

بررسی جوش کاری انفجاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به فولاد گرمکار AISI H13

محمد رضا خانزاده قره شیران*^۱، سیدعلی اصغر اکبری موسوی^۲، احمد علی آماده^۳، غلامحسین لیاقت^۴

۱- تهران - دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۲ و ۳- تهران - دانشگاه تهران

۴- تهران - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ وصول: ۹۰/۶/۱۲، تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۰/۱۳)

چکیده

پوشش دهی فولاد گرمکار کوئنچ تمپر شده AISI H13 با سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش جوش کاری انفجاری انجام شده است. آزمون های انفجاری توسط ماده منفجره آماتول در فاصله های توقف و بارهای انفجاری متفاوت صورت پذیرفته است. کلیه آزمون ها توسط نرم افزار ABAQUS/Explicit مورد شبیه سازی و تحلیل قرار گرفته اند. هم چنین بررسی های متالوگرافی نوری، میکروسکوپی الکترونی روبشی، ریز سختی سنجی و استحکامی بر روی کلیه نمونه های اتصال یافته صورت پذیرفته است. نتایج شبیه سازی نمایانگر ایجاد منطقه ای با تغییر شکل پلاستیکی شدید در منطقه برخورد می باشد. هم چنین با افزایش میزان فاصله توقف و یا بار انفجاری، زاویه دینامیکی برخورد و سرعت برخورد صفحه پرنده افزایش یافته است. شکل فصل مشترک های حاصله بر اساس تغییرات انرژی جنبشی مصرفی در فصل مشترک، به دو صورت موجی و موجی همراه با گردابه در فصل مشترک اتصال ایجاد شده است. طول امواج فصل مشترک بر اثر تغییرات زاویه دینامیکی برخورد در هنگام اتصال ورق ها تغییر نموده و سختی با نزدیک شدن به فصل مشترک اتصال افزایش یافته است که این تغییرات سختی به طور شدیدیتری در سمت سوپر آلیاژ مشاهده شده است. استحکام برشی فصل مشترک تابع مورفولوژی فصل مشترک و دامنه امواج تغییر نموده است. به کمک نتایج شبیه سازی و روابط، پنجره جوش کاری انفجاری دو آلیاژ رسم و مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: جوش کاری انفجاری، فاصله توقف، بار انفجاری، زاویه دینامیکی برخورد، استحکام برشی، پنجره جوش کاری، انرژی جنبشی مصرفی.

۱- مقدمه

جنس فولادهای گرمکار در شرایط کوئنچ-تمپر شده، ساخته می شوند.

فولادهای گرمکار کروم دار مانند AISI H13، تحت این شرایط کاری به

دلیل خواص مقاومت سایشی مناسب، مقاومت به شوک حرارتی و

*E-mail: m.khanzade @ut.ac.ir

قالب های فورج گرم تحت شرایط کاری نظیر خستگی، نیروهای

مکانیکی، حرارتی، سایش قرار دارند [۱-۳]. این قالب ها معمولاً از

۱- دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی مواد

۲- دانشیار

۳ و ۴- استاد

اما فرایند جوش کاری انفجاری تنها می‌تواند برای اتصال دهی شکل‌های ساده مانند صفحات و سطوح مسطح یا سطوح استوانه‌ای هم محور نظیر روکش دهی چکش‌های ساده آهنگری به کار رود. این تحقیق تأثیر متغیرهای فاصله توقف، بار انفجاری بر مورفولوژی و خواص استحکامی فصل مشترک اتصال انفجاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به فولاد گرمکار AISI H13 را مورد بررسی قرار می‌دهد. هم چنین به کمک شبیه سازی و روابط، پنجره جوش کاری انفجاری این دو آلیاژ رسم شده و مورد بررسی واقع شده است.

۲- بخش تجربی

ورق‌های اینکونل ۷۱۸ در شرایط آنبیل محلولی و فولاد گرمکار کروم دار کوئنچ- تمپر شده AISI H13 به ترتیب به عنوان صفحه پرند و پایه انتخاب شدند. صفحه‌های فولاد گرمکار قبل از جوشکاری تحت سیکل عملیات حرارتی به شرح زیر قرار گرفتند: ابتدا در دمای ۳۵۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد برای یک ساعت پیش گرم شده، مجدداً به مدت ۲ ساعت در محدوده ۳۵۰-۵۵۰ درجه سانتی‌گراد پیش گرم شده است. پس از آن در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره به مدت ۴۵ دقیقه جهت آستنیت‌شدن حرارت دیده، سپس در حمام نمک به مدت ۱۵ دقیقه کوئنچ شده و در هوا سرد شدند. به مدت ۳ ساعت در ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد تمپر شده و دوباره در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت تمپر ثانویه شده و در هوا تا دمای اتاق خنک شدند. آنالیز شیمیایی ورق‌ها به روش اسپکترومتری نوری انجام شد و خواص مکانیکی و سختی آن‌ها با آزمون کشش و سختی سنجی بر اساس استانداردهای ASTM E8M و ASTM E92 تعیین شد. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی این ورق‌های ۱۰۰ mm به ترتیب در جدول‌های (۱ و ۲) نشان داده شده‌اند. صفحات پرند و پایه به ابعاد ۱۳۰ mm × ۱۳۰ mm × ۳/۲ mm و ۱۰۰ mm × ۱۰۰ mm × ۱۰۰ mm آماده شدند.

مکانیکی مناسب، چقرمگی و مقاومت به نرم شدن در دمای بالا یک انتخاب مناسب می‌باشند [۴]. جهت کاهش ساییش و بهبود خواص دمای بالا، این فولادها عمدتاً توسط لایه‌ای از مواد با قابلیت استحکام و سختی بالا در دمای بالا پوشش دهی می‌شوند. سوپر آلیاژهای پایه نیکل به دلیل حفظ خواص خوردگی و استحکام دمای بالا به عنوان یکی از مواد پوشش دهی این قالب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵]. فرآیندهای جوش کاری ذوبی به عنوان یکی از پر کاربردترین فرآیندهای پوشش دهی این قالب‌ها مرسوم می‌باشند. در بین این روش‌ها، روش‌هایی با میزان حرارت ورودی، رقت، جدایش، اعوجاج، تنش‌های پسماند کمتر بهترین خواص را نشان داده‌اند [۶].

پوشش دهی ذوبی فولاد گرمکار به دلیل میزان کربن بالا و عناصر آلیاژی آن مشکل بوده و نیازمند تمهیدات ویژه‌ای نظیر کنترل پیش گرم، پس گرم، نرخ سرعت سرد شدن، انتخاب الکتروود کم هیدروژن می‌باشد [۶ و ۵]. به علاوه پوشش دهی ذوبی سوپر آلیاژهای پایه نیکل نیز دارای مشکلاتی نظیر امکان ترک گرم انجمادی، جدایش، رسوبات ترد می‌باشد [۷-۹]. جوش کاری انفجاری فرآیند حالت جامد است که با استفاده از انفجار یک ماده منفجره، صفحه پرند^۱ در فاصله توقف معینی شتاب گرفته و به صفحه پایه^۲ برخورد نموده و اتصال ایجاد می‌شود. در مقایسه با فرآیندهای ذوبی، در این فرآیند رقت ورق‌ها صورت نگرفته، و امکان پوشش دهی مناسب‌تر و اتصال فلزات حساس به ترک هیدروژنی و ترک گرم انجمادی امکان پذیر می‌باشد. هم چنین قابلیت پوشش دهی کامل سطوح و حذف امکان ایجاد ترکیبات بین فلزی و رسوبات ترد با استفاده از این فرآیند امکان پذیر است [۱۱ و ۱۰]. پارامترهای جوش کاری انفجاری نظیر فاصله توقف و بار انفجاری، تأثیر مستقیمی بر مورفولوژی فصل مشترک و استحکام و سختی باند اتصال دارد و خواص مکانیکی فصل مشترک تابع شکل و خواص فصل مشترک گزارش شده است [۱۳ و ۱۲].

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژهای مورد استفاده.

