

بررسی ایجاد ترک گرم در آلیاژ آلومینیوم 2024 در اثر جوشکاری قوس تنگستن

سیده راضیه انوری^{1*}، محمدرضا نصرافهانی²، سعید احمدی¹

¹ موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو

² پژوهشکده مواد و انرژی پژوهشگاه فضایی ایران

منبع: پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان ارزیابی تأثیر پارامترهای جوشکاری تیگ بر استعداد به ترک گرم آلیاژ آلومینیوم 2024

چکیده

جوشکاری قوس تنگستن تحت پوشش گاز محافظ از مهمترین روش‌های جوشکاری در صنایع مختلف است. توسط این روش می‌توان موادی با شکل‌های مختلف از ورق‌های نازک (مثلاً ورق‌های آلومینیوم) تا لوله‌های تحت فشار را جوشکاری کرد. در میان عیوب جوش، ترک خطرناک‌ترین عیب است چون قابلیت جوشکاری و جوش‌پذیری مواد بر پایه تمایل آن‌ها به تشکیل و رشد ترک در طول جوشکاری و بعد از آن ارزیابی می‌شود. ترک‌ها با توجه به درجه حرارتی که در آن به وجود می‌آیند به دو گروه ترک‌های گرم و ترک‌های سرد تقسیم‌بندی می‌شوند. ترک گرم به دلیل ناپایداری فلز جوش تحت کرنش، در حین انجماد در یک محدوده دمایی بحرانی ایجاد می‌شود. در این تحقیق استعداد به ترک گرم آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 تحت تأثیر پارامترهای جوشکاری تیگ با استفاده از آزمون وارسترنیت مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور چهار بلوک با شعاع‌های مختلف جهت اعمال کرنش‌های 0/2، 0/5، 1 و 3/5 درصد ساخته شد. جهت مشاهده ترک گرم و بازرسی عیوب جوش از آزمایشات رادیوگرافی و مایعات نافذ و همچنین جهت مشاهده ریزساختار از آزمون متالوگرافی استفاده شد. نتایج آزمایشات نشان دادند که در نمونه‌ها تحت کرنش‌های 0/2، 0/5 و 1 درصد با تغییر پارامترهای جوشکاری و افزایش گرمای ورودی ترک گرم ایجاد نشد. با اعمال کرنش 3/5 درصد که بالاتر از کرنش آستانه آلیاژ است، ترک گرم در نمونه‌ها با پارامترهای مختلف جوشکاری ایجاد شد که نشان از نقش پررنگ‌تر کرنش نسبت به گرمای ورودی در ایجاد ترک گرم دارد. در حالت اعمال کرنشی بالاتر از کرنش آستانه، با افزایش گرمای ورودی طول ترک گرم افزایش یافت. مسیر زیگزاگ ترک و عبور از بین دندریتها در مقیاس میکروسکوپی، تاییدی بر رخداد ترک گرم در نمونه‌ها است. همچنین نتایج نشان داد که طول ترک‌های گرم با افزایش سرعت جوشکاری، کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری قوس تنگستن، ترک گرم، گرمای ورودی، کرنش، آلیاژ آلومینیوم 2024.

* اصفهان، بلوار کشاورز، چهار راه مفتوح، برج آزاد، موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو 0313779914-092227564897.
sr.anvari1365@gmail.com

