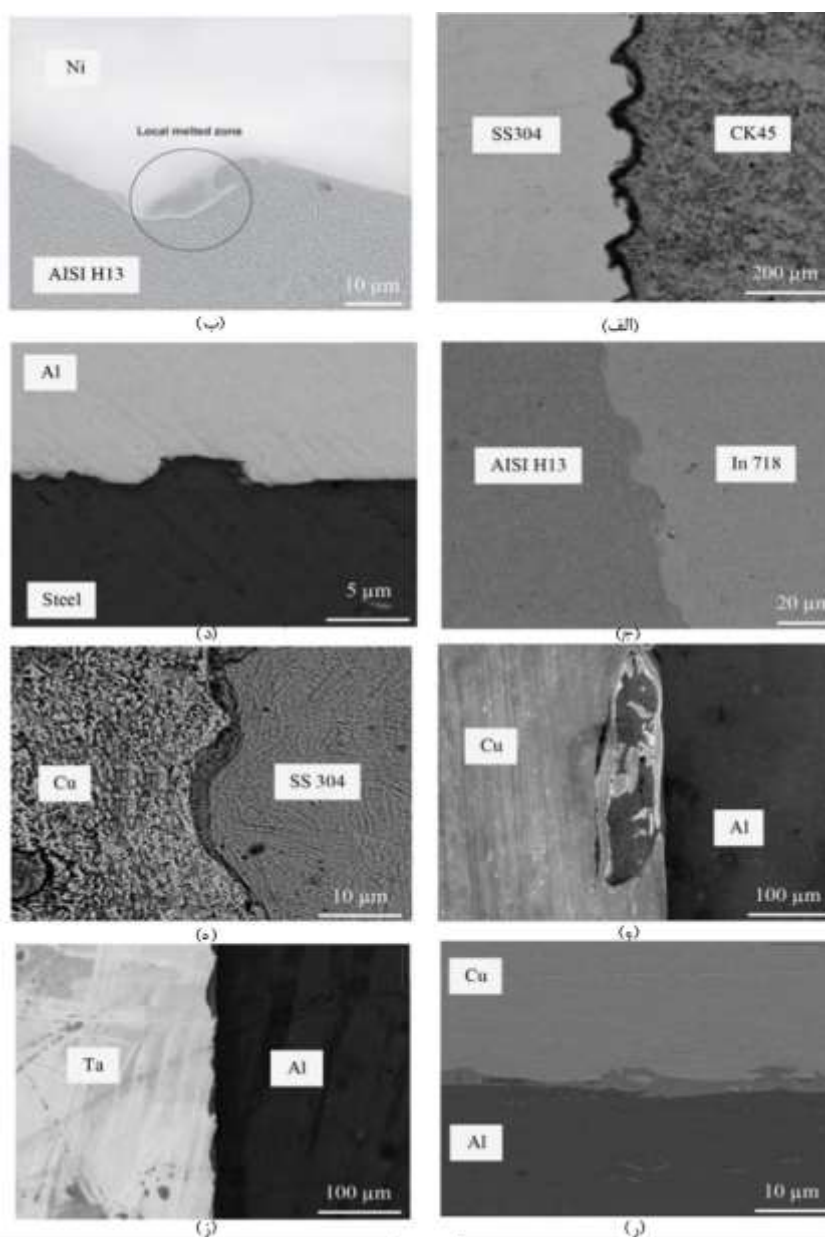
کد نمونه	ترکیب		Density (g/cm^3)		Density ratio " ρ_r "	Melting temp. ($^{\circ}\text{C}$)		WIF	شکل فصل مشترک	مرجع
	پایه	پرنده	پایه	پرنده		پایه	پرنده			
۱	SS304	CK45	۸/۰۰	۷/۸۷	۱/۰	۱۴۵۰	۱۴۹۵	۰/۹۶	موجی	[۲۷]
۲	Ni	H13	۸/۹۰	۷/۸۷	۱/۱	۱۴۵۵	۱۴۲۷	۱/۰۱	موجی	[۲۸]
۳	In 718	H13	۸/۱۹	۷/۸۷	۱/۰	۱۳۳۶	۱۴۲۷	۰/۹۳	موجی	[۲۹]
۴	Al	St	۲/۷۰	۷/۸۵	۰/۳	۶۶۰	۱۵۴۰	۰/۴۲	موجی	[۳۰]
۵	Al	Cu	۲/۷۰	۸/۹۳	۰/۳	۶۶۰	۱۰۸۳	۰/۶۰	موجی	[۳۱]
۶	Cu	SS304	۸/۹۳	۸/۰۰	۱/۱	۱۰۸۳	۱۴۵۰	۰/۷۴	موجی	[۳۲]
۷	Cu	Al	۸/۹۳	۲/۷۰	۳/۳	۱۰۸۳	۶۶۰	۱/۶۰	تخت	[۳۳]
۸	Ta	Al	۱۶/۶۰	۲/۷۰	۶/۱	۲۹۹۶	۶۶۰	۴/۵۳	تخت	[۳۴]

شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب نمودار فاکتور فصل مشترک موجی شکل و تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها با

فصل مشترک موجی و تخت در اتصال‌های مختلف جوشکاری انفجاری را نشان می‌دهند.



شکل (۴): فاکتور فصل مشترک موجی شکل (WIF) برای ترکیبات مختلف جوش‌های غیر مشابه.



شکل (۵): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک موجی و تخت جوشکاری انفجاری مربوط به نمونه‌های جدول (۳): الف تا ز به ترتیب

تصاویر نمونه‌های ۱ تا ۸

در این تحقیق تأثیر خواص فیزیکی و مکانیکی فلزات پایه و پرنده بر مورفولوژی فصل مشترک جوش‌های انفجاری مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

۱- مورفولوژی فصل مشترک اتصال به شدت تحت تأثیر خواص فیزیکی و مکانیکی صفحه پرنده و صفحه پایه است.
۲- نتایج نشان می‌دهد که شکل امواج تحت تأثیر عدم تطابق امپدانس ضربه مواد جوش داده شده است. پارامتر عدم تطابق امپدانس (IMP) ثابت کرد که یک روش قانع کننده برای به منظور تخمین تمایل به تشکیل امواج صاف یا امواج موجی شکل است.

۳- مشخص شد که جوش پذیری جفت‌های غیر مشابه به شدت تحت تأثیر خواص فیزیکی مواد است، اما بیشتر به عدم تطابق ویژگی‌های موادی که جوش داده می‌شوند بستگی دارد تا ارزش خود خواص. هنگامی که تفاوت قابل توجهی در هدایت حرارتی بین صفحه پرنده و صفحه پایه وجود دارد، جوش پذیری آن جفت مواد اغلب ضعیف است.

۴- مشخص شد که وقتی صفحه پرنده از صفحه پایه متراکم تر است، اختلاف چگالی قوی (ρ_R بالاتر از $3/3$) می‌تواند از تشکیل یک فصل مشترک موج دار جلوگیری کند. همچنین اگر دمای ذوب صفحه پرنده به طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از صفحه پایه باشد (T_R بالاتر از $1/60$)، همین اتفاق رخ می‌دهد.
۵- نتایج محاسبه شده برای WIF نشان داد که با افزایش این فاکتور به مقدار بالاتر از $5/44$ ، ظاهر فصل مشترک به صورت تخت می‌شود.

