

# تأثیر متغیرهای بار انفجاری و فاصله توقف بر روش کاری به روش جوشکاری انفجاری فولاد ابزار AISI H13 با سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸

محمد رضا خانزاده قره شیران<sup>۱\*</sup>، سید علی اصغر اکبری موسوی<sup>۲</sup>، احمد علی آماده<sup>۳</sup> و غلامحسین لیاقت<sup>۴</sup>  
۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده مهندسی مواد، تهران، ایران  
۲ و ۳- دانشیار، دانشگاه پردیس دانشکده‌های فنی، تهران، ایران  
۴- استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد، تهران، ایران  
m.khanzadeh@srbiau.ac.ir  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۲/۰۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۳/۲۵)

## چکیده

در این تحقیق پوشش دهی فولاد گرمکار کوئنچ تمپر شده AISI H13 با سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش جوشکاری انفجاری انجام گرفت. آزمون‌های انفجاری توسط ماده منفجره آماتول در فاصله‌های توقف و بارهای انفجاری متفاوت صورت پذیرفته و بررسی‌های متالوگرافی، میکروسکوپ الکترونی روبشی، ریزسختی سنجی و استحکامی بر روی کلیه نمونه‌های اتصال یافته انجام گرفت. شکل فصل مشترک حاصله به سه صورت موجی، مسطح 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 ورق‌ها تغییر نموده و سختی و استحکام برشی فصل مشترک تابع مورفولوژی فصل مشترک و دامنه امواج تغییر یافت.

## واژه‌های کلیدی:

جوشکاری انفجاری، فاصله توقف، بار انفجاری، زاویه دینامیکی برخورد، استحکام برشی

## ۱- مقدمه

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 جوشکاری ذوبی به عنوان یکی از پر کاربردترین فرآیندهای پوشش دهی این قالب‌ها مرسوم می‌باشند. روش‌های جوشکاری ذوبی با کمترین میزان حرارت ورودی، امتزاج، جدایش، اعوجاج و تنش‌های پسماند بهترین خواص را نشان داده‌اند [۶]. علاوه بر این پوشش دهی ذوبی فولاد گرمکار به دلیل میزان کربن بالا و عناصر آلیاژی آن مشکل بوده و

قالب‌های فورج گرم تحت شرایط کاری نظیر خستگی، نیروهای مکانیکی، حرارتی، سایش قرار دارند [۱ و ۳]. این قالب‌ها معمولاً از جنس فولادهای گرمکار در شرایط کوئنچ - تمپر شده، ساخته می‌شوند. فولادهای گرمکار کروم دار مانند AISI H13، تحت این شرایط کاری به دلیل خواص مقاومت سایشی مناسب، مقاومت به شوک حرارتی و مکانیکی مناسب، تافنس و مقاومت به نرم شدن در دمای بالا یک انتخاب مناسب می‌باشند [۴]. جهت کاهش سایش و بهبود خواص دمای بالا، این فولادها عمدتاً توسط لایه‌ای از مواد با قابلیت استحکام و

ماده انفجاری به وزن صفحه پرنده، تاثیر مستقیمی بر مورفولوژی فصل مشترک و استحکام باند اتصال داشته و خواص مکانیکی فصل مشترک تابع شکل و خواص فصل مشترک گزارش گردیده است. ملاحظه گردیده که با افزایش فاصله توقف و بار انفجاری در اتصال دهی این فلزات و آلیاژها، شکل فصل مشترک از حالت مسطح به موجی تغییر شکل یافته و به طول موج و دامنه امواج تشکیل شده در فصل مشترک اتصال افزوده شده و سختی در نزدیک فصل مشترک به دلیل تغییر شکل پلاستیک شدید ناشی از برخورد، افزایش یافته که میزان سختی با افزوده شدن میزان بار انفجاری و فاصله توقف افزایش نشان داده است. فصل مشترک نیز با موجی تر شدن آن به دلیل افزایش سطح اتصال دهی و پدیده قفل شدن مکانیکی ناشی از امواج از استحکام بیشتری برخوردار شده است [۱۲ و ۱۶].

تاکنون بررسی بر روی اتصال دهی انفجاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به فولاد گرمکار AISI H13 صورت پذیرفته است. این تحقیق تاثیر 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 می دهد.

نیازمند تمهیدات ویژه ای نظیر کنترل پیش گرم، پس گرم، نرخ سرعت سرد شدن و انتخاب الکتروود کم هیدروژن می باشد [۵ و ۶]. همچنین پوشش دهی ذوبی سوپر آلیاژهای پایه نیکل نیز دارای مشکلاتی نظیر امکان ترک گرم انجمادی، جدایش و رسوبات ترد می باشد [۷ و ۹]. پوشش دهی به روش جوشکاری انفجاری یک فرآیند حالت جامد بوده که با استفاده از انفجار یک ماده منفجره، ورق پرنده در فاصله توقف معینی شتاب گرفته و به صفحه مادر برخورد نموده و اتصال ایجاد می شود [۱۰]. در مقایسه با فرآیندهای ذوبی، در این فرآیند امتزاج ورق ها صورت نگرفته، و امکان پوشش دهی مناسبتر و اتصال فلزات حساس به ترک هیدروژنی و ترک گرم انجمادی امکان پذیر می باشد. همچنین قابلیت پوشش دهی کامل سطوح و حذف امکان ایجاد ترکیبات بین فلزی و رسوبات ترد با استفاده از این فرآیند امکان پذیر می باشد [۱۱]. به دلیل قابلیت روش جوشکاری انفجاری در اتصال دهی فلزات غیر هم جنس، تحقیقات بر روی اتصالات غیر هم جنس فلزات و آلیاژها نظیر اتصال دهی مس - آلومینیوم، مس - تیتانیم، مس - فولاد زنگ نزن، تیتانیم - فولاد زنگ نزن، صورت پذیرفته و ملاحظه شده است که پارامترهای جوشکاری انفجاری نظیر فاصله توقف (فاصله اولیه ورق ها در هنگام آزمون) و بار انفجاری (نسبت وزن

