

اثر متغیرهای جوشکاری انفجاری بر مرفولوژی فصل مشترک آلومینیوم ۲۰۲۴ به فولاد St-37

حمیدرضا شاهرودی، جمشید آقازاده و فریدون سخاوت

چکیده: در این مقاله برخی از جنبه‌های ریزساختاری فصل مشترک جوش‌های انفجاری آلومینیوم به فولاد که در شرایط مختلف جوشکاری شده‌اند، مطالعه شده است. جنبه‌های ریزساختاری مورد بررسی شامل طول و دامنه‌ی امواج و ابعاد فاز میانی تشکیل شده در فصل مشترک جوش است که بکمک میکروسکوپ نوری اندازه‌گیری شده است. پس از مقایسه‌ی نمونه‌های جوشکاری شده مشخص شد که افزایش فاصله‌ی توقف باعث افزایش ابعاد فاز میانی می‌شود. ولی طول و دامنه‌ی امواج فصل مشترک با فاصله‌ی توقف تغییری نمی‌کند. افزایش خرج انفجاری و کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده هر دو باعث افزایش طول و دامنه‌ی امواج و ابعاد فاز میانی می‌گردند.

واژه‌های کلیدی: فاصله‌ی توقف - خرج انفجاری - لوله‌ی پرنده - امواج فصل مشترک و ابعاد فاز میانی

۱. مقدمه

بنا بر اظهار نظر بسیاری از محققان، جوش انفجاری تحت برخورد مایل و با سرعت بالای سطوح صورت می‌گیرد [1, 2, 3]. در اثر برخورد مایل اجزا با سرعت بالا، جتی مرکب از ذرات سطحی در نقطه‌ی برخورد تشکیل و با سرعت بالا به بیرون از سیستم رانده می‌شود. بر اساس یک نظریه [4]، هنگام حرکت جت فلزی و پیشروی آن در بین صفحات در حال برخورد با یکدیگر، یک حالت موجی در فصل مشترک اتصال ایجاد می‌گردد که دامنه و طول موج امواج آن به متغیرهای کنترل کننده‌ی فرآیند وابسته است. در شکل ۱ نمایش نمادین انجام عمل جوشکاری انفجاری به‌مراه جزئیات فرآیند نشان داده شده است. مکانیزم عمومی و مورد پذیرش انجام این فرآیند مبتنی بر تشکیل جت در نقطه‌ی برخورد و حرکت آن مابین صفحات می‌باشد [1]. با تشکیل جت دو سطح عاری از آلودگی سطحی ایجاد شده و با فشار ناشی از انفجار، سطوح به یکدیگر جوش می‌خورند.

متغیرهای مستقل کنترل کننده‌ی فرآیند جوشکاری انفجاری که تعیین کننده‌ی مرفولوژی، ریزساختار، نوع و میزان فازهای تشکیل

شده در فصل مشترک، نوع پراکنندگی و دانه‌بندی فازها می‌باشند بصورت زیر معرفی شده است [۵]:

۱- فاصله‌ی توقف یا فاصله‌ی هوایی (S).

۲- جرم مواد منفجره بر واحد وزن لوله‌ی پرنده (M).

۳- ضخامت لوله‌ی پرنده (F).

شاخص‌های کنترل کننده‌ی مرفولوژی فصل مشترک که اندازه‌ی آنها با تغییر پارامترهای فوق قابل تغییر است، بصورت زیر معرفی شده است [۶] (شکل ۲):

۱- طول موج امواج تشکیل شده در فصل مشترک (l).

۲- دامنه و عمق نفوذ امواج تشکیل شده‌ی فصل مشترک در وجه فولادی (a).

۳- طول (b) و پهنای (c) فاز ترکیبی فصل مشترک.

اثر عوامل مکانیکی فوق بر ابعاد امواج فصل مشترک جوش، در جوشکاری انفجاری جفت‌های فلزی مختلف به یکدیگر توسط Salem و همکاران [7] مورد ارزیابی قرار گرفته است. بنا بر اظهارات او تعامل دو مسئله‌ی افزایش انرژی جت در مقابل کاهش درصد محبوس شدن آن در فصل مشترک باعث می‌شود که مشخصات امواج تشکیل شده در فصل مشترک ثابت باقی بماند. پدیده‌ی افزایش ابعاد امواج فصل مشترک (شامل طول و دامنه‌ی آن) با افزایش مقدار خرج انفجاری نیز مورد توجه قرار گرفته است [7]. افزایش M (مشابه افزایش فاصله‌ی توقف) موجب افزایش انرژی جت تشکیل شده در فصل مشترک می‌گردد.

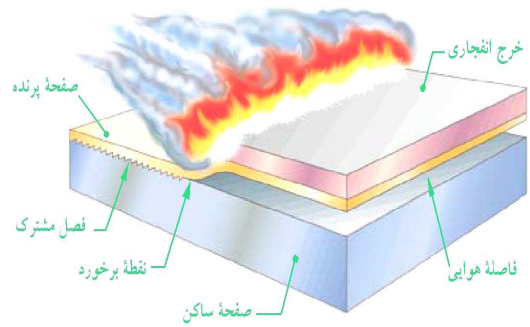
مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۸/۱۰ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۳/۴/۲۶ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر حمیدرضا شاهرودی استادیار دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، Shahverdi@modares.ac.ir

جمشید آقازاده دانشیار دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

فریدون سخاوت کارشناس ارشد مهندسی معدن و متالورژی

آلومینیوم تجاری خالص به فولاد کم کربن را گزارش نمودند [9]. آنها افزایش ابعاد فاز میانی را تا $M=1$ بصورت خطی و در مقادیر بالاتر بصورت نمایی گزارش کرده و دلیل آنرا (مشابه نتایج [V] Salem و با استفاده از نتایج [8] Gupta) به افزایش فاصله‌ی توقف نسبت دادند. در این حالت با انفجار ماده‌ی منفجره، لوله‌ی پرنده با شتاب گرفتن در این فاصله به سرعت بالاتری هنگام برخورد دست یافته است. از طرفی افزایش سرعت برخورد صفحه‌ی پرنده موجب افزایش سرعت جت تشکیل شده در صفحه‌ی پرنده موجب افزایش سرعت جت تشکیل شده در راستای فصل مشترک و افزایش اندازه‌ی نفوذ آن می‌شود.



شکل ۱. نمایش فرآیند جوشکاری انفجاری سطوح

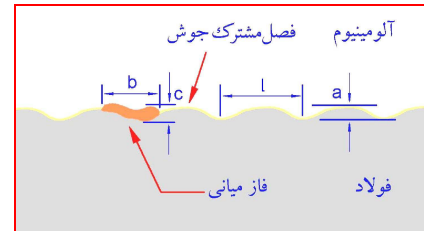


شکل ۳- فاز میانی تشکیل شده در فصل مشترک موجی جوش‌های انفجاری آلومینیوم 2024 به فولاد St-37 [۶]

هنگام جوشکاری انفجاری آلومینیوم به فولاد بدلیل تفاوت زیاد بین خواص فیزیکی و مکانیکی، در فصل مشترک موجی جوش، بمیزان قابل ملاحظه‌ای فاز میانی تشکیل می‌گردد [10]. نمونه‌ای از این فاز در فصل مشترک جوش انفجاری آلومینیوم ۲۰۲۴ به فولاد St-37 در شکل ۳ دیده می‌شود. پس از مطالعات میکروسکوپی معلوم شده است که ترکیب شیمیایی آن مخلوطی از درصد‌های مختلف فازهای تعادلی موجود در دیاگرام فازی آهن - آلومینیوم می‌باشد [۶].