1- مقدمه

دچار کرنش شود، ممکن است ترک گرم به وجود آید. بسیاری از محققین بر این باورند که اگر تنش یا کرنش در ناحیه حساس به ترک از حد بحرانی تجاوز کند، وجود ترک حتمی خواهد بود. بنابراین امروزه هدف اصلی محققین این است که معیارهای مناسبی برای پیش‌بینی تشکیل ترک گرم ارائه نمایند (باقری مسعودزاده 1395). پارامترهای جوش می‌توانند اثر قابل توجهی بر روی استعداد به ترک گرم آلیاژ داشته باشند بنابراین می‌بایست هنگام انجام آزمایشات جوش‌پذیری لحاظ شوند. یکی از این پارامترها گرمای ورودی است. گرمای ورودی جوشکاری به صورت انرژی در واحد طول جوش (سرعت حرکت/جریان × ولتاژ) تعریف می‌شود. اعمال جوش‌ها با گرمای ورودی مشابه برای یک ماده مشخص، حجم حوضچه جوش تقریباً مشابه و نرخ سرمایش مشابه ایجاد خواهد نمود اما لزوماً نفوذ مشابهی به وجود نمی‌آورد. افزایش گرمای ورودی باعث افزایش سطح مقطع و کاهش نرخ سرمایش می‌شود و یک ناحیه خمیری بزرگتر ایجاد می‌کند. پارامتر دیگر سرعت حرکت یا همان سرعت جوشکاری است. تأثیر سرعت حرکت بر روی ترک انجمادی جوش مطالعه شده است اما اجماعی درباره آن وجود ندارد. بعضی از مطالعات بهبود در جوش‌پذیری را هنگام افزایش سرعت حرکت مشعل گزارش داده‌اند. پارامتر دیگر جوشکاری انتخاب فلز پرکننده مناسب است. در بعضی مطالعات نشان داده شده است که مقادیر بیشتر فلز پرکننده یا فیلر باعث بهبود جوش‌پذیری می‌شود و در نتیجه به نرخ کرنش بیشتری برای ترک‌خوردگی نیاز دارد. پارامترهای جریان و ولتاژ از آن‌جا که بر گرمای ورودی تأثیرگذار هستند، می‌توانند بر ایجاد ترک گرم نقش داشته باشند. به صورتی که افزایش جریان و ولتاژ، به دلیل افزایش گرمای ورودی امکان ایجاد ترک گرم را افزایش می‌دهند. جوش‌پذیری ماده نیز بر ایجاد ترک گرم موثر است. جوش‌پذیری یک مشخصه ذاتی فلزات و آلیاژها است و عبارت از قابلیت یا ظرفیت یک ماده برای تشکیل منطقه جوش تحت شرایط ساخت مورد

آلومینیوم نسبت استحکام به وزن مناسب، قابلیت شکل‌پذیری خوب و مقاومت به خوردگی بالایی دارد. همانند اکثر فلزات، بیشتر به صورت آلیاژ در صنعت استفاده می‌شود. آلیاژ آلومینیوم 2024 از سری 2xxx انتخاب شده و یک آلیاژ کارشده و عملیات حرارتی‌پذیر است. عنصر آلیاژی عمده آن مس به میزان 3/6-4/9 درصد و منیزیم به میزان 1/5 درصد است و به همین دلیل در گروه 2xxx قرار گرفته است. این آلیاژ به دلیل دارا بودن ترکیبات بین فلزی $CuAl_2$ و $CuAl_2Mg$ که به صورت رسوب در آلیاژ ظاهر می‌شوند دارای استحکام بالایی است بنابراین در صنایع مختلف از جمله صنایع هوایی و خودروسازی به صورت‌های مختلف استفاده می‌شود (Mathers 2002). رایج‌ترین روش‌های جوشکاری برای این آلیاژ روش تیگ و جوشکاری اصطکاکی است. جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم همراه با مشکلات و ایجاد نواقصی است از جمله حضور لایه اکسیدی مقاوم، ایجاد تخلخل و ترک گرم. در میان روش‌های جوشکاری ذوبی، روش جوشکاری قوسی با الکتروود تنگستنی (TIG) مناسب و متداول‌ترین روش برای جوشکاری آلومینیوم و آلیاژهای آن است. از مزیت‌های مهم این روش دستیابی به نسبت بالاتر عمق به پهنای جوش با پخش‌سازی کمتر لبه‌ها، کاهش پیچیدگی قطعه جوشکاری شده و نیاز به مقدار کمتر فلز پرکننده است. پدیده ترک گرم در انجماد آلیاژهای مختلف فلزی یکی از کلیدی‌ترین مسائل تعیین‌کننده کیفیت شمش‌ها و قطعات تولیدی به روش ریخته‌گری پیوسته است. علاوه بر این در جوشکاری و هر فرآیند تولید دیگری که دارای مرحله انجماد است نیز ترک گرم کنترل‌کننده کیفیت است. این پدیده شاخه تحقیقاتی جداگانه‌ای در زمینه انجماد محصولات فلزی را به خود اختصاص داده و در بین محققین با نام‌های ترک گرم، پارگی گرم و ترک انجمادی شناخته می‌شود (باقری مسعودزاده 1395). نتیجه مطالعات اخیر نشان می‌دهد، هنگامی که ناحیه خاصی از منطقه خمیری (ناحیه حساس به ترک) در اثر تنش کششی

2- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق به منظور کنترل ترک‌های گرم در جوشکاری آلیاژ آلومینیوم 2024 از جوشکاری تیگ استفاده شده است. با کنترل پارامترهای تاثیرگذار در این جوش می‌توان ترک‌های گرم را کاهش داد و کنترل کرد. پارامترهایی مانند سرعت و جریان جوشکاری می‌تواند روی گرادیان‌های حرارتی و خواص منطقه ذوب‌شده تأثیرگذار باشد. پارامترهای ولتاژ، نوع و شدت جریان، مقدار کرنش اعمالی و سرعت جوشکاری در این تحقیق بر استعداد به ترک گرم توسط آزمایش وارسترینت بررسی شد. ورق‌های مورد استفاده در این تحقیق، ورق‌های نورد سرد شده آلومینیوم 2024-T3 به ضخامت 3 میلیمتر است. ترکیب شیمیایی ورق آزمایش با استفاده از آنالیز شیمیایی به روش طیف‌سنج نشری مورد بررسی قرار گرفت. در جدول (1) ترکیب عناصر شیمیایی ورق آلومینیوم 2024 نشان داده شده است.

ورق‌ها با ضخامت 3 میلیمتر با استفاده از دستگاه گیوتین به ابعاد مورد نظر (10×13) سانتیمتر بریده شدند. در این تحقیق ابتدا چهار کرنش 0/002، 0/005، 0/01 و 0/035 در نظر گرفته شد و براساس آن تعداد چهار بلوک با شعاع‌های مختلف 748/5، 298/5، 148/5 و 41/36 میلیمتر ساخته شده است. شعاع بلوک‌های مورد استفاده در دستگاه آزمون وارسترینت جهت اعمال کرنش‌های مدنظر این تحقیق براساس رابطه $\varepsilon = t/2r$ محاسبه شد. در شکل (1) شماتیکی از انجام این آزمون مشاهده می‌شود.

برای ساخت بلوک‌ها از دستگاه‌های تراش و فرز CNC استفاده شد. نقشه و تصویر بلوکی که شعاع انحنای آن 41/36 میلیمتر است در شکل (2) ارائه شده است. در این تحقیق از جریان AC جهت جوشکاری استفاده شد در هر مرحله با تعیین پارامترهای مورد نظر و تنظیم دستگاه، جوشکاری برای حالت‌های مختلف کرنش، انجام شد. برای نمونه‌ها تحت کرنش‌های اعمالی 0/2، 0/5 و 1 درصد، شدت جریان‌های 203، 293 و 335 آمپر و با سرعت‌های جوشکاری بین 10 تا 16 میلی‌متر بر ثانیه

نظر در یک ساختار طراحی شده مناسب و انجام وظایف مورد انتظار به طور رضایت‌بخش است.

برای ارزیابی جوش‌پذیری فلزات و آلیاژها از آزمون‌های جوش‌پذیری استفاده می‌شود. اکثر آزمایش‌های جوش‌پذیری برای ارزیابی حساسیت فلز پایه و فلزات پرکننده به ترک توسعه یافته‌اند. آزمون‌های جوش‌پذیری به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند: 1- آزمون‌های خودمهاری، 2- آزمون‌های شبیه سازی یا بارگذاری خارجی، 3- آزمون‌های مکانیکی دما بالا (Lippold and Kotecki 2005). در این تحقیق از آزمون وارسترینت استفاده شده است که جز آزمون‌های شبیه سازی یا بارگذاری خارجی به حساب می‌آید. اساس این آزمون بر مبنای اندازه گیری حداکثر طول ترک یا مجموع طول ترک‌های ایجاد شده در حین انجام آزمون است (Idowu, Ojo and Chaturvedi 2007). در این آزمون نمونه بر روی بلوکی قرار می‌گیرد که سطح بالایی آن دارای انحنای است و نمونه از دو طرف تحت بار قرار می‌گیرد، نیرو اعمال می‌شود و نمونه را خم می‌کند تا کاملاً بر بلوک خمیده شده و با شعاع انحنای مشخص منطبق گردد سپس نمونه مدت زمان محدودی در همان موقعیت خمیده نگهداری می‌شود. این امر باعث اعمال یک کرنش طولی بر روی سطح نمونه می‌شود که مقدار این کرنش توسط رابطه (1) به دست می‌آید (Coniglio and Cross 2016).