عناصر	Ti	V	Mn	Nb	Fe	Mo	Ni	Cr	Si	C
AISI H13	۰.۰۴۰	۰/۸۲	۰/۳۵	-	پایه	۱/۱۴	۰/۱۲	۵/۰۹	۱/۰۵	۰/۴۲
Inconel ۷۱۸	۰/۹۵	۰/۰۳۳	۰/۰۵	۴/۷۵	۱۹/۸	۳/۰۲	پایه	۱۸/۵۵	۰/۰۲	۰/۰۶

1- Flyer Plate
2- Base Plate

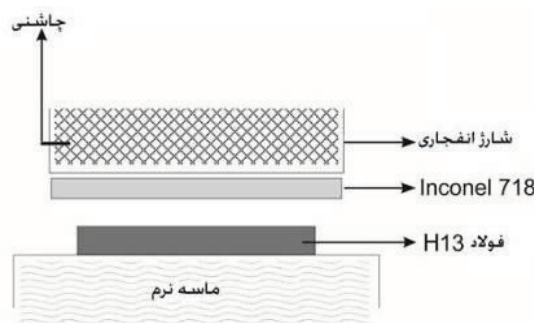
جدول ۲- خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژهای مورد استفاده.

مواد	مدول الاستیک (GPa)	مدول حجمی (GPa)	سختی (ویکرز)	تنش تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)	چگالی (kg/m ³)	سرعت حجمی صوت (m/s)
AISI H13	۲۱۱	۱۵۹/۸۵	۴۵۰	۶۰۶	۱۳۴۶	۷۸۰۰	۴۵۲۷
۷۱۸Inconel	۲۰۶	۱۶۳/۵	۳۵۰	۴۹۷	۸۸۵	۸۱۹۰	۴۴۶۸

جدول ۳- خصوصیات تنظیمی آزمون‌های صورت پذیرفته و فصل مشترک‌های حاصله.

آزمون	انرژی جنبشی مصرفی (MJ/m ²)	سرعت حرکت نقطه برخورد (m/s)	میانگین دامنه امواج (میکرون)	میانگین طول امواج (میکرون)	شکل فصل مشترک	زاویه دینامیکی برخورد (درجه)	سرعت برخورد صفحه پرنده (m/s)	بار انفجاری (R)	فاصله توقف (mm)
۱	۴/۱۸	۳۶۰۹	۷۵	۱۳	موجی	۸/۵۶	۶۱۵	۲	۲
۲	۸/۷	۳۵۷۴	۱۰۸	۱۹	موجی تیز همراه کمی گردابه	۱۱/۶۷	۹۴۳	۲	۴
۳	۴/۷۱	۳۶۰۲	۸	۶	موجی کوتاه	۹/۳	۶۲۸	۲/۵	۲
۴	۶/۳۵	۳۵۹۰	۲۵	۷	موجی کوتاه با گردابه	۱۰/۳۴	۸۰۵	۲/۵	۳
۵	۹/۱۷	۳۵۳۲	۱۲۸	۳۳	موجی گردابه	۱۴/۵۸	۹۶۷	۲/۵	۴

توسط نرم افزار المان محدود ABAQUS/Explicit مورد طراحی و شبیه سازی قرار گرفتند.



شکل ۱- آرایش موازی مورد استفاده در آزمون‌های جوش کاری انفجاری.

معادله حالت ویلیامزبورگ [۱۷-۱۴]، جهت بررسی رفتار ماده منفجره و معادله‌های ساختاری جانسون-کوک جهت شبیه سازی رفتار صفحه‌ها مورد استفاده واقع شدند. ضرایب مورد استفاده معادله جانسون-کوک جهت شبیه سازی رفتار آلیاژها در جدول (۴) نشان داده شده‌اند. شکل (۲) نمایی از شبیه سازی برخورد دو صفحه پس از ۲۲ میکرو ثانیه از آغاز انفجار را نشان می‌دهد. مقادیر عددی سرعت

صفحه‌های فولادی پس از عملیات حرارتی کوئنچ- تمپر تحت عملیات سنگ زنی مغناطیسی قرار گرفته و صفحه‌های اینکونل به طور مکانیکی پولیش شدند. قبل از انجام جوش کاری نیز سطوح کلیه صفحه‌ها با محلول استون مورد تمیز کاری قرار گرفتند. ماده منفجره آماتول (ترکیب ۸۰ درصد نیترات آمونیوم و ۲۰ درصد TNT) با سرعت انفجاری ۳۶۵۰ متر بر ثانیه جهت آزمون‌ها انتخاب شد و در داخل یک جعبه چوبی با ابعاد مناسب در بالای صفحه پرنده مستقر شد. سیستم آرایش تنظیمی موازی که در شکل (۱) دیده می‌شود جهت فرآیند جوش کاری انتخاب شد. کل مجموعه جهت انجام آزمون انفجاری بر روی بستری از شن نرم قرار گرفت و تحریک انفجاری توسط چاشنی مناسب صورت پذیرفت. برای بررسی تأثیر متغیرهای عملی بر روی خواص مختلف اتصال، پنج آزمون انجام پذیرفت. نسبت بار انفجاری که نسبت وزن ماده انفجاری به صفحه پرنده می‌باشد و فاصله توقف بین صفحه‌ها، متغیرهایی بودند که در این آزمایش‌ها مورد تغییر قرار گرفتند. شرایط آزمون‌ها در جدول (۳) ملاحظه می‌شود.

جهت بررسی تأثیر بار انفجاری بر خواص فصل مشترک، کلیه آزمون‌ها

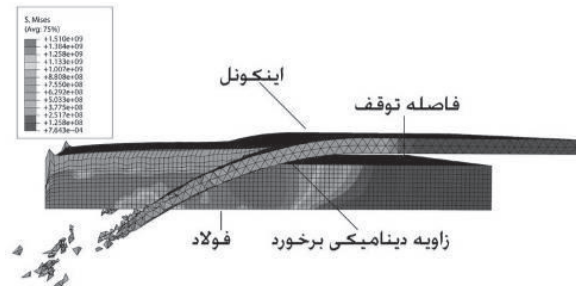
برای بررسی دقیق تر فصل مشترک، آنالیز الکترون برگشتی میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد.

۲-۲- بررسی استحکام اتصالات انفجاری

برای بررسی استحکام اتصالات جوشکاری انفجاری، استحکام برشی آن‌ها اندازه گیری می‌شود. برای این منظور طبق استاندارد DIN50162 نمونه‌های استحکام برشی آماده شدند [۱۸].

شماتیک آزمون و نمونه‌ها در شکل (۳) دیده می‌شوند. دو عدد نمونه موازی و عمود بر جهت انفجار از داخل نمونه‌های اتصال یافته مطابق استاندارد توسط وایر کات ساخته شدند. سپس با دستگاه کشش و قید و بند مخصوص که طراحی و ساخته شد. نمونه‌ها تحت فشار قرار گرفتند. ابتدا مساحت دقیق زائده اندازه گیری شده و پس از قرارگیری نمونه در فیکسچر، فشار با نرخ ۱ میلی‌متر بر دقیقه بر نمونه وارد می‌شود. تنش شکست بر اساس تقسیم ماکزیمم حد نیرو اعمالی بر مساحت زائده گزارش می‌شود. میانگین استحکام دو نمونه به عنوان استحکام نهایی گزارش شد.

برخورد صفحه پرنده و سرعت حرکت نقطه برخورد و زاویه دینامیکی برخورد نشان داده شده در جدول (۳) و فشار نقطه برخورد توسط شبیه‌سازی محاسبه شده‌اند.