۲. روش تحقیق

در جدول ۱ متغیرهای فرآیند و مقادیر مربوط به هر متغیر آورده شده است. قطر تویی ساکن فولادی در تمامی آزمایش‌ها ۴۴ میلی‌متر انتخاب گردید. جنس اجزای مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌های تجربی آلومینیوم ۲۰۲۴ و فولاد St-37 با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۲ انتخاب گردید. شکل ۴ نشان دهنده‌ی مونتاژ نهایی اجزای آزمایش می‌باشد. آزمایش‌های مورد نظر در فضای باز صورت گرفته و از ماده‌ی منفجره‌ی Amatol60/40 با سرعت انفجار ۴۰۰۰ بعنوان ماده‌ی منفجره در تمام آزمایش‌ها استفاده گردیده است. با توجه به توضیحات فوق هفت آزمایش طراحی و انجام شده که مشخصات آن در جدول ۳ آورده شده است. برای بررسی دقیق‌تر ریزساختار ناحیه‌ی پیوند در نمونه‌های مورد مطالعه، کل طول نمونه به سه قسمت تقسیم و تحت عنوان



شکل ۲. شاخص‌های قابل اندازه‌گیری از فصل مشترک نمونه‌های جوشکاری شده به روش انفجاری

اما در این حالت (برخلاف اثر افزایش فاصله‌ی توقف) افزایش انرژی جت همراه با افزایش زاویه‌ی برخورد دو سطح به یکدیگر نیست و زاویه‌ی برخورد دو سطح ثابت می‌ماند. بنابراین افزایش انرژی جت موجود در فصل مشترک با زاویه ثابت آن در محل نقطه‌ی برخورد (که تعیین کننده‌ی درصد انرژی حبس شده از جت پیشرو در فصل مشترک، بین صفحات در حال برخورد است)، موجب می‌شود که با برخورد دو صفحه، درصد انرژی بیشتری از جت فلزی، در گردابه‌های فصل مشترک محبوس گردد. این مسئله در نهایت موجب اعوجاج بیشتر فصل مشترک و یا عبارت دیگر تولید امواج با ابعادی بالاتر در فصل مشترک می‌شود. تأثیر ضخامت صفحه‌ی پرنده بر ابعاد امواج تشکیل شده در فصل مشترک نیز بررسی شده است [7]. علت تأثیر ضخامت لوله‌ی پرنده بر طول و دامنه‌ی امواج تشکیل شده در فصل مشترک آن است که با کاهش ضخامت صفحه‌ی پرنده، تلفات انرژی موج ضربه‌ای ناشی از انفجار، هنگام عبور از مقطع آن کاهش می‌یابد. کاهش تلفات انرژی موجب افزایش راندمان جوشکاری شده و باعث می‌شود که در شرایط یکسان جوشکاری، انرژی جت تشکیل شده در فصل مشترک افزایش یابد. با توجه به نتایج Gupta و همکاران [8] افزایش انرژی جت در فصل مشترک موجب می‌شود که در یک زاویه‌ی ثابت برخورد یا عبارت دیگر یک مقدار ثابت از انرژی محبوس بین صفحات (بنا به نظریه‌ی Crossland [4] در مورد مکانیزم موجی شدن فصل مشترک) دامنه‌ی امواج تشکیل شده در فصل مشترک افزایش یابد. Balakrishna و همکاران پدیده‌ی افزایش ابعاد فاز میانی را با افزایش فاصله‌ی توقف و مقدار خرج انفجاری هنگام جوشکاری انفجاری

جدول ۱- مقادیر متغیرهای فرآیند

متغیر	واحد	مقادیر
S	mm	۲ و ۴
M	g/g	۱/۲ و ۲
F	mm	۳ و ۶

جدول ۲. ترکیب شیمیایی اجزای آلومینیومی و فولادی مورد استفاده در آزمایشات جوشکاری انفجاری

عناصر	Zn	Mn	Pb	Cu	Fe	Si	Mg	Ni	Ti	Cr	Sn	Sb
آلومینیوم	.۱۹	.۱۰۵	.۱۹	۳/۵۹	.۶۴	.۶۳	.۴۴	.۰۲	.۰۱	.۰۰۹	.۰۰۵	.۰۰۷
عناصر	Mn	C	Si	Cu	Ni	Cr	Sn	S	Co	Mo	Al	As
آهن	.۶۶	.۴۴	.۱۹	.۱۷	.۰۹	.۰۷	.۰۲	.۰۱۶	.۰۰۷	.۰۰۸	.۰۰۵	.۰۰۳

جدول ۳- شرایط انجام آزمایش‌های جوشکاری انفجاری

شماره آزمایش	S (mm)	M (g/g)	F (mm)
۱	۲	۱/۲	۶
۲	۴	۱/۲	۶
۳	۲	۲/۰	۶
۴	۴	۲/۰	۶
۵	۲	۱/۲	۳
۶	۴	۱/۲	۳
۷	۲	۲/۰	۳

که در آن \bar{X} متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و S انحراف معیار اندازه‌گیری‌ها می‌باشد. با توجه به قوانین حاکم بر جوامع آماری می‌توان گفت که با ۹۹ درصد اطمینان، مقادیر واقعی مربوط به پارامترهای طول موج، دامنه‌ی موج، طول فاز میانی و پهنای فاز میانی در نمونه‌های گوناگون، در بازه‌ی فوق قرار دارد [1].

۳. نتایج

بررسی نتایج آزمایش‌های این پژوهش و مقایسه آن با نتایج گزارش شده توسط سایر محققین اثر عوامل اصلی مؤثر بر مرفولوژی و ریزساختار فصل مشترک را روشن تر می‌سازد. ابعاد طول موج، دامنه‌ی موج، طول فاز میانی فصل مشترک و ماکزیمم پهنای آن در نمونه‌های مورد مطالعه از ۱ تا ۷ در راستای فصل مشترک که شرایط انجام آنها در جدول ۳ ذکر گردید، میانگین‌گیری شده و در جدول ۴ به همراه بازه اطمینان آن درج شده است. با توجه به شرایط متغیر

نواحی ۱، ۲ و ۳ فصل مشترک نامگذاری شد (شکل ۵). کل فصل مشترک نمونه‌ها در سه ناحیه‌ی مزبور پس از عملیات متالوگرافی در زیر میکروسکوپ نوری OLYMPUS مورد مطالعه قرار گرفت. مقادیر شاخص‌های کنترل‌کننده‌ی مرفولوژی فصل مشترک (مقادیر a, b, c) در ناحیه‌ی ۲ از فصل مشترک هر نمونه نشان داده شده در شکل ۵ که در حقیقت ثلث میانی طول آن بود اندازه‌گیری شد. برای انجام این کار کل طول این ناحیه به ده قسمت تقسیم گردید و با ملاحظه‌ی فصل مشترک نمونه در آن ده نقطه، ابعاد مشاهده شده توسط خط‌کش مدرج نصب شده در روی عدسی چشمی میکروسکوپ اندازه‌گیری و ثبت گردید. در مرحله‌ی بعد با محاسبه‌ی مقادیر انحراف معیار مربوط به هر نمونه، بازه‌ی اطمینان برای مقادیر متوسط بدست آمده نیز با استفاده از رابطه‌ی (۱) نشان داده شد [11]:

$$\bar{X} \pm 1.03 .S \quad (1)$$

به کمک مقادیر مندرج در جدول ۵ تأثیر تغییر هر پارامتر را در مقادیر متفاوت دو پارامتر دیگر می‌توان مشاهده نمود. برای نمونه با مقایسه‌ی مقادیر مندرج در ردیف اول جدول نسبت به ردیف دوم نشان می‌دهد که مطابق جدول ۳ در ردیف اول $M=1.2$ و در ردیف دوم $M=2$ بوده است. همچنین بین مقادیر مندرج در ردیف‌های اول و سوم این جدول میتوان مقایسه انجام داد. مطابق جدول ۳، تنها تفاوت شرایط انجام آزمایش‌ها در ردیف اول جدول ۵ نسبت به ردیف سوم آن، ضخامت لوله‌ی پرنده است که از ۶ به ۳ میلیمتر کاهش یافته است. بصورت مشابه بین ردیف‌های دیگر جدول، امکان مقایسه وجود خواهد داشت. نمودارهای شکل ۶ نتایج این مقایسه‌ها را نشان می‌دهد.