۵- مراجع

- [1] C. G. Shi, W. A. N. G. L. S. Yu, Zhao, H. B. Hou & Y. H. Ge, "Detonation mechanism in double vertical explosive welding of stainless steel/steel", Journal of Iron and Steel Research, International, vol. 22, pp. 949-953, 2015.
- [2] D. Ji & G. Wei, "MD Simulation of diffusion behaviors in collision welding processes of Al-Cu, Al-Al, Cu-Cu", Computers, Materials & Continua, vol. 79, 2024.
- [3] P. Kumar, M. Singh, S. Saravanan, S. Kumari, S. K. Ghosh, J. D. Barma, R. B. Meitei & A. Biswas, "Study of explosive welding of Al 5052 and Al 1100

همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است با افزایش مقدار WIF شکل فصل مشترک به صورت تخت تمایل پیدا می‌کند و برعکس با کاهش مقدار WIF شکل فصل مشترک به صورت موجی می‌شود؛ بنابراین، ممکن است که تفاوت در چگالی و دمای ذوب بین صفحه پرنده و صفحه پایه، مورفولوژی سطح مشترک را تحت تأثیر قرار دهد. علی‌رغم اینکه جوش‌های با خط اتصال مستقیم همیشه دارای صفحه پرنده با چگالی و دمای ذوب بالاتر از صفحه پایه هستند، جوش‌های انفجاری با مقدار برعکس دمای ذوب وجود دارند که منجر به ایجاد خطوط پیوند صاف نمی‌شوند. برای مثال مقایسه داده‌های اتصال مس (صفحه پرنده) / آلومینیوم (صفحه پایه) و اتصال آلومینیوم (صفحه پرنده) / مس (صفحه پایه) در جدول (۳) و شکل‌های (۴) و (۵) این نکته را نشان می‌دهد. با این حال، نسبت بین تراکم صفحه پرنده و صفحه پایه در جوش‌های موج همیشه برابر یا کمتر از $1/11$ بود. برای دمای ذوب، نسبت همیشه زیر $1/1$ بود.

مشاهده می‌شود که بین جوش‌هایی که فصل مشترک صافی (WIF بالاتر) و جوش‌هایی که فصل مشترک موج دارند (WIF پایین)، تفاوت واضحی وجود دارد. تجزیه و تحلیل موجود در شکل (۵) محدودیت‌هایی دارد؛ زیرا از اطلاعات تحقیقات متنوعی استفاده شده است. با این حال، نتایج این تحقیق رویکرد جالبی را پیشنهاد می‌دهند و قادر به پیش‌بینی مورفولوژی فصل مشترک هستند. همچنین به درک بهتر از دلایلی که باعث می‌شود ناحیه اتصال در برخی موارد موج دار و در دیگر موارد صاف باشد، کمک می‌کنند. ضریب فصل مشترک جوش به طور مستقیم نشان نمی‌دهد که فصل مشترک اتصال موجی یا صاف خواهد بود، بلکه نشان‌دهنده امکان وجود خط اتصال موجی شکل است. به عبارت دیگر، بالاتر از یک مقدار مشخص و حتی با استفاده از پارامترهای مناسب جوش، جوش موج دار نخواهد بود و به طور معکوس، با مقداری کمتر از آن ممکن است فصل مشترک اتصال موج دار یا صاف باشد و این به پارامترهای جوشکاری بستگی دارد.

۴- نتیجه گیری

سه لایه ضخیم AlMg5-Al-Steel "مجله علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۹، شماره ۳، ص ۱-۱۱، ۱۳۹۴.

[12] S. Saravanan "An experimental investigation on the explosive plugging of similar and dissimilar steel tubes", *Welding International*, vol. 38, pp. 128-39, 2024.

[13] H. Zhang, K. Jiao, J. L. Zhang & J. Li, "Microstructure and mechanical properties investigations of copper-steel composite fabricated by explosive welding", *Materials Science and Engineering, Proc. Conf.*, 731, 278–287, 2018.

[14] V. T. Nguyen, V. T. Nhu & X. T. Vo, "Explosive weld joint characteristics of copper-tantalum via simulation", *Computers in Biology and Medicine*, vol. 174, pp. 108471, 2024.10.1016/j.compbiomed.2024.108471.

[15] Z. Nyikes & T. Anna Kovács, "Experimental study of the explosive welding process applicability for train weight decreasing", *Transportation Research Procedia*, vol. 63, pp. 2523-2528, 2022.