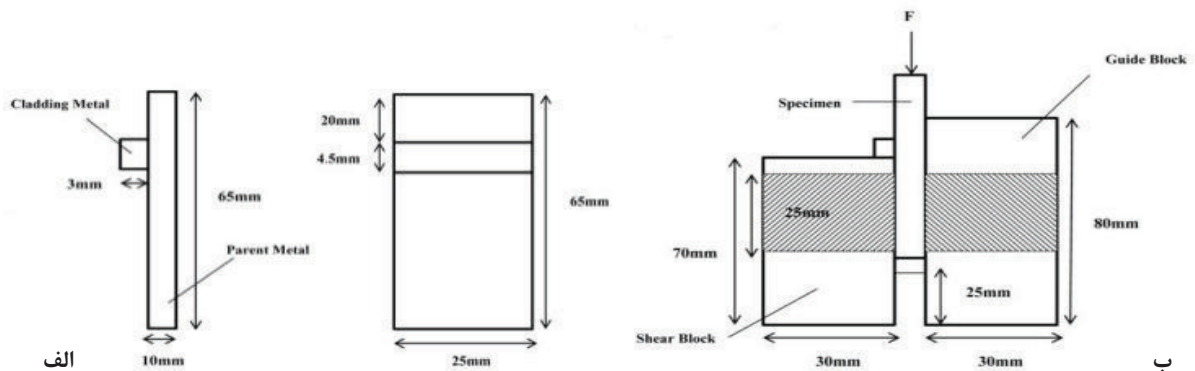
شکل ۲- نمایی از شبیه‌سازی برخورد دو ورق پس از ۲۲ میکروثانیه از آغاز انفجار.

۱-۲- بررسی‌های فلز شناسی فصل مشترک‌های اتصال

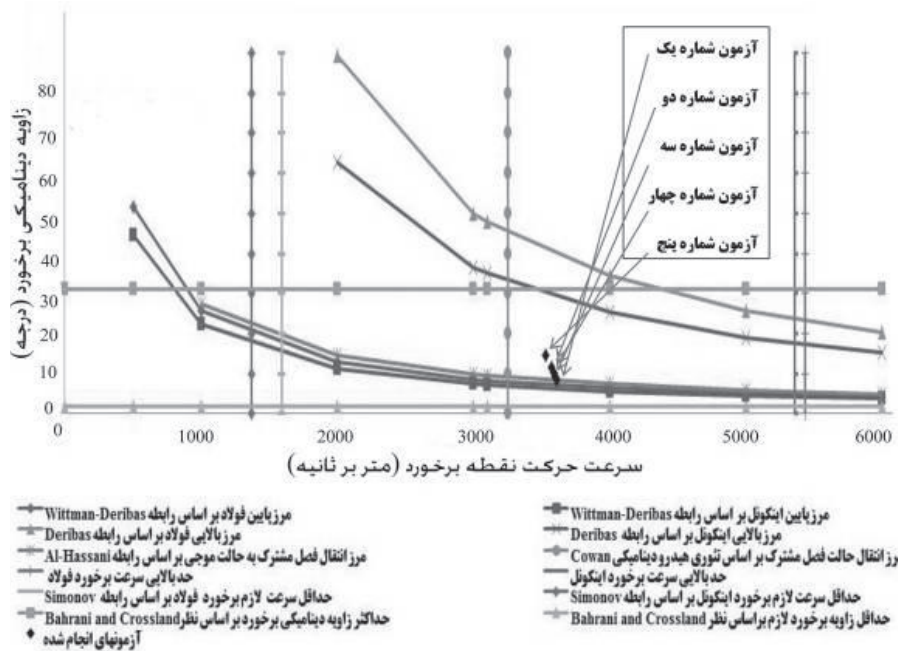
مقاطع انتخابی توسط دستگاه وایرکات به ابعاد یک سانتی متر در یک سانتی متر در جهت موازی با جبهه انفجار انتخاب شدند. که هر کدام از نمونه‌ها طی مراحل مختلف از سناده ۶۰ تا شماره ۱۲۰۰ ساییده شده و توسط خمیر الماسه پولیش شدند. برای بررسی ریز ساختاری، محلول حکاکی نایتال ۲ درصد برای فولاد و محلول حکاکی 60ml HCl+6gCuCl₂+5ml H₂O₂ برای اینکونل استفاده شد.

جدول ۴- ضرایب معادله جانسون - کوک ۱ آلیاژهای مورد استفاده [۲۰-۲۲].

مواد	A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	دمای ذوب (K)	نرخ کرنش (s ⁻¹)
اینکونل ۷۱۸	۴۵۰	۱۷۰۰	۰/۰۱۷	۰/۶۵	۰/۱۳	۱۵۷۰	۰/۰۰۱
AISI H13	۹۰۸/۵۴	۳۲۱/۳۹	۰/۰۲۸	۰/۳۷۸	۱/۱۸	۱۷۶۰	۱



شکل ۳- روش و نمونه آزمون استحکام برشی اتصال بر اساس استاندارد DIN50162 الف- نمونه آزمون ب- فیکسچر آزمون [۱۸].



شکل ۴- پنجره جوشکاری انفجاری اتصال سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸- فولاد H13.

۲-۳- بررسی سختی مقطع عرضی اتصالات

جهت تعیین میزان تأثیر فشار ناشی از انفجار بر روی مرز مشترک و مناطق اطراف آن، آزمون ریز سختی سنجی ویکرز با بار ۵۰ گرم در طول ۲ خط محور عمود بر فصل مشترک اتصال نمونه‌های پولیش شده و با فواصل ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ میکرون از فصل مشترک اتصال و در دو طرف آن انجام پذیرفت و با میانگین‌گیری نتایج، پروفیل ریز سختی بر حسب فاصله از فصل مشترک در تمامی نمونه‌ها رسم شد.

۳- رسم پنجره جوش کاری

در این تحقیق پنجره جوش کاری^۱ بر اساس زاویه دینامیکی برخورد (β) - سرعت حرکت نقطه برخورد (V_w) با کمک نتایج شبیه سازی رسم شد. که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود، آزمون‌های عملی انجام شده نیز بر روی آن مشخص شدند [۱۹].

۳-۱- تعیین مرز پایینی پنجره جوش کاری

طبق رابطه (۱)، زاویه دینامیکی حداقل برای ایجاد اتصال توسط دریاس^۲ ارایه شده است، در این رابطه H_p سختی صفحه پرنده بر

حسب Mpa و ρ دانسیته صفحه پرنده بر حسب kg/m^3 و V_w سرعت جوش کاری می‌باشد. k ضریبی ثابت با دامنه تغییرات $0.6-1/2$ در نظر گرفته شده و مرز پایینی با توجه به اطلاعات جدول (۲) و رابطه (۱) رسم شده که در شکل (۴) نشان داده شده است و به صورت یک منطقه در پنجره جوش کاری شکل (۴) ملاحظه می‌شود.

$$\beta = k_1 \sqrt{\frac{H_p}{\rho V_w^2}} \quad (1)$$

۳-۲- تعیین مرز بالایی پنجره جوش کاری

برای بدست آوردن مرز بالایی پنجره جوش کاری، از رابطه (۲)، ارایه شده توسط دریاس و همکارانش استفاده شد. که در این رابطه t_1 ضخامت صفحه مورد بررسی و k_3 برابر نصف سرعت صوت در مواد می‌باشد. با توجه به اطلاعات جدول (۲) این مرز رسم و در شکل (۴) نشان داده شده است.

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{k_3}{t_1^{0.25} V_w^{1/25}} \quad (2)$$

بر اساس پیشنهاد کراسلند^۳ و بهرانی^۴ حداکثر زاویه برخورد برای ایجاد اتصال برابر ۳۱ درجه و حداقل ۲ درجه بیان شده که از این پیشنهاد نیز برای رسم پنجره جوش کاری استفاده شده است [۱۹].

3- Crossland
4- Bahrani

1- Welding window
2- Deribas

۳-۳- تعیین مرز سمت راست پنجره جوش کاری

این مرز حد فاصل تشکیل و عدم تشکیل جت می‌باشد. عدم تشکیل جت زمانی حاصل می‌شود که سرعت جوش کاری از سرعت صوت در مواد جوش شونده (جدول ۲) بیشتر شود. حد ۱/۲ برابر سرعت صوت مواد به عنوان مرز سمت راست در نظر گرفته شده و در شکل (۴) نشان داده شده است.