$$\varepsilon = t/2r \quad (1)$$

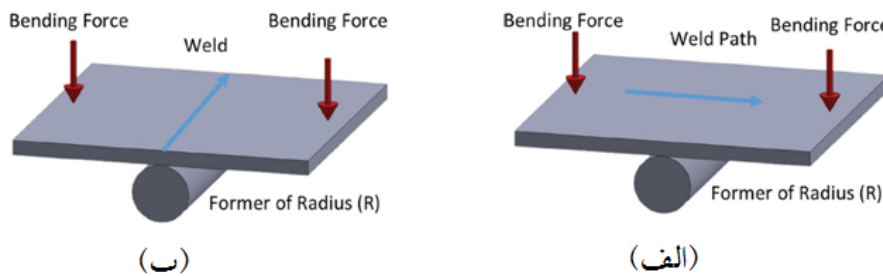
که در آن ε کرنش اعمالی، t ضخامت نمونه استفاده شده و r شعاع بلوک فلزی است (Coniglio and Cross 2016). برای اعمال مقادیر مختلف کرنش می‌توان شعاع بلوک فلزی را تغییر داد و از بلوک‌های فلزی با شعاع‌های گوناگون استفاده نمود. از این‌رو دامنه کرنش اعمالی مستقل از پارامترهای جوشکاری، فرآیند جوشکاری، ترکیب شیمیایی و دیگر پارامترهایی است که ریزساختار قطعات جوش را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

جهت بررسی تشکیل ترک گرم، محاسبه مجموع طول ترک‌های گرم و تعیین طول بزرگترین ترک گرم، آزمون رادیوگرافی بر روی نمونه‌ها انجام شد. این آزمون با تیوب اشعه X به فاصله 60 سانتی‌متر نسبت به نمونه، شدت اشعه (KV) 170 و مدت زمان تشعشع 0/2 دقیقه انجام شده است.

انجام شد. جهت مقایسه پارامترهای جوشکاری برای نمونه‌ها تحت کرنش اعمالی 3/5 درصد دو حالت بررسی شد. در حالت اول سرعت‌های جوشکاری تقریباً برابر و شدت جریان‌ها متغیر و در حالت دیگر، شدت جریان‌ها برابر و سرعت‌ها متفاوت در نظر گرفته شد. این شدت جریان‌ها 150 و 185 آمپر و سرعت جوشکاری بین 2/5 تا 7 میلیمتر بر ثانیه بود.

جدول 1- ترکیب شیمیایی ارائه شده ورق آلومینیوم 2024 توسط دستگاه طیف‌سنج نشری

حالت	عناصر (درصد وزنی)										آلیاژ
	Ti	Ni	Cr	Zn	Mg	Mn	Cu	Fe	Si	Al	
T3	0/0387	0/0289	0/0356	0/164	1/25	0/475	3/67	0/0827	0/101	94	2024

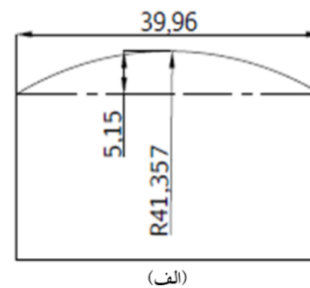


شکل 1- (الف) آزمون وارسترینت، (ب) آزمون وارسترینت عرضی (Statharas et al. 2019)

جهت بررسی ترک های سطحی از آزمون مایع نافذ استفاده شد. این آزمون مطابق استاندارد ASTM E165 (2018) با استفاده از مایع نافذ قابل مشاهده و رنگی و تحت نور مرئی بر روی نمونه‌ها انجام شد. جهت بررسی دقیق‌تر و مشاهده ریزساختار نمونه‌ها از آزمون متالوگرافی استفاده شد. نمونه در ابتدا مانت شده و سپس جهت برطرف کردن زبری سطح، تا سنباده 2400 سنباده زنی و پس از آن به منظور صیقلی شدن، توسط پارچه پولیش و پودر آلومینا پولیش شد. اچ کردن به روش الکترو اچ توسط محلول حاوی 4 سی‌سی فلئوریک اسید در 100 سی‌سی آب با ولتاژ 18 ولت و در زمان 60 ثانیه انجام شد. جهت تصویربرداری از میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی‌های 100، 200 و 500 استفاده شد.