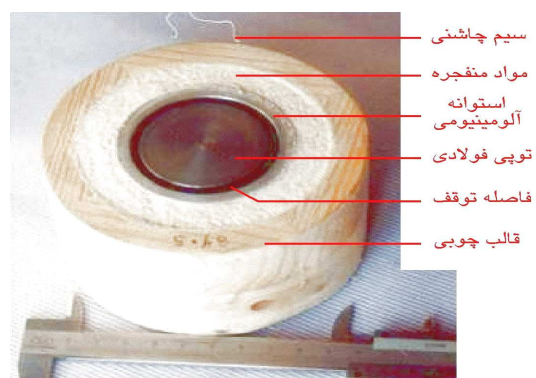
۴. بحث

۴-۱. اثر فاصله‌ی توقف

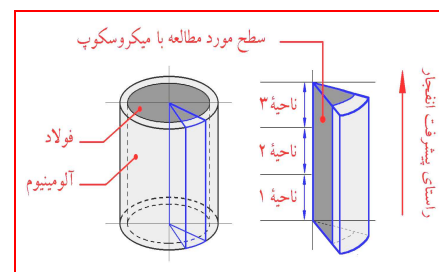
بررسی مقادیر متوسط طول و دامنه‌ی امواج تشکیل شده در ناحیه‌ی ۲ فصل مشترک در نمونه‌های ۱ با ۲، ۳ با ۴ و ۵ با ۶ (جدول ۵) نشان می‌دهد که این مقادیر با افزایش فاصله‌ی توقف تغییر محسوسی نداشته‌اند. بنا بر قوانین حاکم بر جوامع آماری [11]، می‌توان گفت که چون عدد مربوط به افزایش طول موج در جدول ۵ در هر مقایسه، کمتر از بازه‌ی اطمینان مربوط به آن مقادیر در جدول ۴ می‌باشد، طول متوسط امواج فصل مشترک منطبق بر نتایج Salem و همکاران [7] با افزایش فاصله‌ی توقف از ۲ به ۴ میلیمتر تقریباً ثابت مانده است. متوسط دامنه‌ی امواج در سه مقایسه‌ی انجام شده در جدول ۵ را نیز مشابه استدلال فوق می‌توان ثابت در نظر گرفت. نکته‌ی دیگری نیز که احتمالاً خطای اندازه‌گیری را در داده‌های ارائه شده در این تحقیق افزایش می‌دهد، توجه به این نکته است که نتایج بدست آمده توسط Salem و همکاران [7] بر روی فصل مشترک جوش، از نوع موجی نرمال و فاقد فاز میانی بوده است. بنابراین احتمالاً تشکیل فاز میانی در فصل مشترک جوش‌های آلومینیوم ۲۰۲۴ به فولاد St-37 دقت اندازه‌گیری را کاهش داده است.

ریزساختار فصل مشترک در دو نمونه‌ی ۱ و ۲ در شکل ۷ دیده می‌شود. محل‌های تشکیل فاز میانی در نمونه‌ی ۱ با شماره‌های ۱، ۲ و ۳ در شکل ۷ (الف) نشان داده شده است. با ملاحظه‌ی شکل ۷ و مقایسه‌ی اعداد مربوط به $4b$ در جدول ۵ مشاهده می‌شود که مقادیر مربوط به تغییر طول فاز میانی در فصل مشترک با افزایش فاصله‌ی توقف افزایش یافته است. در نمونه‌ی ۵ نسبت به ۶، شدت این افزایش، باندازه‌ی ۳۳۱ میکرون بوده است. افزایش مقدار طول فاز میانی در جدول ۵ (مشابه اظهار نظر Balakrishna و

در آزمایش‌ها می‌توان با در نظر گرفتن زوج‌های دوتایی اثر افزایش سه متغیر مؤثر را بر مشخصات اندازه‌گیری شده مشاهده نمود. بررسی شرایط انجام آزمایش در مقایسه‌ی دو بدو میان نمونه‌های ۱ با ۲، ۳ با ۴ و ۵ با ۶ در جدول ۳ نشان می‌دهد که در این نمونه‌ها شرایط انجام جوشکاری یکسان است، فقط فاصله‌ی توقف تغییر نموده و از ۲ میلی متر به ۴ میلی متر افزایش یافته است. مقایسه‌ی دو بدو میان نمونه‌های ۱ با ۲، ۳ با ۴ و ۵ با ۶ در جدول ۳ نشان می‌دهد که در این نمونه‌ها شرایط انجام جوشکاری یکسان بوده و تنها خرج انفجاری از $M=1.2$ به $M=2$ افزایش یافته است. در نمونه‌ی ۱ با ۲، ۵ با ۶ و ۳ با ۴ مطابق جدول ۳، تنها ضخامت لوله پرنده متغیر بوده است. در جدول ۵ تغییر مقادیر متوسط اندازه‌گیری شده در زوج‌های دوتایی فوق نشان داده شده است.



شکل ۴- مونتاژ نهایی اجزای آزمایش جهت انجام جوشکاری



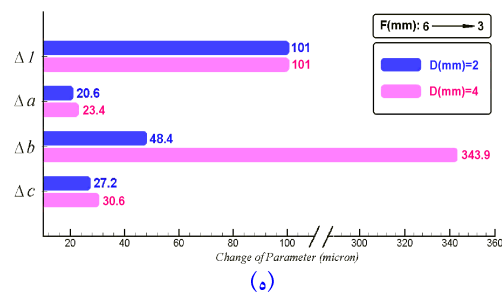
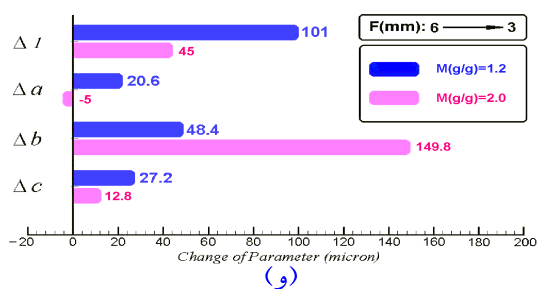
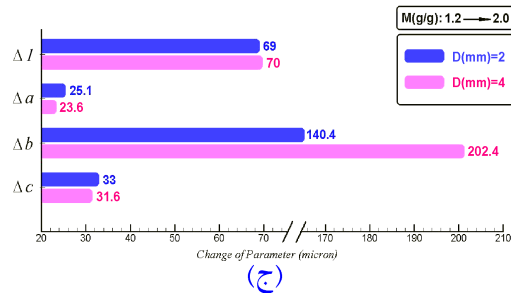
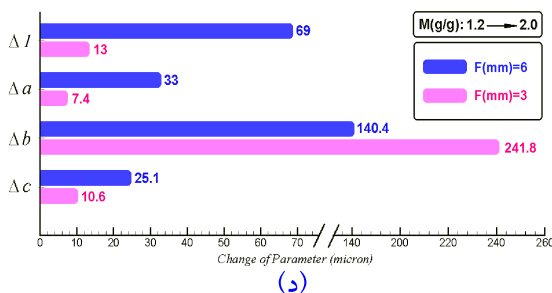
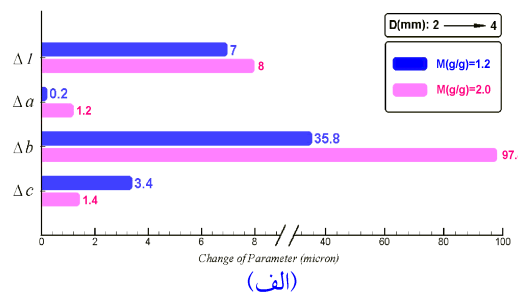
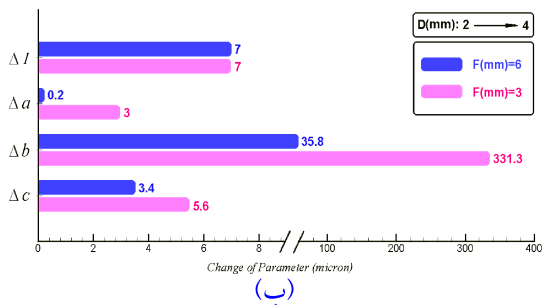
شکل ۵- منطقه‌ی مورد مطالعه‌ی متالوگرافی و تقسیم‌بندی نواحی امتداد آن