۳-۴- تعیین مرز سمت چپ پنجره جوش کاری

جهت تعیین مرز سمت چپ پنجره جوش کاری از رابطه (۳) ارایه شده سیمونوف^۱ استفاده شده است [۱۹]، مقدار حداقل سرعت بدست آمده با در نظر گیری ضریب k_4 برابر ۱/۵ برای اینکونل و فولاد به ترتیب ۱۳۷۳ و ۱۵۹۵ متر بر ثانیه محاسبه شده و در پنجره شکل (۴) رسم شد.

$$V_w = k_4 \left(\frac{2H_p}{\rho} \right)^{0/5} \quad (3)$$

۳-۵- مرز انتقال فصل مشترک صاف به موجی

پیشنهاد کوان و همکارانش می‌تواند برای پیش بینی انتقال فصل مشترک صاف به موجی به کار رود. چنانچه عدد ۱۰/۶ به عنوان عدد رینولدز (R) فلزات استفاده و خواص مواد جوش شونده در رابطه (۴) جایگزین شود، سرعت انتقال از فصل مشترک صاف به موجی حاصل می‌شود [۱۹].

$$R = \frac{(\rho_p + \rho_b) V_t^2}{2(H_p + H_b)} \quad (4)$$

که در آن ρ_p و ρ_b چگالی صفحات پرنده و مادر و H_p , H_b سختی و یکرز صفحات مادر و پرنده می‌باشند.

سرعت بحرانی برای اتصال اینکونل- فولاد بر اساس رابطه (۴) برابر ۳۲۵۵ متر بر ثانیه محاسبه شده و در پنجره شکل (۴) نشان داده شده است. رابطه دیگری که از آن برای تعیین فصل مشترک صاف به موجی استفاده شده است رابطه (۵) الحسنی^۲ بوده که در آن D متغیر ثابت در دامنه تغییرات ۱/۷-۱/۵ پیشنهاد شده بوده، σ_y استحکام تسلیم صفحه پرنده و ρ چگالی صفحه پرنده و V_p و V_w به ترتیب سرعت برخورد و سرعت جوش کاری می‌باشند. با جانشین کردن داده‌های مربوط به مواد این ناحیه در پنجره جوش کاری شکل (۴) رسم شد.

$$\tan \beta = \sqrt{\frac{3D\sigma_y}{\rho V_w^2}} \quad (5)$$

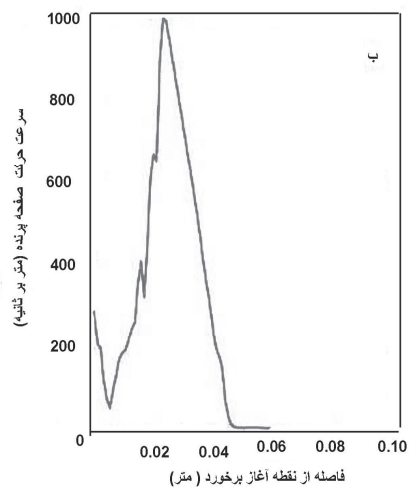
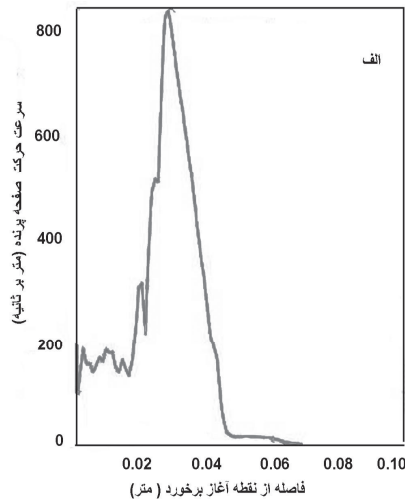
با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی و زاویه برخورد و سرعت حرکت نقطه برخورد حاصله در هر آزمون که در جدول (۳) ملاحظه می‌شود. آزمون‌ها به صورت نقاط پراکنده در پنجره جوش کاری مکان یابی شده و نشان داده شده‌اند.

۴- نتایج و بحث

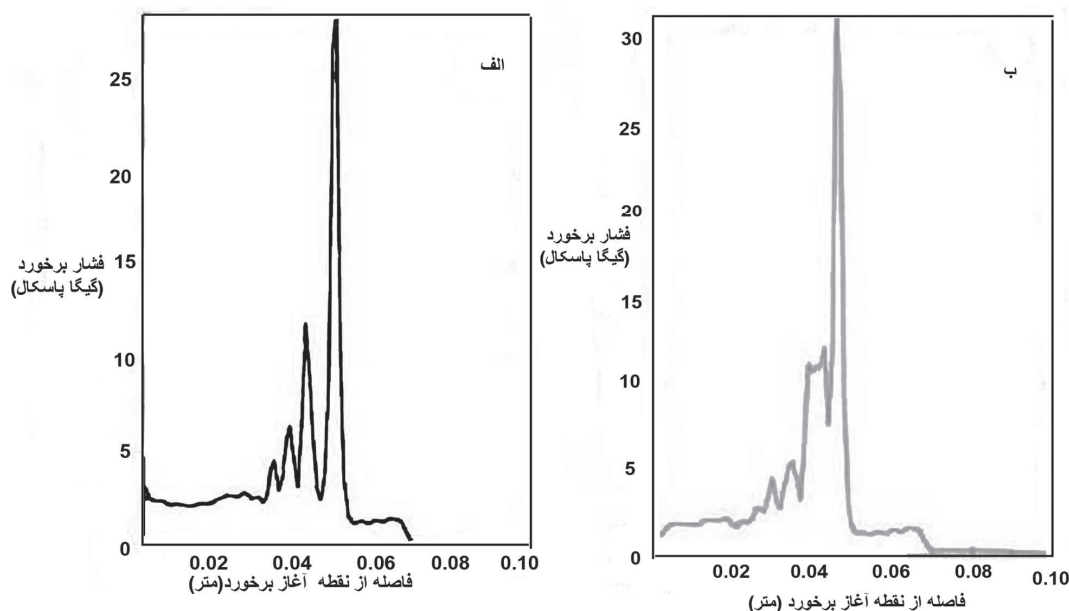
۴-۱- نتایج شبیه سازی

۴-۱-۱- سرعت برخورد صفحه پرنده

نمودار سرعت برخورد صفحه پرنده بر حسب فاصله از نقطه برخورد نمودار پس از ۲۲ میکرو ثانیه از آغاز برخورد آزمون‌های شماره ۴ و ۵، در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵- تغییرات سرعت برخورد صفحه پرنده بر حسب فاصله از نقطه برخورد پس از ۲۲ میکرو ثانیه از آغاز برخورد (الف) آزمون شماره ۴ (ب) آزمون شماره ۵.



شکل ۶- تغییرات فشار بر حسب فاصله از نقطه برخورد پس از ۲۲ میکروثانیه آغاز برخورد الف (آزمون شماره ۴ ب) آزمون شماره ۵.

۴-۱-۲- فشار برخوردی

حداقل فشار لازم برای ایجاد اتصال، ده تا دوازده برابر استحکام تسلیم مواد بیان شده است [۱۰].

فشار بایستی درحدی اعمال شود که باعث در هم فرو رفتن اتم‌های سطحی گردیده و از حد استحکام دینامیکی تسلیم آلیاژها تجاوز نموده تا با ایجاد تغییر شکل پلاستیک کافی، تشکیل جت را ترغیب نماید.

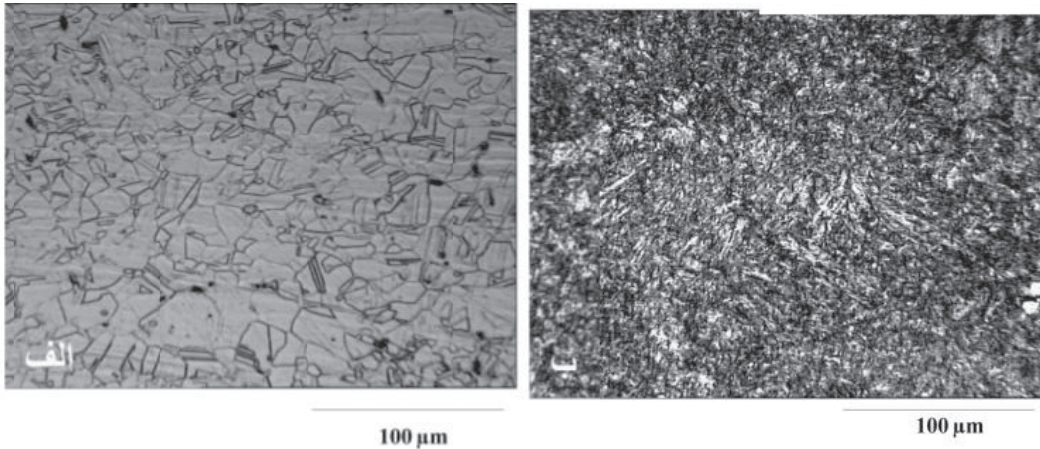
نمودار فشار بر حسب فاصله از نقطه برخورد پس از ۲۲ میکرو ثانیه از آغاز برخورد آزمون‌های شماره ۴ و ۵، در شکل (۶) نشان داده شده است. بالاترین فشار در نقاط برخورد در هنگام پیشروی جوش کاری حاصل شده و از مقدار بالایی در حد گیگاپاسکال برخوردار می‌باشد. بنابراین تغییر شکل پلاستیکی شدید موضعی در فصل مشترک اتصال رخ داده است. بنابراین می‌توان فرض نمود مواد تحت این فشار به صورت سیالات رفتار نموده و اتم‌های سطحی در هم ترکیب شده‌اند.