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژهای مورد استفاده

عناصر	C	Si	Cr	Ni	Mo	Fe	Nb	Mn	V	Ti
AISI H13	۰/۴۲	۱/۰۵	۵/۰۹	۰/۱۲	۱/۱۴	پایه	-	۰/۳۵	۰/۸۲	۰/۴۰/۰
Inconel 718	۰/۰۶	۰/۰۲	۱۸/۵۵	پایه	۳/۰۲	۱۹/۸	۴/۷۵	۰/۰۵	۰/۰۳۳	۰/۹۵

جدول (۲): خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژهای مورد استفاده

مواد	مدول الاستیک (GPa)	مدول حجمی (GPa)	سختی (HV)	تنش تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	سرعت حجمی صوت (m/s)
AISI H 13	۲۱۱	۱۵۹/۸۵	۴۵۰	۶۰۶	۱۳۴۶	۷۸۰۰	۴۵۲۷
Inconel 718	۲۰۶	۱۶۳/۵	۳۵۰	۴۹۷	۸۸۵	۸۱۹۰	۴۴۶۸

## ۲- مواد و روش تحقیق

ورق‌های اینکونل ۷۱۸ در شرایط آنیل محلولی، و فولاد گرمکار کروم دار کوئنچ - تمپر شده AISI H13 به ترتیب به عنوان ورق‌های پرنده و مادر انتخاب گردیدند. آنالیز شیمیایی ورق‌ها به روش اسپکترومتری نشری تعیین گردیده و خواص مکانیکی و سختی آنها با آزمون کشش و سختی سنجی بر اساس استانداردهای ASTM E92 و ASTM E8M تعیین گردید که ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی و سختی این ورق‌ها به ترتیب در جدول (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند. ورق‌های پرنده و مادر به ابعاد  $130 \text{ mm} \times 130 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$  و  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  آماده شدند. ورق فولادی پس از عملیات حرارتی کوئنچ - تمپر تحت عملیات سنگ‌زنی مغناطیسی قرار گرفته و ورق‌های اینکونل به طور مکانیکی پولیش گردیدند. قبل از انجام جوشکاری نیز سطوح کلیه ورق‌ها با محلول استون مورد تمیز کاری قرار گرفتند.

ماده منفجره آماتول با سرعت انفجاری  $3650$  متر بر ثانیه جهت آزمون‌ها انتخاب شد و در داخل یک جعبه چوبی با ابعاد مناسب در بالای ورق پرنده بدون فاصله مستقر گردید. سیستم آرایش تنظیمی موازی که در شکل (۱) دیده می‌شود جهت فرآیند جوشکاری انتخاب گردید. کل مجموعه جهت انجام آزمون انفجاری بر روی بستری از شن نرم قرار گرفت. تحریک انفجاری توسط چاشنی مناسب صورت پذیرفت. آزمون‌های اتصال‌دهی با تغییر فاصله توقف و بار انفجاری انجام گردیده که شرایط آزمون‌ها در جدول (۳) ملاحظه می‌گردد. بار انفجاری در جدول (۳) نمایانگر نسبت وزن ماده منفجره به وزن صفحه پرنده می‌باشد که از عبارت (چگالی ماده منفجره  $\times$  ضخامت ماده منفجره)  $\div$  (چگالی صفحه پرنده  $\times$  ضخامت صفحه پرنده) حاصل می‌شود. جهت بررسی تأثیر بار انفجاری بر خواص فصل مشترک، کلیه آزمون‌ها توسط نرم افزار المان محدود ABAQUS/Explicit مورد طراحی و شبیه‌سازی قرار گرفته است. معادله حالت ویلیامزبورگ [۱۷ و ۲۰]، جهت بررسی رفتار ماده منفجره و معادلات ساختاری جانستون - کوک

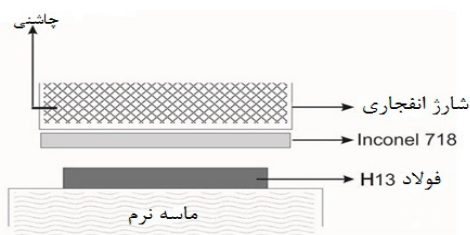
جهت شبیه‌سازی رفتار ورق‌ها مورد استفاده واقع شدند. شکل (۲) نمایی از شبیه‌سازی برخورد دو ورق پس از ۲۲ میکروثانیه از آغاز انفجار را نشان می‌دهد که در آن مقادیر عددی سرعت برخورد یا سرعت حرکت صفحه پرنده به صورت کانتوری نمایش داده شده است. میانگین سرعت برخورد و زاویه برخورد در بازه‌های زمانی مختلف از آغاز انفجار تا انتهای فرآیند برخورد دو ورق، توسط شبیه‌سازی محاسبه و در جدول (۳) نشان داده شده است.