جدول ۴: مقادیر متوسط ابعاد اندازه‌گیری شده از ناحیه‌ی ۲ فصل مشترک

شماره آزمایش	متوسط متغیر اندازه‌گیری شده (میکرون)			
	c	b	a	l
۱	$7/2 \pm 1$	$12/8 \pm 2$	$16/2 \pm 1$	179 ± 7
۲	$10/6 \pm 2$	$48/6 \pm 8$	$16/4 \pm 1$	186 ± 7
۳	$32/2 \pm 4$	$153/2 \pm 12$	$49/2 \pm 3$	248 ± 9
۴	$33/6 \pm 6$	251 ± 22	48 ± 2	256 ± 9
۵	$34/4 \pm 5$	$61/2 \pm 10$	$36/8 \pm 3$	280 ± 13
۶	$40/6 \pm 5$	$392/5 \pm 23$	$39/8 \pm 3$	287 ± 12
۷	45 ± 4	303 ± 30	$44/2 \pm 3$	293 ± 14

جدول ۵: میزان تغییر مقادیر متوسط اندازه‌گیری شده از فصل مشترک در اثر افزایش فاصله‌ی توقف، افزایش خرج انفجاری و کاهش ضخامت لوله‌ی

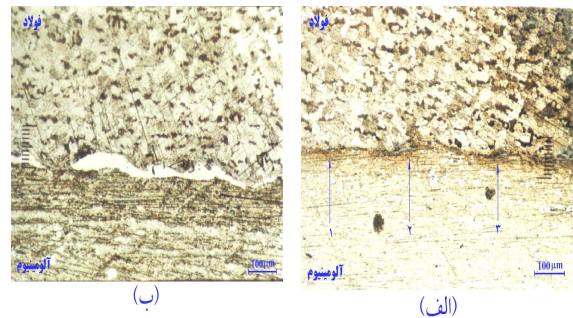
ردیف	متغیر مورد مقایسه	مقایسه‌ی نمونه‌ها	تغییر پارامتر (میکرون)			
			Δc	Δb	Δa	Δl
۱	فاصله‌ی توقف	۲ با ۱	+۳/۴	+۳۵/۸	+۰/۲	+۷
۲	فاصله‌ی توقف	۴ با ۳	+۱/۴	+۹۸/۸	+۱/۲	+۸
۳	فاصله‌ی توقف	۶ با ۵	+۵/۶	+۳۳۱/۳	+۳	+۷
۴	خرج انفجاری	۳ با ۱	+۲۵/۱	+۱۴۰/۴	+۳۳	+۶۹
۵	خرج انفجاری	۴ با ۲	+۲۳/۶	+۲۰۲/۴	+۳۱/۶	+۷۰
۶	خرج انفجاری	۷ با ۵	+۱۰/۶	+۲۴۱/۸	+۷/۴	+۱۳
۷	ضخامت لوله‌ی پرنده	۵ با ۱	+۲۷/۲	+۴۸/۴	+۲۰/۶	+۱۰۱
۸	ضخامت لوله‌ی پرنده	۶ با ۲	+۳۰/۶	+۳۴۳/۹	+۲۳/۴	+۱۰۱



شکل ۶: نمودارهای تغییر مشخصات مرفولوژیکی فصل مشترک در اثر: الف) افزایش فاصله‌ی توقف در نسبت‌های خرج انفجاری ۱/۲ و ۲، ب) افزایش فاصله‌ی توقف در ضخامات لوله‌ی پرنده‌ی ۳ و ۶ میلیمتر، ج) افزایش خرج انفجاری در فواصل توقف ۲ و ۴ میلیمتر، د) افزایش خرج انفجاری در ضخامات لوله‌ی پرنده‌ی ۳ و ۶ میلیمتر، ه) کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده در فواصل توقف ۲ و ۴ میلیمتر، و) کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده در نسبت‌های خرج انفجاری ۱/۲

که هنگام جوشکاری انفجاری آلومینیوم ۲۰۲۴ به فولاد St-37 در مقادیر متفاوت ضخامت لوله‌ی پرنده و خرج انفجاری، افزایش فاصله‌ی توقف تأثیر چندانی بر ابعاد امواج تشکیل شده در فصل مشترک ندارد و این مقادیر تقریباً مستقل از مقدار فاصله‌ی توقف هستند.