شکل (۶) نشان می‌دهد که فشار در نقطه برخورد با افزایش فاصله توقف بر اساس افزایش سرعت برخورد صفحه پرنده همان‌طور که در جدول (۳) و شکل (۵) ملاحظه می‌شود، افزایش می‌یابد.

صفحه پرنده ابتدا توسط موج شوک حاصل از انفجار شتاب گرفته و در ادامه به وسیله انبساط محصولات گازی ناشی از انفجار به حرکت خود ادامه می‌دهد [۲۳]. شکل (۵) نشان می‌دهد که سرعت برخورد صفحه پرنده از میزان صفر به بالاترین مقدار خود در نقطه برخورد رسیده و سپس میزان آن به صفر میل می‌نماید. همچنین با افزایش فاصله توقف سرعت برخوردی افزایش یافته است. میانگین سرعت‌های برخورد در همه آزمون‌ها مورد محاسبه قرار گرفته و نتایج آن در جدول (۳) نشان داده شده است. کلیه سرعت‌های محاسبه شده از حد ۳۵۰ متر بر ثانیه که حداقل سرعت برخورد مورد نیاز جهت اتصال دهی (V_p) بر اساس رابطه (۶) [۱۵] بیشتر می‌باشند.

$$V_p = \sqrt{\frac{\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2 (2\sigma_y)}{\rho_1 \rho_2 (h_1 + h_2)}} \quad (6)$$

در رابطه فوق ρ و h به ترتیب چگالی و ضخامت صفحه‌های پایه و پرنده بوده و σ_y استحکام تسلیم صفحه پرنده می‌باشد.



شکل ۷- ریز ساختار اولیه الف- اینکونل ۷۱۸ ب- فولاد H13

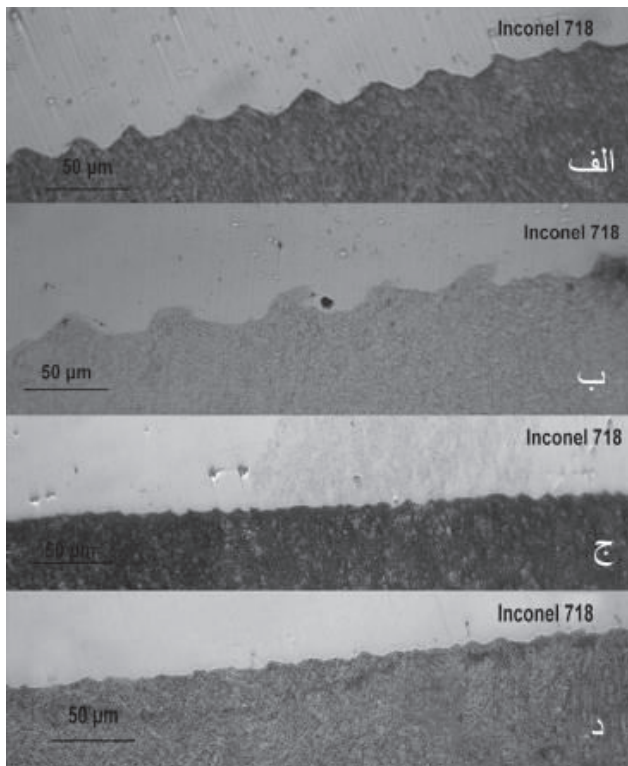
۴-۲- بررسی‌های ریز ساختاری

کلیه آزمون‌ها در سمت راست سرعت انتقال فصل مشترک صاف به موجی قرار گرفته‌اند و پنجره جوش کاری فصل مشترکی موجی بر اساس این تئوری پیش بینی می‌نماید که در تطابق با نتایج متالوگرافی شکل‌های (۸ و ۹) می‌باشد.

ریز ساختار اولیه سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و فولاد گرمکار H13 در شکل (۷) دیده می‌شوند. ساختار سوپر آلیاژ متشکل از دانه‌های فاز γ و دوقلویی‌ها بوده و ساختار فولاد از مارتنزیت تمپر شده تشکیل شده است.

کلیه آزمون‌های صورت گرفته با متغیرهای مختلف موفقیت آمیز بوده و همان‌طور که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود در داخل محدوده پنجره جوش کاری مکان یابی می‌شوند. شکل‌های (۸ و ۹) نمایانگر ریز ساختار فصل مشترک آزمون‌های صورت گرفته با تغییر بار انفجاری و فاصله توقف میان ورق‌ها می‌باشند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که شکل فصل مشترک‌های حاصله به دو صورت موجی و موجی همراه با گردابه ایجاد شده است.

آزمون شماره یک روی خط انتقال فصل مشترک صاف به موجی الحسنی در پنجره جوش کاری مکان‌یابی می‌شود و فصل مشترکی موجی مطابق شکل (۸-الف) در آن ایجاد شده است. برای آزمون‌های ۲ تا ۵ که فصل مشترک آن‌ها در شکل‌های (۸-ب تا د و ۹) ملاحظه می‌گردد، با توجه به زاویه و سرعت برخورد، پنجره جوش کاری فصل مشترکی موجی شکل را پیش بینی می‌نماید که در تطابق با نتایج متالوگرافی بوده و فصل مشترکی موجی کوتاه در آزمون سه و فصل مشترک موجی همراه با گردابه در آزمون‌های دو، چهار و پنج ایجاد شده است.



شکل ۸- فصل مشترک‌های تشکیل شده در آزمون‌های انفجاری جدول ۳، الف- آزمون شماره ۱ ب- آزمون شماره ۲ ج- آزمون شماره ۳ د- آزمون شماره ۴.

سرعت برخورد افزایش یافته و مواد در مجاورت نقطه برخورد در حجم بزرگتری استحکام خود را از دست داده و رفتار پلاستیک شبه سیال از خود نشان می‌دهند. و در نتیجه طول موج در فصل مشترک اتصال به تدریج با افزایش سرعت برخورد افزایش می‌یابد جدول (۳) و با افزایش بیشتر زاویه برخورد، قله‌ی موج در جهت حرکت موج انفجاری تغییر شکل پیدا نموده و فصل مشترک گردابه ای مطابق شکل‌های (۸) (ب و د) و (۹) ایجاد می‌شود [۱۹].

همان طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، طول امواج فصل مشترک نیز بر اثر تغییرات زاویه دینامیکی برخورد در هنگام اتصال ورق‌ها تغییر می‌نماید. قسمتی از انرژی جنبشی مصرفی در فصل مشترک به انرژی پتانسیل تبدیل شده و باعث می‌شود که ورق‌ها در طول سطح برخورد تغییر شکل دهند. با افزایش انرژی جنبشی مصرفی، تغییر شکل پلاستیکی بیشتری در فصل مشترک ایجاد شده و با این افزایش، رفتار ماده به سیالیت بیشتری میل نموده است که در نهایت منجر به ایجاد موج‌هایی با طول موج و دامنه بیشتر در فصل مشترک شده است. در آلیاژهای نظیر اینکونل با ساختار شبکه بلوری مکعبی با وجوه مرکز دار که دارای انرژی نقص در چیده شدن کمی می‌باشند، مکانیزم اصلی تغییر شکل در فشارهای بالای ده گیگا پاسکال دوقلوبی شدن می‌باشد [۲۵]. از آنجا که فشار حاصله همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود، از این حد مقدار تجاوز نموده، سوپر آلیاژ بر اثر عبور موج شوک حاصل از انفجار با مکانیزم دوقلوبی شدن تغییر شکل می‌دهد که در شکل (۹) در مجاورت فصل مشترک دوقلوبی‌های تغییر شکل به صورت بی قاعده دیده می‌شوند.