### ۲-۱- بررسی‌های فلز شناسی فصل مشترک‌های اتصال

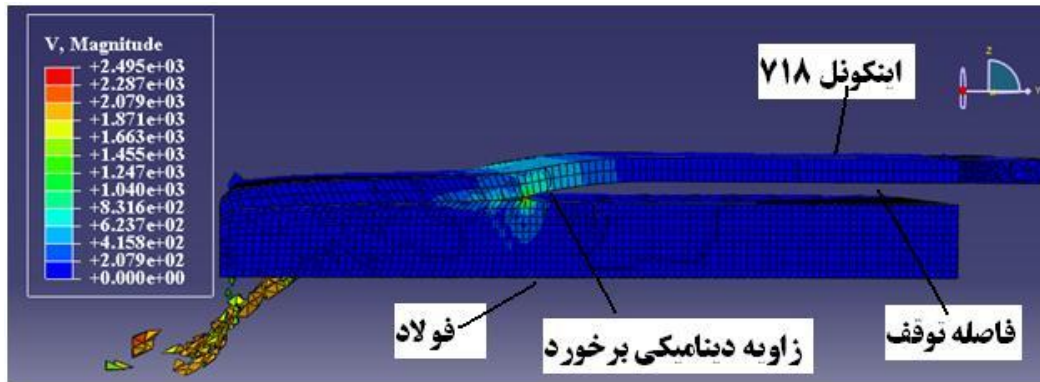
مقاطع انتخابی از اتصال، توسط دستگاه وایر کات به ابعاد یک سانتی‌متر در یک سانتی‌متر در جهت موازی با جبهه انفجار انتخاب شدند. که هر کدام از نمونه‌ها طی مراحل مختلف از سنبله ۶۰ تا شماره ۱۲۰۰ ساییده شده و توسط خمیر الماسه پولیش شدند. برای بررسی ریزساختاری، محلول حکاکی نایتال ۲ درصد برای فولاد و محلول حکاکی  $60 \text{ ml HCl} + 6 \text{ gr CuCl}_2 + 5 \text{ ml H}_2\text{O}_2$  برای اینکونل مورد استفاده واقع شدند. برای بررسی دقیق‌تر فصل مشترک از آنالیز الکترون بازگشتی میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه طیف سنجی EDS استفاده گردید.

### ۲-۲- بررسی استحکام اتصالات انفجاری

برای بررسی استحکام اتصالات جوشکاری انفجاری، استحکام برشی آنها اندازه‌گیری گردید. برای این منظور طبق استاندارد DIN50162 [۲۱] نمونه‌های استحکام برشی آماده شدند. شماتیک آزمون و نمونه‌ها در شکل (۳) دیده می‌شود. دو عدد نمونه موازی و عمود بر جهت انفجار از داخل نمونه‌های اتصال یافته مطابق استاندارد توسط وایر کات ساخته شدند.



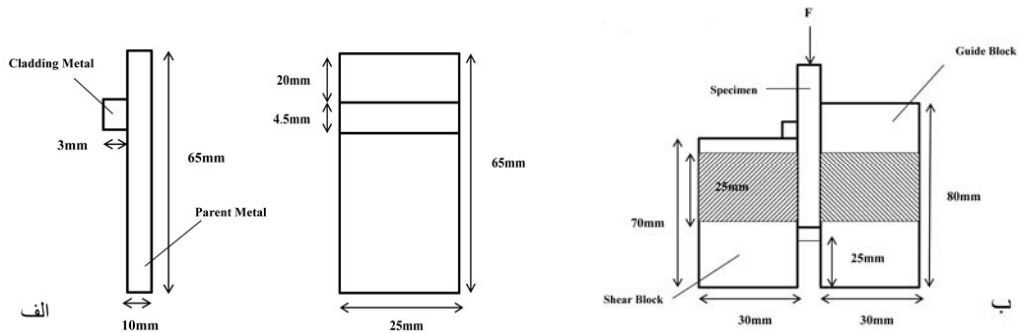
شکل (۱): آرایش موازی مورد استفاده در آزمون‌ها



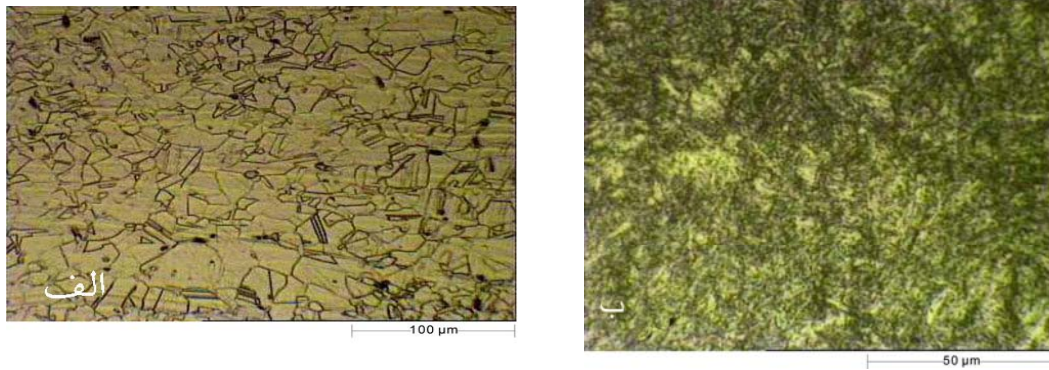
شکل (۲): نمایی از شبیه سازی برخورد دو ورق به همراه کانتورهای مقادیر سرعت حرکت صفحه پرنده پس از ۲۲ میکروثانیه از آغاز انفجار

جدول (۳): خصوصیات تنظیمی آزمون های صورت پذیرفته و فصل مشترک های حاصله

آزمون	فاصله توقف (mm)	بار انفجاری (R)	سرعت برخورد (m/s)	زاویه دینامیکی برخورد (درجه)	شکل فصل مشترک	میانگین طول امواج (میکرون)	میانگین دامنه امواج (میکرون)	توزیع مناطق ذوب موضعی در فصل مشترک
۱	۳	۱	۷۶۳	۹/۴۲	موجی کوتاه	۳/۷۲	۲۷	کم مناطق کوچک
۲	۴	۱	۹۰۶	۱۰/۵۹	همراه کمی گردابه	۵/۳۵	۳۲	در جلوی برخی گردابه ها
۳	۲	۱/۵	۶۰۴	۸/۴۱	موجی - مسطح	۳۰	۱۰۰	بسیار کم
۴	۳	۱/۵	۷۸۶	۹/۸۱	موجی کوتاه	۵/۴۲	۳۷	مناطق کوچک نیمه پیوسته بسته های
۵	۴	۱/۵	۹۱۷	۱۱	موجی همراه گردابه	۳۳	۱۴۴	کوچک جلوی گردابه ها



شکل (۳): روش و نمونه آزمون استحکام برشی اتصال بر اساس استاندارد (DIN50162، الف): نمونه، ب): فیکسچر آزمون [۲۱]



شکل (۴): ریزساختار اولیه الف): اینکونل ۷۱۸ ب): فولاد H13.