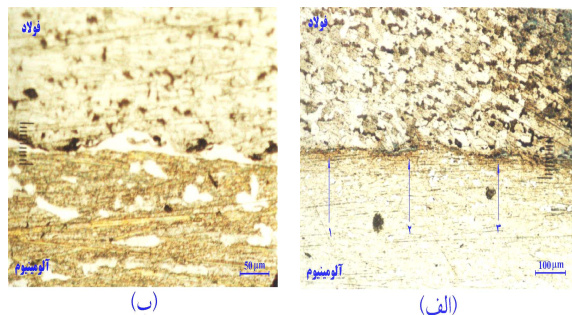
مشابه بحث مربوط به تغییرات ابعاد امواج تشکیل شده در فصل مشترک با مقایسه‌ی بین ردیف‌های اول و دوم در جدول ۵ و بررسی تغییرات Δb مربوط به این مقادیر در شکل ۶ (الف) مشاهده می‌شود که با افزایش خرج انفجاری از $M=1.2$ به $M=2$ ، تغییر طول در فاز میانی فصل مشترک از $35/8$ به $97/8$ میکرون رسیده است. این مقدار افزایش مشابه نتایج Balakrishna و همکاران [9] نشان می‌دهد که افزایش فاصله‌ی توقف بر روی تغییر طول فاز میانی فصل مشترک در مقادیر بالاتر M تأثیر بیشتری دارد. عبارت دیگر افزایش فاصله‌ی توقف و افزایش خرج انفجاری هر دو بر طول فاز میانی فصل مشترک تأثیر داشته و آنرا افزایش می‌دهند، اما تأثیر افزایش فاصله‌ی توقف در $M=2$ نسبتاً بیشتر از $M=1.2$ است. مقایسه‌ی مقادیر مربوط به تغییر پهنا‌ی فاز میانی (Δc) در اثر افزایش فاصله‌ی توقف در نمودار شکل ۶ (الف) و توجه به گستره‌ی اطمینان داده‌های جدول ۴، نشان می‌دهد که این پارامتر در هر دو مقدار $M=1.2$ و $M=2$ مشابه مقادیر Δa و Δb در این شکل تغییری ننموده و تقریباً ثابت باقی مانده است. همانطور که از شکل ۶ (ب) مشاهده می‌شود مقدار تغییر متوسط طول فاز میانی (Δb) در ضخامت لوله‌ی پرنده ۶ میلیمتر (نمونه‌های ۱ و ۲)، بسیار کمتر از حالتی است که ضخامت لوله‌ی پرنده ۳ میلیمتر می‌باشد (نمونه‌های ۵ و ۶). این افزایش نرخ نشان می‌دهد که اثر افزایش فاصله‌ی توقف بر روی تغییر طول متوسط فاز میانی فصل مشترک در مقادیر کم ضخامت لوله‌ی پرنده، بسیار شدیدتر از مقادیر بالاتر ضخامت لوله‌ی پرنده است. از مقایسه‌ی توأم مقادیر Δb در دو شکل ۶ (الف) و ۶ (ب)، اینگونه برمی‌آید که تأثیر افزایش فاصله‌ی توقف بر روی آهنگ تغییر طول متوسط فاز میانی فصل مشترک، در مقادیر کمتر ضخامت لوله‌ی پرنده و بالاتر خرج انفجاری بسیار شدیدتر از این افزایش در مقادیر بالاتر ضخامت لوله‌ی پرنده و مقادیر کمتر خرج انفجاری بوده است. پهنا‌ی فاز میانی در مقادیر مختلف مقدار خرج انفجاری و ضخامت لوله‌ی پرنده، با تغییر فاصله‌ی توقف تقریباً ثابت می‌ماند (بررسی Δc در شکل‌های ۶ (الف) و ۶ (ب)). عبارت دیگر افزایش فاصله‌ی توقف در مقادیر متفاوت خرج انفجاری و ضخامت لوله‌ی پرنده تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تغییر پهنا‌ی فاز میانی Δc ندارد. بنابراین قسمت عمده‌ی افزایش میزان فاز میانی در فصل مشترک نمونه‌های جوشکاری شده در این تحقیق مربوط به تغییر شدید طول فاز میانی Δb در آنها بوده است. در نهایت از جمع‌بندی مقایسه‌های انجام شده در فوق در مورد مقادیر Δb و Δc در



شکل ۷: مقایسه‌ی ریزساختار فصل مشترک جوش: الف) نمونه‌ی ۱ (×۱۰۰) و ب) نمونه‌ی ۲ (×۱۰۰)

همکاران [9] به این علت بیان می‌شود که با افزایش فاصله‌ی توقف، احتمالاً قدرت نفوذ جت (یا مؤلفه‌ی سرعت آن در راستای فصل مشترک) با افزایش فاصله‌ی توقف شدیداً افزایش یافته است. از طرفی تغییر پهنا‌ی فاز میانی با افزایش فاصله‌ی توقف در مقایسه‌ی دو بدو میان نمونه‌ها در سه ردیف اول جدول ۵ بشدت افزایش طول آن نبوده است. نرخ کمتر افزایش پهنا‌ی فاز میانی با افزایش فاصله‌ی توقف، در مقابل نرخ چشمگیرتر افزایش طول فاز میانی (با توجه به نتایج [8] Gupta) احتمالاً به این علت است که مؤلفه‌ی سرعت جت در راستای عمود بر فصل مشترک با افزایش فاصله‌ی توقف تغییر چندانی نمی‌کند. از ارزیابی مقادیر مربوط به Δa و Δb در شکل ۶ (الف) و با توجه به گستره‌ی اطمینان مقادیر متوسط اندازه‌گیری شده (در جدول ۴)، اینگونه می‌توان برداشت کرد که افزایش فاصله‌ی توقف در مقادیر کم خرج انفجاری (ردیف ۱ در جدول ۵) همانند مقادیر زیاد خرج انفجاری (ردیف ۲ در جدول ۵) تأثیری بر ابعاد امواج تشکیل شده در فصل مشترک نداشته و این مقادیر نسبتاً مستقل از فاصله‌ی توقف می‌باشند. در نمودار شکل ۶ (ب) تأثیر افزایش فاصله‌ی توقف (از ۲ به ۴ میلیمتر) بر تغییر پارامترهای اندازه‌گیری شده از فصل مشترک در مقادیر متفاوت ضخامت لوله‌ی پرنده دیده می‌شود. با ملاحظه‌ی ارقام مندرج در این شکل و با توجه به بازه‌ی اطمینان ابعاد اندازه‌گیری شده از فصل مشترک ملاحظه می‌شود که با کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده نیز، مقادیر Δa و Δb مربوط آنها تغییر محسوسی نداشته‌اند. این مسئله نشان می‌دهد که احتمالاً مقادیر طول و دامنه‌ی امواج تشکیل شده در فصل مشترک در مقادیر زیاد ضخامت لوله‌ی پرنده (ردیف اول در جدول ۵) مشابه مقادیر کم آن (ردیف دوم جدول) با افزایش فاصله‌ی توقف تغییر چندانی نمی‌کند. در نهایت از مجموع مقایسه‌های انجام شده در فوق بین اعداد مندرج در ردیف‌های ۱، ۲ و ۳ جدول ۵ مشابه نتایج بدست آمده توسط Salem و همکاران [۷] در مورد اثر افزایش فاصله‌ی توقف بر تغییر ابعاد امواج تشکیل شده در فصل مشترک نمونه‌های مختلف جوشکاری شده‌ی انفجاری می‌توان نتیجه گرفت

متفاوت فاصله‌ی توقف یکسان است. همانطور که ملاحظه می‌شود در اینجا نیز عدم تأثیر فاصله‌ی توقف بر ابعاد امواج تشکیل شده در فصل مشترک جوش تأیید می‌گردد.



شکل ۸: مقایسه‌ی ریزساختار فصل مشترک جوش: (الف) نمونه‌ی ۱ (۱۰۰×) و (ب) نمونه‌ی ۳ (۲۰۰×)

با توجه به شکل ۶ (د)، ملاحظه می‌شود که با کاهش ضخامت، آهنگ تغییر ابعاد امواج فصل مشترک کاهش یافته است. بطوریکه مقدار تغییر (افزایش) طول موج از ۶۹ میکرون به ۱۳ میکرون و مقدار تغییر (افزایش) در دامنه‌ی امواج از ۳۱/۶ به ۷/۴ میکرون کاسته شده است. این مسئله نشان می‌دهد که مقادیر طول و دامنه‌ی امواج تشکیل شده در فصل مشترک در مقادیر زیاد ضخامت لوله‌ی پرنده، تأثیر بیشتری از خرج انفجاری می‌پذیرد. عبارت دیگر افزایش خرج انفجاری در مقادیر بالای ضخامت لوله‌ی پرنده، نسبت به مقادیر پایین ضخامت لوله‌ی پرنده، موجب آهنگ بالاتر افزایش دامنه‌ی تشکیل امواج در فصل مشترک می‌گردد. در نهایت از مجموع مقایسه‌های انجام شده در فوق بین ردیف‌های ۴، ۵ و ۶ در جدول ۵ و بررسی مقادیر Δl و Δa در دو شکل ۶ (ج) و ۶ (د) می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که هنگام جوشکاری انفجاری آلومینیوم ۲۰۲۴ به فولاد St-37 در مقادیر متفاوت فاصله‌ی توقف و ضخامت لوله‌ی پرنده، افزایش خرج انفجاری موجب افزایش ابعاد امواج تشکیل شده در فصل مشترک می‌گردد.