شکل (۱۰) نمایانگر نمونه تصاویر متالوگرافی نوری فصل مشترک‌های حاصله آزمون‌ها می‌باشد.

شکل (۱۰) نمایانگر یک تغییر وضعیت واضح مابین دو آلیاژ اتصال یافته در فصل مشترک می‌باشد.

در جوش کاری انفجاری دو فصل مشترک فلز به فلز و فلز به مذاب انجماد یافته می‌تواند در فصل مشترک حاصل گردد. در فشارهای برخوردی بالا، گردابه‌ها می‌توانند در فصل مشترک اتصال ایجاد شوند و این گردابه‌ها ممکن است در برخی مناطق فصل مشترک ایجاد مناطق ذوب موضعی نمایند که برای نمونه در شکل (۹) این موضوع دیده می‌شود.



شکل ۹- فصل مشترک تشکیل شده در آزمون انفجاری شماره ۵.

نتایج جدول (۳) نشان می‌دهند که در یک بار انفجاری ثابت، با افزایش فاصله توقف سرعت برخورد صفحه پرنده و زاویه دینامیکی برخورد افزایش یافته و هم چنین در یک فاصله توقف ثابت با افزایش بار انفجاری نیز سرعت برخورد صفحه پرنده و زاویه دینامیکی برخورد افزایش می‌یابد.

این موضوع نمایانگر آنست که صفحه پرنده به سرعت حد نهایی برخورد نرسیده است. میانگین طول و دامنه امواج حاصله مورد اندازه‌گیری واقع شده که در جدول (۳) ملاحظه می‌شوند. انرژی جنبشی مصرفی ناشی از برخورد^۱ (ΔKE) از رابطه (۷) پیشنهاد شده توسط هاگاموتو^۲ [۲۴] محاسبه شده و مقادیر آن در جدول (۳) نشان داده شده است. در این رابطه m_D و m_C جرم صفحه‌های پرنده و مادر در واحد سطح می‌باشند.

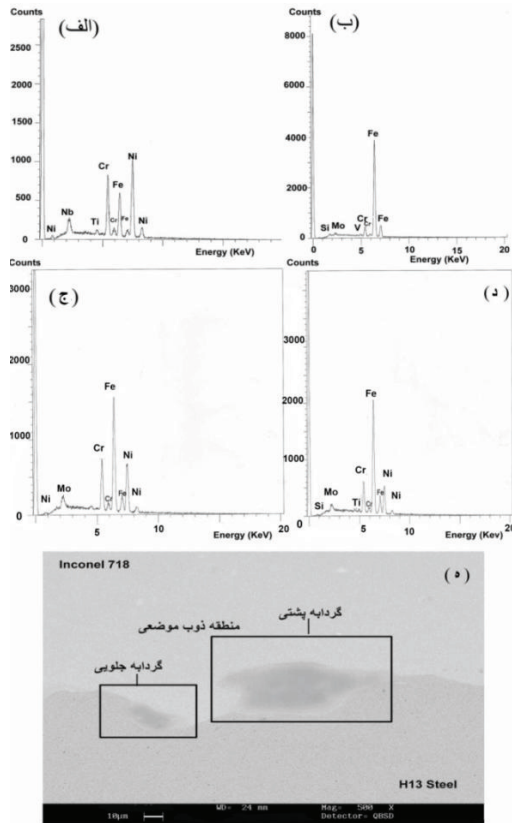
$$\Delta KE = \frac{m_D m_C V_p^2}{2(m_D + m_C)} \quad (7)$$

با توجه به شکل‌های (۸-ب و د، ۹) و جدول (۳)، با افزایش فاصله توقف و افزایش انرژی جنبشی مصرفی برخورد ناشی از افزایش سرعت برخورد صفحه پرنده، فصل مشترک به سمت حالت گردابه‌ای تغییر نموده و طول موج و دامنه امواج افزایش یافته است. افزایش فاصله توقف و افزایش زاویه دینامیکی برخورد باعث افزایش تغییر شکل صفحه پرنده در حین برخورد شده و تغییر شکل در فصل مشترک اتصال می‌گردد. با بالا رفتن فشار از استحکام تسلیم دینامیکی دو فلز در نقطه برخورد همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود و هم چنین به علت تفاوت مومنتم فشاری در دو سمت فصل مشترک که در نتیجه تفاوت در چگالی و سرعت حرکت موج در دو فلز می‌باشد، نقطه برخورد در هنگام اتصال دچار نوسان می‌شود. این نوسانات با افزایش

1- Kinetic Energy Loss
2- Hokamoto

همگن بوده و از مخلوطی از فلزات صفحات پرنده و پایه تشکیل شده

است [۲۶].



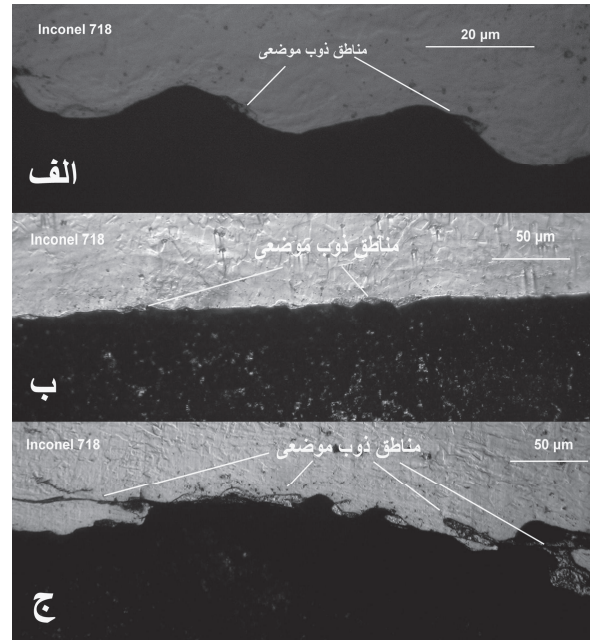
شکل ۱۱-آنالیز منطقه ذوب موضعی جلوی یکی از گردابه های آزمون شماره ۱۷ (الف) اینکونل (ب) فولاد (ج) منطقه ذوب موضعی (گردابه پستی) (د) منطقه ذوب موضعی (گردابه جلویی) (ه) منطقه مورد آنالیز.

۳-۴- نتایج ریز سختی سنجی

تغییرات ریز سختی آزمون‌ها در بار انفجاری ثابت در طول فصل مشترک اتصال، در شکل‌های (۱۲ و ۱۳) ملاحظه می‌شود. هم چنین میزان سختی در مجاورت فصل مشترک هر اتصال در جدول (۵) ملاحظه می‌شود.

جدول ۵- استحکام و سختی فصل مشترک‌های حاصله.

آزمون	استحکام برشی (MPa)	سختی نزدیک فصل مشترک فولاد (Hv)	سختی نزدیک فصل مشترک اینکونل (Hv)
۱	۵۹۸	۴۷۹	۴۹۰
۲	۵۳۲	۵۴۰	۵۲۲
۳	۶۲۱	۴۶۳	۴۸۷
۴	۶۵۱	۴۹۸	۵۴۱
۵	۶۱۳	۴۸۷	۴۹۶

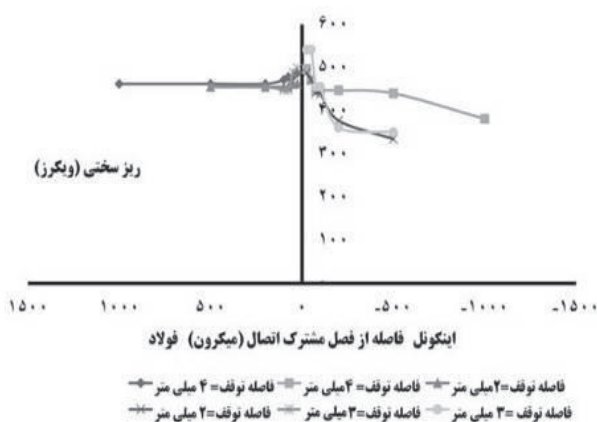


شکل ۱۰- نمونه تصاویر متالوگرافی نوری مناطق ذوب موضعی فصل مشترک آزمون‌های جدول ۳ الف- آزمون شماره ۱ ب- آزمون شماره ۴ ج- آزمون شماره ۵.