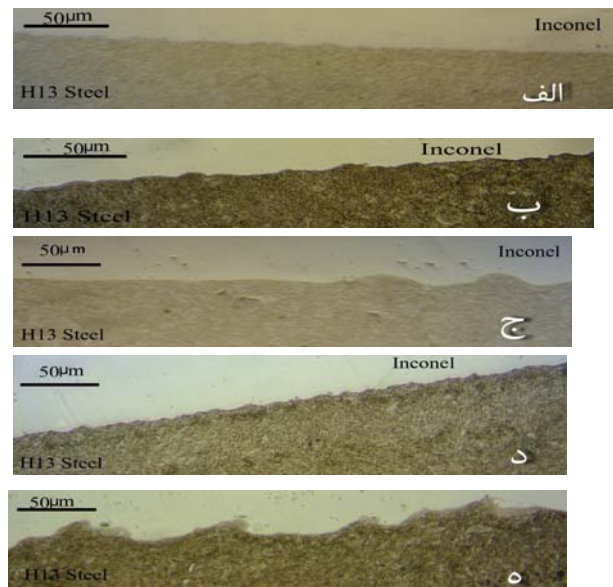
### ۲-۳- بررسی سختی مقطع عرضی اتصالات

جهت تعیین میزان تأثیر فشار ناشی از انفجار بر روی مرز مشترک و مناطق اطراف آن، آزمون ریزسختی 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 و ۵۰۰ میکرون از فصل مشترک اتصال و در دو طرف آن انجام پذیرفت و با میانگین‌گیری نتایج، پروفیل ریزسختی بر حسب فاصله از فصل مشترک در تمامی نمونه‌ها رسم گردید.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی‌های ریزساختاری

ریزساختار اولیه سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و فولاد گرمکار H13 در شکل (۴) دیده می‌شوند. ساختار سوپر آلیاژ متشکل از دانه‌های آستنیت و دوقلوبی‌های آنیل بوده و ساختار فولاد از مارتنزیت تمپر شده به همراه کاربیدهای پراکنده در زمینه تشکیل شده است. کلیه آزمون‌های صورت گرفته با متغیرهای مختلف موفقیت آمیز بوده است. شکل (۵) نمایانگر ریزساختار فصل مشترک آزمون‌های صورت گرفته با تغییر بار انفجاری و فاصله توقف میان ورق‌ها می‌باشد. شکل (۵) نشان می‌دهد که شکل فصل مشترک‌های حاصله به سه صورت مسطح، موجی و موجی همراه با گردابه ایجاد گردیده است. شکل (۵) نشان می‌دهد فصل مشترکی با امواج کوتاه برای آزمون‌های یک و چهار

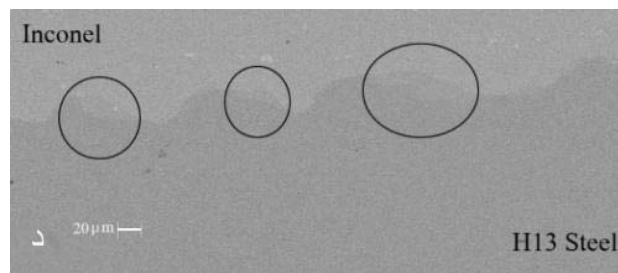
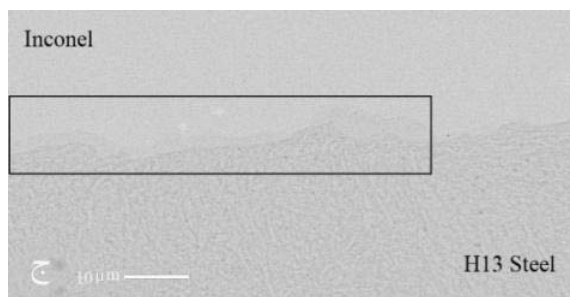
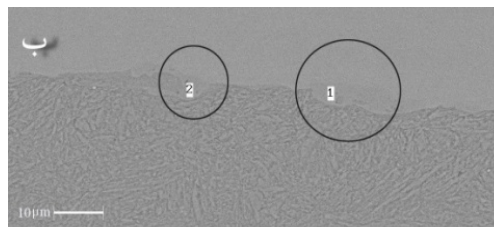
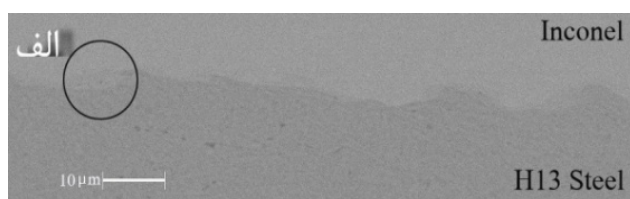