با مقایسه‌ی بین ردیف‌های ۴ و ۵ در جدول ۵ و بررسی تغییرات Δb مربوط به این مقادیر در شکل ۶ (ج) مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله‌ی توقف از $D=2\text{mm}$ به $D=4\text{mm}$ ، تغییر در طول فاز میانی فصل مشترک از ۱۴۰/۴ به ۲۰۲/۴ میکرون رسیده است. این افزایش نشان می‌دهد که افزایش خرج انفجاری بر روی تغییر طول فاز میانی فصل مشترک در مقادیر بالاتر فاصله‌ی توقف مؤثرتر است. ولی بطور کلی می‌توان گفت که افزایش فاصله‌ی توقف و افزایش خرج انفجاری هر دو بر طول فاز میانی فصل مشترک تأثیر داشته و آنرا افزایش می‌دهند. همانطور که از بررسی مقادیر مربوط به تغییر پهنا‌ی فاز میانی (Δc) در شکل ۶ (ج) ملاحظه می‌شود، در مقادیر فاصله‌ی توقف متفاوت، با افزایش خرج انفجاری (از $M=1.2$ به $M=2.0$) تغییر پهنا‌ی فاز میانی مشابه مقادیر Δl و Δa تقریباً یکسان است (۳۳ و ۳۱/۶ میکرون). بنابراین اثر افزایش خرج

شکل‌های ۶ (الف) و ۶ (ب) می‌توان گفت که در مقادیر گوناگون ضخامت لوله‌ی پرنده و خرج انفجاری، با افزایش فاصله‌ی توقف مقدار فاز میانی در فصل مشترک در جوشکاری انفجاری آلومینیوم ۲۰۲۴ به فولاد St-37 افزایش می‌یابد. این افزایش عمدتاً مربوط به افزایش طول فاز میانی در فصل مشترک می‌باشد و پهنا‌ی فاز میانی در فصل مشترک تقریباً ثابت است.

۲-۴. اثر مقدار خرج انفجاری

ریزساختار فصل مشترک در دو نمونه‌ی ۱ و ۳ در شکل ۸ آورده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود در فصل مشترک نمونه‌ی ۳ بعثت افزایش نسبت خرج انفجاری نسبت به نمونه‌ی ۱ به میزان قابل توجهی فاز میانی بی‌شتری تشکیل شده است. با توجه به شکل ۸ و همچنین با بررسی مقادیر متوسط طول و دامنه‌ی امواج تشکیل شده در ناحیه‌ی ۲ فصل مشترک در این نمونه‌ها (جدول ۴)، تأیید می‌شود که این مقادیر با افزایش فاصله‌ی توقف تغییر نموده‌اند. مقایسه‌ی مقادیر مربوط به تغییر طول و دامنه‌ی موج مندرج در ردیف‌های ۴، ۵ و ۶ جدول ۵ نشان می‌دهد که در شرایط یکسان جوشکاری، افزایش M باعث افزایش دامنه و طول امواج تشکیل شده در فصل مشترک می‌گردد. مشابه این افزایش ابعاد با افزایش خرج انفجاری، در فصل مشترک لوله‌های جوشکاری انفجاری آلومینیوم به آلومینیوم و مس به مس قبلاً توسط Salem و همکاران [7] نیز مشاهده شده است. بررسی ابعاد مربوط به فاز میانی در مقایسه‌ی دو به دو میان نمونه‌های ۱ با ۲، ۳ با ۴ و ۵ با ۶ در جدول ۵ نشان می‌دهد که با افزایش M مقدار طول و پهنا‌ی فاز میانی در فصل مشترک جوش افزایش یافته است، اما آهنگ این افزایش در مورد طول فاز میانی شدیدتر از این افزایش در مورد پهنا‌ی فاز بوده است. علت این مسئله مشابه با اظهار نظر Salem و همکاران [7]، احتمالاً مربوط به افزایش انرژی جت تشکیل شده در محل برخورد است که در نهایت موجب تولید فاز میانی با ابعاد بالاتر در فصل مشترک می‌گردد. از نتایج دیگری که با توجه به مقادیر مندرج در جدول ۵ می‌توان بدست آورد از مقایسه‌ی بین تغییر Δa و Δl در ردیف ۴ جدول نسبت به ردیف ۵ آن بدست می‌آید. در این جدول در ردیف چهارم $D=2\text{mm}$ و در ردیف پنجم $D=4\text{mm}$ است. با استفاده از این مقایسه، نمودار تغییر پارامترهای اندازه‌گیری شده از فصل مشترک با افزایش خرج انفجاری از $M=1.2$ به $M=2$ در مقادیر مختلف فاصله‌ی توقف در شکل ۶ (ج) آورده شده است. ملاحظه‌ی مقادیر مربوط به تغییر طول و دامنه‌ی امواج در این نمودار و با توجه به گستره‌ی اطمینان این مقادیر در جدول ۴، نشان می‌دهد که افزایش خرج انفجاری در مقادیر کم فاصله‌ی توقف، همانند مقادیر زیاد آن، ابعاد امواج تشکیل شده در فصل مشترک را تقریباً به یک اندازه افزایش می‌دهد. عبارت دیگر آهنگ تغییر ابعاد امواج فصل مشترک، با افزایش خرج انفجاری، در مقادیر

مانند استدلال Balakrishna و همکاران [8] احتمالاً بدلیل تغییر مرفولوژی فصل مشترک از حالت موجی آرام^۱ به حالت موجی اغتشاشی^۲ می‌باشد. نمونه‌هایی از تفاوت‌های ریزساختاری حاصل در دو نمونه ۱ و ۵ در شکل ۹ آمده است. در ریزساختار نمونه ۵ (شکل ۹ الف)) در مقطع لوله‌ی پرنده‌ی آلومینیومی نقاط ۱، ۲ و ۳ با فواصل متفاوت از فصل مشترک جوش نشان داده شده است. این نقاط احتمالاً مقاطع میکروتورک‌هایی هستند که در سطح بصورت حفرات ۱، ۲ و ۳ دیده می‌شوند. همانطور که ملاحظه می‌شود، این میکروتورک‌ها در مقطع آلومینیوم در نمونه‌ی ۱ (شکل ۹ ب)) بوجود نیامده است. علت این مسئله ضخامت بیشتر لوله‌ی پرنده‌ی آلومینیومی در آزمایش ۱ نسبت به آزمایش ۵ می‌تواند باشد.