ایجاد این مناطق بر اساس ایجاد گرمای بی دررو در اثر گیر افتادن گردابه در جلوی جبهه برخی امواج می‌باشد. این مناطق موضعی با فلز سرد اطراف احاطه شده و تحت سرعت سرد شدن بالایی در حد 10^5-10^7 K/s قرار دارد [۲۶]. در آزمون‌های با میزان فاصله توقف کم و یا بار انفجاری همان‌طور که در شکل‌های (۱۰- الف و ب) دیده می‌شود، مناطق ذوب موضعی در فصل مشترک در حد کمی مشاهده می‌شوند اما با افزایش میزان بار انفجاری به $2/5$ و افزایش فاصله توقف در این بار انفجار، به دلیل افزایش فشار و انرژی برخورد میزان این مناطق در فصل مشترک خصوصاً در مجاورت گردابه موج‌ها افزایش می‌یابد که در شکل‌های (۹، ۱۰- ج و ۱۱) این موضوع ملاحظه می‌شود.

هم چنین از آن جایی که ضریب هدایت حرارتی آلیاژ اینکونل (11/4 $Wm^{-1}K^{-1}$) کمتر از ضریب هدایت حرارتی فولاد ($H13(28/4 Wm^{-1}K^{-1})$) می‌باشد در هنگام سرد شدن این ترکیبات به جهت انتقال حرارت بیشتر به سمت اینکونل، در سمت اینکونل متمرکز می‌شوند. شکل (۱۱) نمایانگر نمونه‌ای از مناطق ذوب موضعی تشکیل شده در مجاورت امواج آزمون شماره ۵ و تغییرات آنالیز شیمیایی آن مناطق می‌باشند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ترکیب این مناطق بر اساس ماهیت حرکت چرخشی جت جهنده و تلاطم ناشی از آن (شکل ۱۰- ج)، غیر

شده که با ایجاد فصل مشترکی گردابه ای همان طور که در شکل (۹) دیده می شود، باعث افت سختی در فصل مشترک شده است.

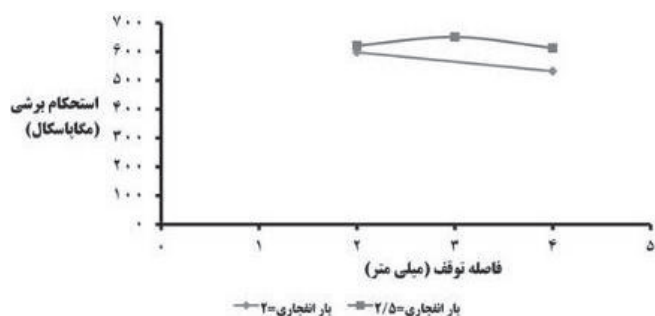


شکل ۹- تغییرات ریز سختی بر حسب فاصله از فصل مشترک اتصال برای آزمون های با بار انفجار دو و نیم.

۴-۴- نتایج استحکام برشی

نتایج آزمون های استحکامی اتصالات صورت گرفته در جدول (۵) ملاحظه می گردد. هم چنین تغییرات استحکام برشی با فاصله توقف در بار انفجاری ثابت، در شکل (۱۴) ملاحظه می شود.

شکل (۱۴) نشان می دهد در نمونه های اتصال یافته با بار انفجاری دو، با افزایش فاصله توقف استحکام کاهش یافته که افت استحکام می تواند بر اساس ایجاد امواج تیز و تمرکز تنش در راس گردابه موج های تیز همان گونه که در شکل (۸-ب) دیده می شود، توجیه شود.

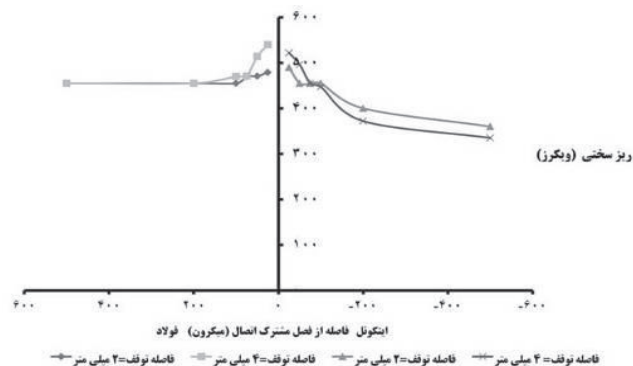


شکل ۱۴- تغییرات استحکام برشی اتصالات در بار انفجاری ثابت با فاصله توقف.

استحکام اتصالات صورت گرفته با بار انفجاری دو و نیم، دارای یک مقدار بیشینه در فاصله توقف سه میلی متر می باشد که این مقدار بیشینه بر اساس افزایش طول موج در فصل مشترک و افزایش اثر قفل

نتایج ریز سختی سنجی نمایانگر افزایش سختی در دو آلیاژ مورد اتصال با نزدیک شدن به فصل مشترک را دارد که می تواند بر اساس تغییر شکل پلاستیکی شدید در این منطقه ناشی از فشار برخوردی بالا همان طور که در شکل (۶) دیده می شود و تغییر شکل پلاستیکی شدید ناشی از آن، و پدیده سخت شدن شوکی ناشی از عبور شوک موج انفجار [۲۷] توجیه شود.

این تغییرات به طور شدیدتری با ایجاد دوقلوبی های تغییر شکل در فصل مشترک در سمت سوپر آلیاژ اینکونل همان طور که برای نمونه در شکل (۹) نشان داده شده، ملاحظه می شود. در آزمون های با بار انفجاری دو، با افزایش فاصله توقف همان طور که در شکل (۱۲) ملاحظه می شود سختی در فصل مشترک افزایش یافته که علت این موضوع می تواند بر اساس افزایش سرعت برخورد و افزایش انرژی برخوردی و میزان تغییر شکل پلاستیک با افزایش میزان فاصله توقف توجیه شود. برای نمونه های آزمون های با بار انفجاری دو و نیم، همان طور که در شکل (۱۳) ملاحظه می شود میزان سختی برای نمونه با فاصله توقف دو میلی متر به دلیل کم بودن سرعت برخوردی از مقدار کمتری نسبت به دیگر آزمون ها برخوردار بوده و با افزایش فاصله توقف، سختی در آزمون های دیگر به دلیل تغییر شکل پلاستیک شدیدتر ناشی از سرعت برخورد بالاتر افزایش یافته است. ماکزیمم سختی برای نمونه با فاصله توقف ۳ میلی متر در حد ۵۴۱ ویکرز در سمت فصل مشترک اینکونل حاصل شده است.



شکل ۱۲- تغییرات ریزسختی بر حسب فاصله از فصل مشترک اتصال برای آزمون های با بار انفجار دو.