شکل (۵): فصل مشترک‌های تشکیل شده در آزمون‌های انفجاری

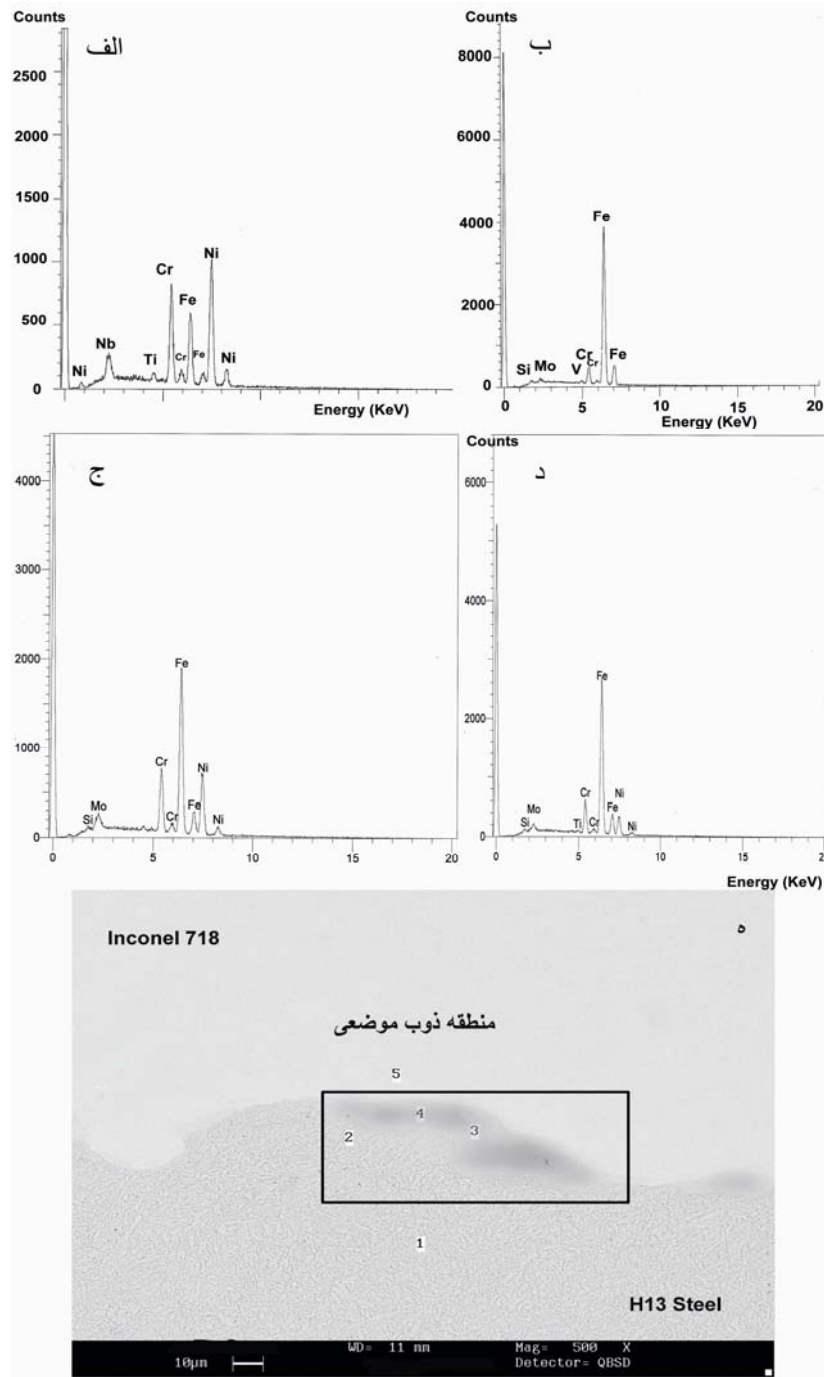
سپس با دستگاه کشش و قید و بند مخصوص که طراحی و ساخته شد، نمونه‌ها تحت فشار قرار گرفتند. ابتدا مساحت دقیق زائده اندازه‌گیری شده و پس از قرارگیری نمونه در فیکسچر، فشار با نرخ ۱ میلی‌متر بر دقیقه بر نمونه وارد گردید. تنش شکست بر اساس تقسیم ماکزیمم حد نیرو اعمالی بر مساحت زائده گزارش می‌گردد. میانگین استحکام دو نمونه به عنوان استحکام نهایی گزارش گردید.

فصل مشترک به سمت حالت موجی و موجی همراه با گردابه تغییر شکل می‌دهد. 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 و به علت تفاوت مومنت 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 سرعت برخورد افزایش یافته و مواد در مجاورت نقطه برخورد در حجم بزرگ تری 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). با افزایش بیشتر زاویه برخورد، قله‌ی موج در جهت حرکت موج انفجاری تغییر شکل پیدا نموده و فصل مشترک گردابه‌ای شکل (۵) ایجاد می‌گردد [۲۲]. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، طول امواج فصل مشترک نیز بر اثر تغییرات زاویه دینامیکی برخورد در هنگام اتصال ورق‌ها تغییر می‌نماید.

ایجاد شده و فصل مشترکی موجی - مسطح برای آزمون سه و فصل مشترک موجی با گردابه برای آزمون‌های دو و پنج حاصل شده است. نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که در یک بار انفجاری ثابت، با افزایش فاصله توقف سرعت برخورد صفحه پرنده و زاویه دینامیکی برخورد افزایش یافته و هم‌چنین در یک فاصله توقف ثابت با افزایش بار انفجاری نیز سرعت برخورد صفحه پرنده و زاویه دینامیکی برخورد افزایش می‌یابد. این موضوع نمایانگر آن است 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 می‌گردند. با توجه به شکل (۵ - الف و ب) و جدول (۳)، در نمونه با بار انفجاری یک، با افزایش فاصله توقف و افزایش انرژی جنبشی برخورد، فصل مشترک به سمت حالت گردابه‌ای تغییر نموده و طول موج و دامنه امواج افزایش یافته است. در آزمون‌های با بار انفجاری ۱/۵، همان‌طور که در شکل‌های (۵ - ج، د و ه) و جدول (۳) ملاحظه می‌گردد، در نمونه با کمترین فاصله توقف به دلیل کم بودن زاویه دینامیکی برخورد، فصل مشترکی به صورت موجی - مسطح ایجاد شده و با افزایش فاصله توقف