[16] M. Wang, J. Hu, K. Li, N. Luo, X. Li, X. Chen & Z. Chen, "Study on the relationship between interface morphology and mechanical properties of explosive welded titanium/duplex stainless steel", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 19, pp. 1-20, 2024.

[17] Gh. Khalaj & A. Fadaei, "Effect of post weld heat treatment on the structure and mechanical properties of explosive welding of austenitic steel 321 - aluminum 1050 – aluminum 5083", *Journal of Welding Science and Technology of Iran*, vol. 9, pp. 102-112, 2023.

[18] B. Crossland & J. D. Williams, "Explosive welding", *Metall*, vol. 15, pp. 79-100, 1970.

[19] M. Hammerschmidt & H. Kreye, "Microstructure and bonding mechanism in explosive welding", In: Meyers, M.A. Murr, L.E. (eds) *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals*. Springer, Boston, MA. 1981.

[20] A. S. Bahrani, "The mechanics of wave formation in explosive welding", *Mathematical and Physical Sciences*, vol. 296, pp. 123–36, 2023.

[21] B. B. Sherpa, M. Yu, D. Inao, S. Tanaka & K. Hokamoto, "Explosive welding of aluminum and cast iron for potential transportation and structural applications", *Advanced Engineering Materials*, vol. 26, pp. 2301389, 2024.

with stainless steel wire mesh interlayer", *Materials Today: Proceedings*, 2023.

[۴] ح. بختیاری، م. ر. خانزاده قره شیران و س. ع. ا. اکبری موسوی، "تأثیر عملیات حرارتی بر روی ریزساختار، سختی و استحکام فصل مشترک جوش انفجاری فولاد زنگ نزن ۳۲۱ به آلومینیم ۱۲۳۰" *مجله علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۹، شماره ۴، ص ۲۷-۴۱، ۱۳۹۳.*

[5] D. Rozumek & G. Kwiatkowski, "The influence of heat treatment parameters on the cracks growth under cyclic bending in St-Ti clad obtained by explosive welding", *Metals*, vol. 9, pp. 338-352, 2019.

[6] I. Kwiecien, P. Bobrowski, M. Janusz-Skuza, A. Wierzbicka-Miernik, A. Tarasek, Z. Szulc & J. Wojewoda-Budka, "Interface characterization of ni/al bimetallic explosively welded plate manufactured with application of exceptionally high detonation speed", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 29, pp. 6286-6294, 2020.

[۷] ع. ابراهیمی اکبرآبادی، ع. سعادت، م. ر. خانزاده و ح. بختیاری "بررسی تأثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری بر خواص خوردگی فصل مشترک اتصال انفجاری ورق‌های Cu/SS 304" *مجله فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۷، شماره ۴، ص ۵۱-۶۵، ۱۴۰۲.*

[8] A. Rouzbeh, M. Sedighi & R. Hashemi, "Comparison between explosive welding and roll-bonding processes of AA1050/Mg AZ31B bilayer composite sheets considering microstructure and mechanical properties", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 29, pp. 6322-6332, 2020.

[9] V. Korzhyk, Y. Zhang, V. Khaskin, O. Ganushchak, V. Kostin, V. Kvasnytskyi, A. Perepichay & A. Grynyuk, "Features of intermetallic formation in the solid phase on a steel-titanium bimetal interface under the conditions of arc welding", *Metals*, vol. 13, pp. 1338-1347, 2023.

[10] J. Yuan, F. Shao, L. Bai, H. Zhang, Q. Xu, L. Gao & Y. Pan, "Interface investigation of Ti/Al Explosively Welded Composites with 1060 interlayer: morphology, formation, and development", *Composite Interfaces*, vol. 32, pp. 201-222, 2023.

[۱۱] م. ر. خانزاده، ا. اکرامی و ح. عربی، "مقاله بررسی تأثیر فاصله توقف بر مورفولوژی و خواص مکانیکی فصل مشترک اتصال انفجاری صفحات

Hot work to steel plates in salty environment", *Journal of Environmental Friendly Materials*, vol. 2, pp. 21-27, 2018.