با افزایش فاصله توقف به ۴ میلی متر، افزایش سرعت و انرژی برخوردی باعث افزایش دما در فصل مشترک و امکان سیلان بیشتر

مراجع

- [1] Rizvi, S. A.; Khan T. I. "Investigating the Change In Wear Behavior of Tool Steel After Surface Melting and Gaseous Alloying."; Tribol. Int. 1999, 32, 567-574.
- [2] Khan, T. I.; Rizvi, S. A.; Matsuura, K. "The Effect on Wear Behavior of H13 Tool Steel Surfaces Modified Using a Tungsten Arc Heat Source."; Wear 2000, 244, 154-164.
- [3] Bournicon, C. "Stresses and Damage Modes in Forging Tools."; Traitements Thermiques (France) 1991, 246, 70-77.
- [4] Davis, J. R. "ASM Specialty Handbook, Tool Materials."; ASM International, 1995.
- [5] Olson, D. L.; Siwert, T. A.; Liu, S.; Edwards, J. R. "ASM Handbook, Welding, Brazing, and Soldering."; ASM International, 1993.
- [6] Fournier, P.; Bennani, A. "Intérêt du Rechargement des Outils de Forgeage Chaud Fortement Sollicités."; Bulletin du Cercle d'Etudes des Métaux (France) 2000, 18, 17.1-17.20.
- [7] Dupont, J. N.; Robino, C. V.; Marder, A. R. "Solidification and Weld Ability of Nb-Bearing Super Alloys."; Weld. J. 1998, 77, 417-431.
- [8] Dupont, J. N.; Robino, C. V.; Marder, A. R.; Notis, M. R.; Michael, J. R. "Solidification of Nb-Bearing Superalloys: Part I. Reaction Sequences."; Metall. Mater. Trans. A. 1998, 29, 2785-2796.
- [9] Knorovsky, G. A.; Cieslak, M. J.; Headley, T. J.; Romig, A. D.; Hammett, W. F. "INCONEL 718: A Solidification Diagram."; Metall. Mater. Trans. A. 1989, 20, 2149-2158.
- [10] Blazynski, T. Z. "Explosive Forming Welding and Compaction."; Applied Science Publisher, London and New York, 1983.
- [11] Ettaqi, S.; Langlois, L.; Bigot, R. "Cobalt-Based Super Alloy Layers Deposited on X38CrMoV5 Steel Base Metal by Explosion Cladding Process."; Surf. Coat. Technol. 2008, 202, 3306-3315.
- [12] Durgutlu, A.; Okuyucu, H.; Gulenc, B. "Investigation of Effect of the Stand-Off Distance on Interface Characteristics of Explosively Welded Copper and Stainless Steel."; Mater. Des. 2008, 29, 1480-1484.
- [13] Acarer, M.; Gulenc, B.; Findik, F. "Investigation of Explosive Welding Parameters and Their Effects on Micro Hardness and Shear Strength."; Mater. Des. 2003, 24, 659-664.
- [14] Akbari Mousavi, S. A. A.; Al-Hassani, S. T. S. "Numerical and Experimental Studies of Mechanism of Wavy Interface Formations in Explosive/Impact Welding."; J. Mech. Phys. Solids. 2005, 12, 251-279.

شوندگی مکانیکی [۱۲] در فصل مشترک بر اساس شکل (۸-د) توجیه می‌شود، با افزایش فاصله توقف به چهار میلی‌متر و افزایش مناطق گردابه ای ذوب موضعی همان‌طور که در شکل های (۹ و ۱۰-ج) دیده می‌شود، استحکام افت می‌نماید. نتایج جدول (۵) هم چنین نشان می‌دهد که در یک فاصله توقف ثابت با افزایش میزان بار انفجاری استحکام فصل مشترک افزایش می‌یابد. با افزایش بار انفجاری و سرعت برخورد، میزان انرژی برخوردی افزایش یافته و در نتیجه با افزایش انرژی داخلی فصل مشترک، استحکام افزایش می‌یابد.

۵- نتیجه گیری

نتایج نشان می‌دهند که فصل مشترک‌هایی به صورت موجی و موجی گردابه‌ای در فصل مشترک اینکونل ۷۱۸- فولاد گرم کار با تغییر پارامترهای جوش کاری ایجاد شده است که تغییرات مورفولوژی تابع تغییرات انرژی جنبشی مصرفی ناشی از برخورد بوده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیز نشان می‌دهند که با افزایش فاصله توقف در بار انفجاری ثابت، و با افزایش بار انفجاری در فاصله توقف ثابت، سرعت برخورد و زاویه دینامیکی برخورد افزایش می‌یابد.

هم چنین سرعت برخورد، فشار برخوردی در نقطه برخورد به ماکزیمم مقدار خود رسیده است و منطقه تغییر شکل پلاستیکی شدید در اطراف منطقه برخورد ایجاد شده است. سختی با نزدیک شدن به فصل مشترک به دلیل تغییر شکل شدید پلاستیکی و سخت شدن ناشی از عبور امواج شوکی حاصل از انفجار افزایش می‌یابد که تغییرات سختی در اینکونل به طور شدیدتر مشاهده شده است. سوپر آلیاژ به دلیل افزایش فشار از یک حد آستانه در اثر عبور امواج شوکی انفجار با مکانیزم دوقلویی شدن تغییر شکل داده است. استحکام برشی فصل مشترک تابع تغییرات فاصله توقف و بار انفجاری و مورفولوژی فصل مشترک می‌باشد.

با افزایش فاصله توقف یا بار انفجاری، گردابه‌ها و مناطق ذوب موضعی در فصل مشترک اتصال مشاهده می‌شود که به دلیل اختلاف ضریب هدایت حرارتی دو آلیاژ، تمرکز مناطق ذوب موضعی در سمت سوپر آلیاژ مشاهده می‌شود. ترکیب این مناطق بر اساس تلاطم ناشی از حرکت جت جهنده، غیر همگن بوده و مخلوطی از فلزات پایه و پرنده است.

- [22] Yan ,H.; Hua, J. ; Shivpuri, R. "Flow Stresses of AISI H13 Die Steel in Hard Machining."; Mater. Des. 2007, 28, 272–277.
- [23] 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.
- [24] Manikandan, P.; Hokamoto, K.; Fujita, M.; Raghukandan, K.; Tomoshige, R. "Control of Energetic Conditions by Employing Interlayer of Different Thickness for Explosive Welding of Titanium/304 Stainless Steel."; J. Mater. Process Technol. 2008, 195, 232-240.
- [25] Murr, L. E.; Ferreyra E.; Pap, S.; Rivas, J. M.; Kennedy, C.; Aya Pu, A.; Garcia, E. I.; Sanchez, J. C.; Huang, W.; Niou, C. S. "Novel Deformation Processes and Microstructures Involving Ballistic Penetrator Formation and Hypervelocity Impact and Penetration Phenomena."; Mater. Charact. 1996, 37, 245-276.
- [26] Akbari Mousavi, S. A. A.; Sartangi, P. "Experimental Investigation of Explosive Welding of Cp-Titanium/AISI 304 Stainless Steel."; Mater. Des. 2009, 30, 459-468.
- [27] Kacar, R.; Acarer, M. "An Investigation on the Explosive Cladding of 316L Stainless Steel-Din-P355GH Steel."; J. Mater. Process Technol. 2004, 152, 91-96.
- [15] Akbari Mousavi, S. A. A.; Al-Hassani, S. T. S. ; Burley, S. J. "Simulation of Explosive Welding Using the Williamsburg Equation of State to Model Low Detonation Velocity Explosives."; Int. J. Impact Eng. 2005, 31, 719–734.
- [16] Akbari Mousavi, S. A. A.; Al-Hassani, S. T. S.; Byers Brown, W.; Burley, S. J. "Simulation of Explosive Welding with ANFO Mixtures."; Propell., Explos., Pyrotech. 2004, 29, 188–196.
- [17] Akbari Mousavi, S. A. A.; Al-Hassani, S. T. S.; Barrett, L. A. "Explosive Welding of Metal Plates."; J. Mater. Process Technol. 2008, 202, 224-239.
- [18] "Standard 50162, Determination of Shear Strength between Cladding Metal and Parent Metal in Shear Test."; DIN, 1978.
- [۱۹] اکبری موسوی، سید علی اصغر؛ فرهادی سرتنگی، پژمان "جوشکاری انفجاری صفحات تیتانیوم خالص تجاری به فولاد زنگ نزن ۳۰۴"; پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۵.
- [20] Singh, K. N.; Clos, R.; Schreppel, U.; Veit, P.; Hamann, A.; Klingbeil, D.; Sievert, R.; Künecke, G. "Failure Simulation with Johnson-Cook Failure Model for a Dynamically Loaded Nickel-Based Alloy under MultiAxial States by Using Different Speed."; Tech. Mech. (German) 2003, 23, 205-215.
- [21] Uhlmann, E.; Graf Von Der Schulenburg M.; Zettier, R. "Finite Element Modeling and Cutting Simulation of Inconel 718."; CIRP Ann-Manuf. Techn. 2007, 56, 61-64.