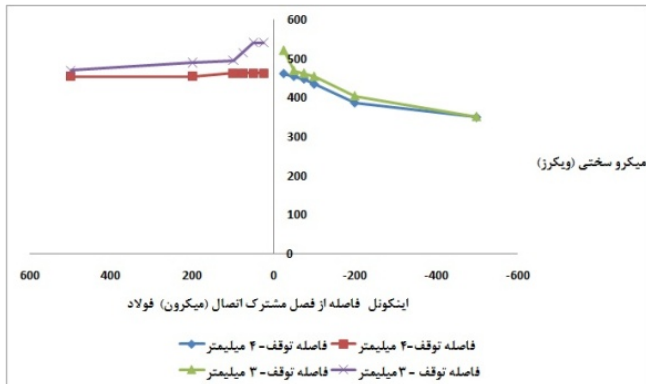


شکل (۶): تصویر آشکارساز الکترون بازگشتی فصل مشترک آزمون‌های جدول (۳): الف): آزمون شماره ۱، ب): آزمون شماره ۲، ج): آزمون شماره ۴، د): آزمون شماره ۵.

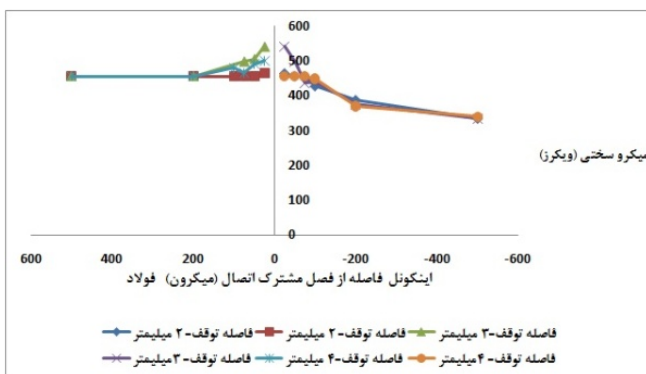


شکل (۷): آنالیز EDS از مناطق فصل مشترک، الف): منطقه اینکونل (نقطه شماره ۵، ب): منطقه فولاد (نقطه‌های شماره ۱ و ۲، ج): منطقه جلوی گردابه موج (نقطه شماره ۳، د): منطقه جلوی گردابه موج (نقطه شماره ۴، ه): منطقه مورد آنالیز

جت گیرافتاده، از غیر یکنواختی ترکیب شیمیایی برخوردار می‌باشد.



شکل (۸): تغییرات ریزسختی برحسب فاصله از فصل مشترک اتصال برای آزمون‌های با بار انفجار یک



شکل (۹): تغییرات ریزسختی برحسب فاصله از فصل مشترک اتصال برای آزمون‌های با بار انفجار یک و نیم

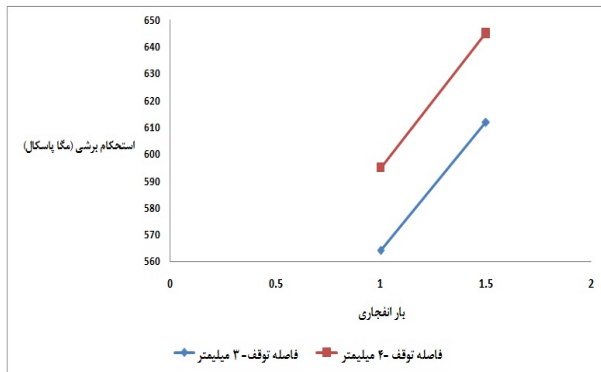
### ۳-۳- بررسی‌های ریزسختی سنجی

تغییرات ریزسختی آزمون‌ها در بار انفجاری ثابت در طول فصل مشترک اتصال، در شکل‌های (۸ و ۹) ملاحظه می‌گردد. همچنین میزان سختی در مجاورت فصل مشترک هر اتصال در جدول (۴) ملاحظه می‌گردد. نتایج ریزسختی سنجی نمایانگر افزایش سختی در دو آلیاژ مورد اتصال با نزدیک شدن به فصل مشترک را دارد که می‌تواند بر اساس تغییر شکل پلاستیکی شدید در این منطقه و پدیده سخت شدن شوکی ناشی از امواج انفجار [۲۴] توجیه گردد. این تغییرات به طور شدیدی در سمت سوپرآلیاژ اینکونل ملاحظه می‌گردد. در آزمون‌های با بار

۲-۳- بررسی ریزساختاری میکروسکوپ الکترونی روبشی  
شکل (۶) نمایانگر تصاویر فصل مشترک‌های حاصله از آزمون‌های مختلف، توسط آشکارساز الکترون بازگشتی میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌باشد. شکل (۶) نمایانگر یک تغییر وضعیت واضح مابین دو آلیاژ اتصال یافته در فصل مشترک می‌باشد. در جوشکاری انفجاری دو فصل مشترک فلز به فلز و فلز به مذاب انجماد یافته می‌تواند در فصل مشترک حاصل گردد. در فشارهای برخوردی بالا، گردها می‌توانند در فصل مشترک اتصال ایجاد شوند و این گردها ممکن است در برخی مناطق فصل مشترک ایجاد مناطق ذوب موضعی نمایند که ایجاد این مناطق بر اساس ایجاد گرمای بی دررو در اثر گیر افتادن گردها در جلوی جبهه برخی امواج می‌باشد. این مناطق موضعی با فلز سرد اطراف احاطه شده و تحت سرعت سرد شدن بالایی در حد  $10^7 - 10^5$  K/S قرار دارد [۲۳]. جدول (۳) نمایانگر نحوه توزیع این مناطق در فصل مشترک‌های حاصله از آزمون‌های انجام شده می‌باشد.