با توجه به شکل ۹ و همچنین با مقایسه‌ی مقادیر مربوط به طول و پهنای فاز میانی تشکیل شده در فصل مشترک جوش در جدول ۷ مشاهده می‌شود که در تمامی موارد کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده موجب افزایش ابعاد فاز میانی تشکیل شده در فصل مشترک گردیده است. علت این افزایش ابعاد را مشابه استدلال ارائه شده در مقدمه می‌توان کاهش اتلاف انرژی موج ضربه‌ای در مقطع لوله‌ی پرنده‌ی نازکتر عنوان کرد. اعداد مربوط به افزایش طول فاز میانی (Δb) در فصل مشترک با کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده در ردیف‌های ۷، ۸ و ۹ جدول ۵، در مقایسه با اعداد مربوط به افزایش پهنای فاز میانی (Δc) بزرگتر است. بنابراین در این حالات نیز عمده‌ی افزایش ابعاد فاز میانی در فصل مشترک جوش، مربوط به تغییر طول فاز (Δb) است و نقش افزایش پهنای فاز (Δc) در افزایش درصد فاز میانی فصل مشترک بمراتب کمتر است. با توجه به مقادیر Δa و Δc در شکل ۶ (ه) و توجه به گستره‌ی اطمینان اعداد جدول ۴ اینگونه می‌توان برداشت کرد که تأثیر کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده در مقادیر کم فاصله‌ی توقف همانند مقادیر زیاد فاصله‌ی توقف بر ابعاد امواج تشکیل شده در فصل مشترک به یک میزان بوده و بعبارت دیگر آهنگ افزایش ابعاد امواج فصل مشترک، تقریباً مستقل از فاصله‌ی توقف است. همانطور که از ارزیابی شکل ۶ (و) ملاحظه می‌شود با کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده، تغییر طول و دامنه‌ی امواج فصل مشترک در نسبت‌های خرج متفاوت، با آهنگ متفاوتی تغییر کرده است. بطوری که آهنگ افزایش طول امواج در فصل مشترک از ۱۰۱ میکرون به ۴۵ میکرون کاهش یافته و تقریباً نصف شده است. بنابراین احتمالاً کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده در مقادیر کمتر خرج‌های انفجاری بر افزایش طول امواج فصل مشترک تأثیرگذارتر است. شکل ۶ (و) نشان می‌دهد که آهنگ تغییر دامنه‌ی امواج در $M=1.2$ با کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده مثبت و در $M=2$ منفی است. این امر همانطور که قبلاً اشاره شد، احتمالاً بدلیل تفاوت در مکانیزم تشکیل امواج در نمونه‌ی ۷ نسبت به ۳ می‌باشد، ولی مشابه بحث مربوط به Δa ، در این حالت نیز می‌توان گفت که کاهش

انفجاری بر افزایش Δc در مقادیر مختلف فاصله‌ی توقف، تقریباً به یک اندازه است. همانطور که از داده‌های ردیف‌های ۴ و ۶ جدول ۵ مشاهده می‌شود، تغییر متوسط طول فاز میانی Δb در حالتی که ضخامت لوله‌ی پرنده ۶ میلیمتر بوده است برابر با $140/4$ میکرون و کمتر از $24/8$ میکرون، مربوط به حالتی است که ضخامت لوله‌ی پرنده ۳ میلیمتر می‌باشد. این مسئله نشان می‌دهد که آهنگ تغییر طول فاز میانی در فصل مشترک جوش‌های انفجاری آلومینیوم ۲۰۲۴ به فولاد St-37 با کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده افزایش می‌یابد. بعبارت دیگر اثر افزایش خرج انفجاری بر روی تغییر طول متوسط فاز میانی فصل مشترک، در مقادیر کم ضخامت لوله‌ی پرنده از مقادیر بالاتر ضخامت لوله‌ی پرنده شدیدتر است. همانطور که از تغییر مقادیر مربوط به پهنای فاز میانی (Δc) در شکل‌های ۶ (ج) و ۶ (د) دیده می‌شود و با توجه به گستره‌ی اطمینان داده‌های جدول ۴، ملاحظه می‌شود که تغییر خرج انفجاری در مقادیر متفاوت فاصله‌ی توقف و مقادیر متفاوت ضخامت لوله‌ی پرنده تقریباً تأثیر یکسانی بر پهنای فاز میانی فصل مشترک دارد. از این مسئله نتیجه می‌شود که پهنای فاز میانی با افزایش مقدار خرج انفجاری (در مقایسه با مقدار افزایش طول آن) بمیزان ناچیز افزایش می‌یابد. دلیل این مسئله (مشابه استدلال ارائه شده مربوط به تأثیر فاصله‌ی توقف بر Δc) احتمالاً عدم تغییر مؤلفه‌ی سرعت جت در راستای عمود بر فصل مشترک با تغییر خرج انفجاری می‌تواند باشد. از جمع بندی مقایسه‌ی بین اعداد ردیف‌های ۴، ۵ و ۶ جدول ۶ و نتایج حاصل در شکل‌های ۶ (ج) و ۶ (د) نتیجه می‌شود که هنگام جوشکاری انفجاری آلومینیوم ۲۰۲۴ به فولاد St-37 افزایش خرج انفجاری باعث افزایش طول فاز میانی در فصل مشترک می‌گردد، اما آهنگ این افزایش طول در مقادیر فواصل توقف بالاتر و ضخامت‌های لوله‌ی پرنده‌ی نازکتر، شدیدتر می‌باشد. همچنین می‌توان گفت که با افزایش خرج انفجاری در مقادیر گوناگون فاصله‌ی توقف و ضخامت لوله‌ی پرنده، آهنگ افزایش پهنای متوسط فاز میانی تقریباً به یک اندازه است.

۳-۴. اثر ضخامت لوله‌ی پرنده

از مقادیر مندرج در جدول ۵ تأیید می‌شود که در تمامی مقایسه‌ها در ردیف‌های ۷، ۸ و ۹ جدول، طول متوسط امواج در فصل مشترک با کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده افزایش یافته است. همانطور که در این جدول دیده می‌شود، دامنه‌ی امواج تشکیل شده در فصل مشترک در ردیف ۷ نسبت به ۸ (با کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده) افزایش یافته است که با نتایج Salem و همکاران [7] منطبق است. کاهش ۵ میکرونی دامنه‌ی امواج در فصل مشترک (با مقایسه‌ی گستره‌ی اطمینان مقادیر مندرج در جدول ۴ با این مقدار) بسیار ناچیز است و می‌توان دامنه‌ی امواج در نمونه‌های ۳ و ۷ را تقریباً یکسان در نظر گرفت. علت عدم افزایش دامنه‌ی امواج در این حالت

¹ Laminar

² Turbulence

است که $M=2$ می‌باشد (نمونه‌های ۳ و ۷). افزایش طول فاز میانی در نمونه‌ی ۱ نسبت به ۵ برابر $48/4$ میکرون و در نمونه‌ی ۳ نسبت به ۷ برابر $149/8$ میکرون است. این امر نشان می‌دهد که آهنگ تغییر طول فاز میانی در فصل مشترک جوشهای انفجاری آلومینیوم ۲۰۲۴ به فولاد St-37 با کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده، در مقادیر بالاتر خرج انفجاری بسیار شدیدتر از مقادیر پایین‌تر است. از جمع‌بندی نهایی مقایسه‌های انجام شده بین اعداد بین ردیف‌های ۷، ۸ و ۹ جدول ۵ در شکل‌های ۶ (ه) و ۶ (و) می‌توان نتیجه گرفت که در جوشکاری انفجاری آلومینیوم ۲۰۲۴ به فولاد St-37 تأثیر کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده بر روی تغییر طول متوسط فاز میانی فصل مشترک، در مقادیر گوناگون فاصله‌ی توقف یکسان نبوده و این اثر گذاری در مقادیر بالاتر فاصله‌ی توقف بسیار شدیدتر است. در مورد تأثیر کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده بر پهنای فاز میانی تشکیلی در فصل مشترک نیز می‌توان گفت که کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده در مقادیر بالای خرج انفجاری تأثیر بیشتری بر تغییر پهنای فاز میانی دارد ولی این کاهش ضخامت در مقادیر مختلف فاصله‌ی توقف اثر تقریباً یکسانی بر تغییر پهنای فاز میانی می‌گذارد. مقایسه‌ی کلی مقادیر Δb و Δc در شکل‌های ۶ (ه) و ۶ (و) نشان می‌دهد که در این حالت نیز در تمامی موارد، اعداد مربوط به افزایش پهنای فاز میانی فصل مشترک در مقایسه با اعداد افزایش طول آن کمتر است. بنابراین افزایش ابعاد فاز میانی در فصل مشترک جوش در این حالت نیز عمدتاً مربوط به افزایش طول فاز می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

۱- در جوش‌های انفجاری آلومینیوم ۲۰۲۴ به فولاد St-37 افزایش فاصله‌ی توقف هنگام انجام جوشکاری موجب ثابت ماندن طول و دامنه‌ی امواج ولی افزایش ابعاد فاز میانی تشکیلی شده در فصل مشترک می‌گردد.