[30] M. R. Khanzadeh Gharah Shiran, H. Bakhtiari, M. Ghafari, S. Rajaei & M. Mohammadnejad, "Investigation of stand-off distance effect on corrosion behavior of explosively welded joint between tow aluminum plate and steel", *International Journal of ISSI*, vol. 15, pp. 9-18, 2018.

[31] H. Bakhtiari, H. Abbasi, H. Sabet, M. R. Khanzadeh & M. Farvizi, "Investigation on the effects of explosive welding parameters on the mechanical properties and electrical conductivity of Al-Cu bimetal", *Journal of Environmental Friendly Materials*, vol. 6, pp. 31-37, 2022.

[32] R. Peykari, M. R. Khanzadeh & H. Bakhtiari, "The effect of explosive welding variables on corrosion of copper-304 stainless steel in high salt concentration environment", *Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*, vol. 14, 2022.

[33] A. Loureiro, R. Mendes, J. B. Ribeiro, R. M. Leal & I. Galvão, "Effect of explosive mixture on quality of explosive welds of copper to aluminium", *Materials and Design*, vol. 95, pp. 256–267, 2016.

[34] B. A. Greenberg, M. A. Ivanov, V. V. Rybin, O. A. Elkina, O. V. Antonova, A. M. Patselov, A. V. Inozemtsev, A. V. Plotnikov, A. Volkova, & P. Besshaposnikov, "The problem of intermixing of metals possessing no mutual solubility upon explosion welding (Cu-Ta, Fe-Ag, Al-Ta)", *Materials Characterization*, vol. 75, pp. 51-62, 2013.

[22] G. H. S. F. L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R. M. Leal & A. Loureiro, "Explosive welding of aluminium to stainless steel using carbon steel and niobium interlayers", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 283, pp. 116707, 2020.

[23] G. H. S. F. L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R. M. Leal & A. Loureiro, "The role of physical properties in explosive welding of copper to stainless steel", *Defence Technology*, vol. 22, pp. 88-98, 2023.

[24] M. A. Salvador, F. Espinosa-Loza, J. W. Elmer & R. Huber, "Comparison of Cu, Ti and Ta interlayer explosively fabricated aluminum to stainless steel transition joints for cryogenic pressurized hydrogen storage", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 1490-1503, 2015.

[25] B. S. Zlobin, V. V. Kiselev & A. A. Shtertser, "Effect of mechanical properties of materials on wave formation in explosive welding", *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 55, pp. 439–446, 2019.

[26] G. H. S. F. L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R. M. Leal & A. Loureiro, "Effect of the flyer material on the interface phenomena in aluminium and copper explosive welds", *Materials and Design*, vol. 122, pp. 172-183, 2017.

[27] M. R. Khanzadeh Gharah Shiran, S. J. Mohammadi Baygi, S. R. Kiahoseyni, H. Bakhtiari & M. Allah Dadi, "Effects of heat treatment on the microstructure and metallurgical properties of the explosively bonded 304 stainless steel—CK45 steel", *International Journal of Damage Mechanics*, pp. 1-19, 2016.

[28] M.R. Khanzadeh, S. A. A. Akbari Mousavi, A. Amadeh & G. H. Liaghat, "Correlation between numerical finite element simulation and experiments for explosive cladding of nickel base super alloy on hot tool steel", *Strain*, vol. 48, pp. 342–355, 2012.

[29] A. Norbakhsh, M. R. Khanzadeh, A. Saadat & H. Bakhtiari, "Investigating the effect of explosive welding variables on the corrosion behavior of explosive joint of two-layered inconel 718-AISI H13

۶- پی‌نوشت

- [1] Impedance Mismatch Parameter (IMP)
- [2] Wave Interface Factor (WIF)
- [3] Crossland & Williams
- [4] Hammer Schmidt
- [5] Kreye
- [6] Amatol
- [7] TNT
- [8] Buffer