با توجه به جدول (۳) و شکل (۶) ملاحظه می‌شود با افزایش فاصله توقف و یا میزان بار انفجاری به دلیل افزایش فشار و انرژی برخورد میزان این مناطق در فصل مشترک خصوصاً در مجاورت گردها موج‌ها افزایش می‌یابد. همچنین از آنجایی که ضریب هدایت حرارتی آلیاژ اینکونل ( $11.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) کمتر از ضریب هدایت حرارتی فولاد H13 ( $28.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) می‌باشد در هنگام سرد شدن این ترکیبات به جهت انتقال حرارت بیشتر به سمت اینکونل، در سمت اینکونل متمرکز می‌گردند شکل (۶). آنالیز EDS نیز برای نمونه از داخل منطقه نشان داده شده در شکل (۷-ه) مربوط به جلوی یکی از گردهای ایجاد شده (آزمون شماره ۵) صورت پذیرفته که نتایج آن همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود نمایانگر ایجاد ترکیبی مخلوط در این مناطق موضعی از دو آلیاژ، بر اساس ماهیت حرکت تلاطمی و چرخشی جت گیرافتاده در این مناطق می‌باشد [۲۳]. همان‌طور که با مقایسه شکل (۷-ج و د) دیده می‌شود این ترکیب در نقاط مختلف به دلیل سرعت سرد شدن بالا و تلاطم



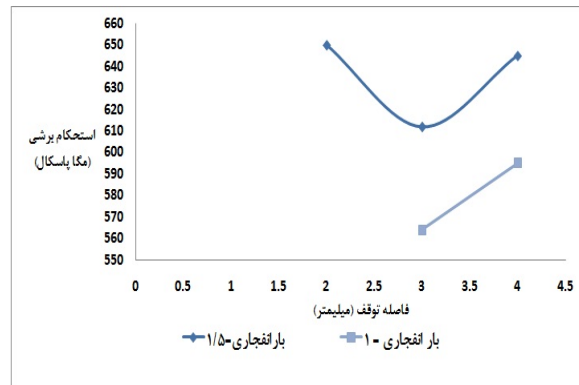


شکل (۱۱): تغییرات استحکام برشی اتصالات در فاصله توقف ثابت با بار انفجاری

### ۳-۴- اندازه‌گیری استحکام برشی

نتایج آزمون‌های استحکامی اتصالات صورت گرفته در جدول (۴) ملاحظه می‌گردد. همچنین تغییرات استحکام برشی با فاصله توقف در بار انفجاری ثابت، و این تغییرات با بار انفجاری در فاصله توقف ثابت، در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ملاحظه می‌شود. شکل (۱۰) نشان می‌دهد در نمونه‌های اتصال یافته با بار انفجاری یک، با افزایش فاصله توقف استحکام افزایش یافته که می‌تواند براساس افزایش دامنه امواج حاصله در فصل مشترک جدول (۳) و افزایش اثر قفل شوندگی مکانیکی ناشی از افزایش سطح موثر اتصال [۱۲] در فصل مشترک توجیه گردد. استحکام اتصالات صورت گرفته با بار انفجاری یک و نیم دارای یک مقدار کمینه در فاصله توقف سه میلی‌متر می‌باشد که این مقدار کمینه بر اساس ایجاد حالت موجی شکل با طول موج کوتاه و کاهش سطح موثر اتصال و اثر قفل شوندگی مکانیکی ناشی از امواج شکل (۵-د) و ایجاد لایه نیمه پیوسته ذوب موضعی شکل (۶-ج) در فصل مشترک ایجاد می‌گردد. شکل (۱۱) نشان می‌دهد که در یک فاصله توقف ثابت با افزایش میزان بار انفجاری، به استحکام فصل مشترک افزوده می‌شود. با افزایش بار انفجاری و سرعت برخورد، به میزان انرژی برخوردی نیز افزوده می‌گردد و در نتیجه با افزایش انرژی داخلی فصل مشترک، استحکام افزایش می‌یابد.

انفجاری یک، با افزایش فاصله توقف همان‌طور که در شکل (۸) ملاحظه می‌گردد سختی در فصل مشترک کاهش یافته که علت این موضوع می‌تواند بر اساس افزایش سرعت برخورد و ایجاد فصل مشترک گردابه‌ای با افزایش میزان فاصله توقف توجیه گردد که افزایش سرعت و انرژی برخوردی، باعث افزایش دما در فصل مشترک و امکان سیلان بیشتر شده که باعث افت سختی در فصل مشترک گردیده است. برای نمونه‌های آزمون‌های با بار انفجاری یک و نیم، همان‌طور که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود میزان سختی برای نمونه با فاصله توقف دو میلی‌متر به دلیل کم بودن سرعت برخوردی و ماهیت موجی - مسطح بودن فصل مشترک شکل (۵-ج) از مقدار کمتری نسبت به دیگر آزمون‌ها برخوردار بوده و با افزایش فاصله توقف، سختی در آزمون‌های دیگر به دلیل تغییر شکل پلاستیک شدیدتر ناشی از سرعت برخورد بالاتر افزایش یافته است.



شکل (۱۰): تغییرات استحکام برشی اتصالات در بار انفجاری ثابت با فاصله توقف

ماکزیمم سختی برای نمونه با فاصله توقف ۳ میلی‌متر در حد ۵۴۱ و یکرز در دو سمت فصل مشترک حاصل شده است. با افزایش فاصله توقف به ۴ میلی‌متر و ایجاد مناطق گردابه‌ای بیشتر ناشی از افزایش دما سختی در مجاورت فصل مشترک افت نموده است شکل‌های (۵-ه و ۶-د و ۷-ه).