۲- هنگام جوشکاری انفجاری فولاد St-37 به آلومینیوم ۲۰۲۴ با افزایش مقدار M کلیه‌ی مقادیر طول موج، دامنه‌ی موج و طول و پهنای فاز میانی تشکیلی شده در فصل مشترک افزایش می‌یابد.

۳- با کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده هنگام جوشکاری انفجاری آلومینیوم ۲۰۲۴ به فولاد St-37 طول موج و ابعاد فاز میانی تشکیلی شده در فصل مشترک به میزان زیادی افزایش می‌یابد.

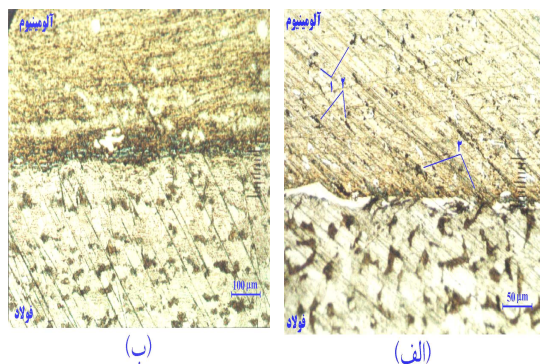
۴- عمده‌ی افزایش فاز میانی در مقایسه‌ی جوش‌های انفجاری آلومینیوم ۲۰۲۴ به فولاد St-37 مربوط به افزایش طول فاز میانی بوده و در مجموع پهنای فاز میانی در این مقایسه‌ها بمیزان کمی تغییر می‌کند.

مراجع

[1] Blazynski, T. Z., "Explosive Welding, Forming, and Compaction", Applied Science, London, 1985.

ضخامت لوله‌ی پرنده در مقادیر کمتر خرج انفجاری، دامنه‌ی امواج فصل مشترک را با شدت بیشتری افزایش می‌دهد. در نهایت از مجموع مقایسه‌های انجام شده در بالا بین سه ردیف اعداد مندرج در جدول ۵ و ارزیابی شکل ۶ (ه) مشابه نتایج بدست آمده توسط Salem و همکاران [7] می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که هنگام جوشکاری انفجاری آلومینیوم ۲۰۲۴ به فولاد St-37 در مقادیر مختلف فاصله‌ی توقف و مقادیر کمتر از $M=2$ ، کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده موجب افزایش ابعاد امواج تشکیلی شده در فصل مشترک می‌گردد.

با توجه به شکل ۶ (ه) مشاهده می‌شود که با کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده از ۶ به ۳ میلیمتر، آهنگ افزایش طول فاز میانی (Δb) فصل مشترک بشدت افزایش یافته و از $48/4$ به $343/9$ میکرون رسیده است. این افزایش شدید نشان می‌دهد که اثر کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده بر تغییر طول فاز میانی فصل مشترک، در مقادیر بالاتر فاصله‌ی توقف بسیار مؤثرتر است. بعبارت دیگر نتیجه‌ی بدست آمده در قسمت‌های قبل یعنی تأثیر مثبت افزایش فاصله‌ی توقف و افزایش خرج انفجاری بر افزایش طول فاز میانی فصل مشترک در اینجا نیز تأیید می‌گردد. نکته‌ی قابل ملاحظه‌ی دیگر در جدول ۵ عدم تغییر در آهنگ افزایش پهنای فاز میانی یا Δc با کاهش ضخامت لوله‌ی پرنده در مقادیر متفاوت فاصله‌ی توقف (در ردیف‌های ۷ و ۸ جدول) می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود افزایش Δc در نمونه‌ی ۵ نسبت به ۱ برابر $27/2$ میکرون و در نمونه‌ی ۶ نسبت به ۲ برابر $30/6$ میکرون می‌باشد که (با توجه به فاصله‌ی اطمینان این مقادیر در جدول ۴) می‌توان آنها را یکسان در نظر گرفت. بنابراین تغییر مقادیر ضخامت لوله‌ی پرنده تأثیر یکسانی در افزایش پهنای فاز میانی در فصل مشترک (در مقادیر متفاوت فاصله‌ی توقف) دارد و با آهنگ این افزایش (با تغییر فاصله‌ی توقف) تغییری نمی‌کند و تقریباً ثابت است.



شکل ۹: مقایسه‌ی ریزساختار فصل مشترک جوش: الف) نمونه‌ی ۵ (×۲۰۰) و ب) نمونه‌ی ۱ (×۱۰۰)

از شکل ۶ (و) نتیجه می‌شود که تغییر متوسط طول فاز میانی Δb در حالتی که $M=1.2$ است (نمونه‌های ۱ و ۵) بسیار کمتر از حالتی

Proc. Int. Conf. on Shock Waves and High Strain Rate Phenomena in Metals, P.1003, 1981.

[8] Gupta, R. C. and Kainth, G. S., "Permissible Range of Parameters for Interface Wave Formation in Explosive Welding", Indian Institute of Technology, Technical Report, Kanpur, 1979.

[9] Balakrishna .H. K., Venkatesh, V. C. and Philip, P. K., "Influence of Collision Parameters on the Morphology of Interface in Aluminum - Steel Explosion Welds", Proc. Int. Conf. on Shock Waves and High Strain Rate Phenomena in Metals, P.975, 1981.

[10] Banker, J. and Nobili, A., "Aluminum-Steel Electric Transition Joints, Effect of Temperature and Time upon Mechanical Properties", http://www.dynamicmaterials.com/clad/site_etj/TMS%20Final%20with%20recognition%20note%2011-5-01.pdf.

[11] Grant, E. L. and Leavenworth, R., *Statistical Quality Control*, 4th Edition, Mc Graw-Hill, 1972.

[2] Brasher, D. G. and Bulter, D. J., "Explosive Welding: Principles and Potentials", *Advanced Materials & Processes*, V.147, N.3, P.37, 1995.

[3] Nobili, A., "Explosion Bonding Process", http://www.dynamicmaterials.com/clad/site_etj/NT200.pdf.

[4] Crossland, B., *Explosive Welding of Metals and its Application*, Clarendon Press, Oxford, 1982.

[۵] دامغانی نوری، م.، جوشکاری انفجاری استوانه‌های هم‌محور، پایان‌نامه‌ی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۱.

[۶] سخاوت، ف.، بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی استوانه‌های آلومینیوم و فولاد جوشکاری شده بروش انفجاری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۰.

[7] Salem, S. A. L. and Al-Hassani, S. T. S., "Interfacial Wave Generation in Explosive Welding of Multilaminates",

فهرست نشانه‌ها:

l	طول موج	S	فاصله‌ی توقف
a	دامنه‌ی امواج	M	جرم خرج به جرم واحد لوله‌ی پرنده
b	طول فاز میانی	F	فاصله‌ی توقف
c	پهنای فاز میانی	Δi	تغییر متغیر i