- [10] T. Z. Blazynsky, "Explosive Forming Welding and Compaction", Applied Science Publisher, 1983.
- [11] S. Ettaqi, L. Langlois and R. Bigot, "Cobalt-based super Alloy Layers Deposited on X38CrMoV5 Steel Base Metal by Explosion Cladding Process", Surf coat & Tech, Vol. 202, pp. 3306-3315, 2008.
- [12] A. Durgutlu, H. Okuyucu and B. Gulenc, "Investigation of Effect of the Stand-off Distance on Interface Characteristics of Explosively Welded Copper and Stainless Steel", Mater & Des, Vol. 29, pp. 1480-1484, 2008.
- [13] M. Acarer, B. Gulenc and F. Findik, "Investigation of Explosive Welding Parameters and Their Effects on Micro Hardness and Shear Strength", Mater & Des, Vol. 24, pp. 659-664, 2003.
- [14] N. Kahraman and B. Gulenc, "Microstructural and Mechanical Properties of Cu-Ti Plates Bonded through Explosive Welding Process", Mater Proc Tech, Vol. 169, pp. 67-71, 2005.
- [15] B. Gulenc, "Investigation of Interface Properties and Weldability of Aluminum and Copper Plates by Explosive Welding Method", Mater & Des, pp. 275-278, 2008.
- [16] A. Durgutlu, B. Gulenc and F. Finidik, "Examination of Copper/Stainless Steel Joints Formed by Explosive Welding", Mater & Des, Vol. 26, pp. 497-507, 2005.
- [17] S. A. A. Akbari Mousavi and S. T. S. Al-Hassani, "Numerical and Experimental Studies of Mechanism of Wavy Interface Formations in Explosive/Impact Welding", J Mech Phys Sol, Vol. 12, pp. 251-279, 2005.
- [18] S. A. A. Akbari Mousavi, S. T. S. Al-Hassani and S. J. Burley, "Simulation of Explosive Welding using the Williamsburg Equation of State to Model Low Detonation Velocity Explosives", Int J Imp Eng, Vol. 31, pp. 719-734, 2005.
- [19] S. A. A. Akbari Mousavi, S. T. S. Al-Hassani, W. Byers Brown and S. J. Burley, "Simulation of Explosive Welding with ANFO Mixtures", J Prop Expl Pyrot, Vol. 29, pp. 188-196, 2004.
- [20] S. A. A. Akbari Mousavi, S. T. S. Al-Hassani and L. A. Barrett, "Explosive Welding of Metal Plates", Mater Proc Tech, Vol. 202, pp. 224-239, 2008.
- [21] Standard 50162, "Determination of Shear Strength between Cladding Metal and Parent Metal in Shear Test", DIN, 1978.
- [۲۲] س. ع. ا. اکبری موسوی و پ. فرهادی سرتنگی، "جوشکاری انفجاری صفحات تیتانیوم خالص تجاری به فولاد زنگ نزن ۳۰۴"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۵.
- [23] S. A. A. Akbari Mousavi and P. Sartangi, "Experimental Investigation of Explosive Welding of Cp-titanium/AISI 304 Stainless Steel", Mater & Des, Vol. 30, pp. 459-468, 2009.
- [24] R.. Kacar and M. Acarer, "An Investigation on the Explosive Cladding of 316 Lstainless Steel-din-P355GH Steel", J Mater Proc Tech, Vol. 152, pp. 91-96, 2004.

#### ۴- نتیجه گیری

- ۱- فصل مشترک‌هایی به صورت موجی - مسطح، موجی و موجی گردابه‌ای در فصل مشترک اینکونل ۷۱۸ - فولاد گرم کار ایجاد شده است.
- ۲- 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.
- ۳- سختی با نزدیک شدن به فصل مشترک افزایش می‌یابد که تغییرات سختی در اینکونل شدیدتر می‌باشد.
- ۴- استحکام برشی فصل مشترک تابع تغییرات فاصله توقف و بار انفجاری و مورفولوژی فصل مشترک می‌باشد.

#### ۵- مراجع

- [1] S. A. Rizvi and T. I. Khan, "Investigating the Change in Wear Behavior of Tool Steel after Surface Melting and Gaseous Alloying", Trib Int, Vol. 32, pp. 567-574, 1999.
- [2] T. I. Khan, S. A. Rizvi and K. Matsuura, "The Effect on Wear Behavior of H13 Tool Steel Surfaces Modified using a Tungsten arc Heat Source", Wear, Vol. 244, pp. 154-164, 2000.
- [3] C. Bournicon, "Stresses and Damage Modes in Forging Tools", Traitements Thermiques (France), Vol. 246, pp. 70-77, 1999.
- [4] Specialty Handbook, Tool Materials, ASM, 1995.
- [5] Metals Handbook, Welding, Brazing, and Soldering, ASM, 1991.
- [6] P. Fournier and A. Bennani, "Interet du Rechargement des Outils de Forgeagea Chaud Fortement Sollicités", Bulletin du cercle d' Etudes des Metaux (France), Vol. 18, pp. 1-20, 2000.
- [7] J. N. Dupont, C. V. Robino and A. R. Marder, "Solidification and Weld Ability of Nb-Bearing Super Alloys", Weld J, Vol. 77, pp. 417-431, 1998.
- [8] J. N. Dupont, C. V. Robino, A. R. Marder, M. R. Notis and J. R. Michael, "Solidification of Nb-Bearing Superalloys: Part I. Reaction Sequences", Meta Mater Trans A, Vol. 29, pp. 2785-2796, 1998.
- [9] G. A. Knorovsky, M. J. Cieslak, T. J. Headley, A. D. Romig and W. F. Hammetter, "INCONEL 718: A Solidification Diagram", Meta Mater Trans A, Vol. 20, pp. 2149-2158, 1989.