3- نتایج و بحث

نمونه‌های جوشکاری شده بر اساس مقدار کرنش اعمالی، متوسط سرعت جوشکاری و شدت جریان



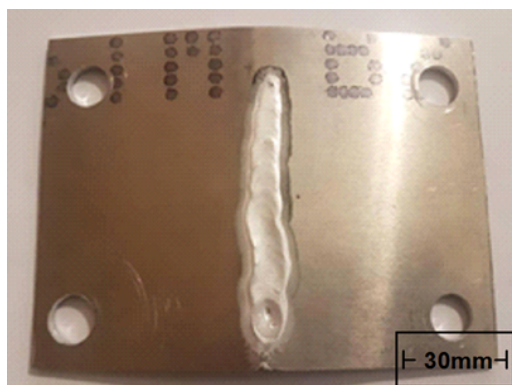
شکل 2- (الف) نقشه و (ب) تصویر بلوک با انحنا 41/36 میلیمتر

مورد استفاده، مطابق جدول 2 نام‌گذاری شدند. گرمای ورودی برای هر نمونه محاسبه و در جدول 2 ارایه شد. لازم به ذکر است طبق اعلام شرکت سازنده، مقدار ولتاژ برابر با $(0/04 \times \text{جریان} + 20)$ است.

جدول 2- نام‌گذاری نمونه‌های جوشکاری شده

کد نمونه	درصد کرنش اعمالی	متوسط سرعت جوشکاری (mm/s)	شدت جریان (A)	گرمای ورودی (KJ/cm)
0/2-10-203	0/2	10	203	3/99
0/5-10-203	0/5	10	203	3/99
1-10-203	1	10	203	3/99
0/2-16-335	0/2	16	335	4/89
0/5-16-335	0/5	16	335	4/89
1-16-335	1	16	335	4/89
0/2-13-293	0/2	13	293	5
0/5-13-293	0/5	13	293	5
1-13-293	1	13	293	5
3/5- 6/8-185	3/5	6/8	185	5/23
3/5-4/5-150	3/5	4/5	150	6/01
3/5-4/6-185	3/5	4/6	185	7/71
3/5-2/6-150	3/5	2/6	150	10/57

افزایش جدایش بین دندریتی و در نهایت شکست می‌شود. ولی در این‌جا کرنش اعمالی به نمونه‌ها به اندازه‌ای نبوده که بتواند عیب ترک گرم را ایجاد کند. لازم به ذکر است برای وقوع ترک دو پارامتر کرنش و ناحیه گرم بایستی هم‌زمان در یک نقطه متمرکز شوند و عدم وجود یکی از این دو عامل باعث عدم تشکیل ترک گرم می‌شود.

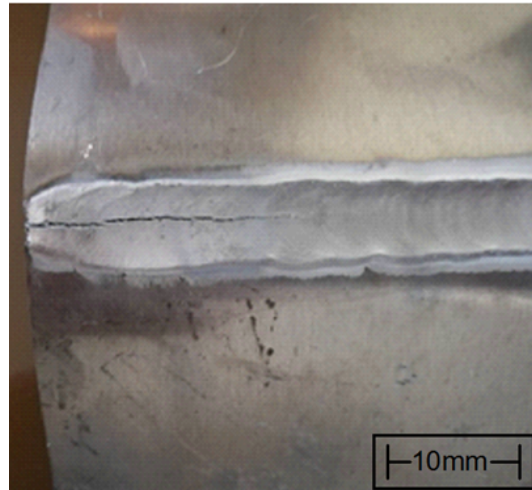


شکل 3- نمونه جوشکاری شده با کد 0/2-13-293

3-1- بررسی ظاهری نمونه‌های جوشکاری شده

ظاهر نمونه‌های جوشکاری شده توسط بازدید چشمی مورد بررسی قرار گرفتند. شکل‌های 3 و 4 نمونه‌های جوشکاری شده با کدهای 0/2-13-293 و 0/5-150-4/5- را نشان می‌دهند. بررسی‌های چشمی نشان داد در کرنش‌های اعمالی 0/2، 0/5 و 1 با تغییر پارامترهای جوشکاری و همچنین افزایش گرمای ورودی هیچ‌گونه ترک ایجاد نشده است. این در حالی است که یکی از اصلی‌ترین متغیرها در رخداد ترک، مقدار گرمای ورودی است. همچنین انتظار می‌رود با افزایش گرمای ورودی در نمونه 1-13-293 به دلیل اعوجاج بیشتر در نمونه و افزایش تنش‌های داخلی که مستقل از تنش اعمالی ناشی از خم کردن نمونه است، نمونه دچار شکست شود ولی ظاهراً این عامل هم نتوانسته است باعث ایجاد ترک شود و در نمونه‌ها تحت کرنش اعمالی 0/2، 0/5 و 1 هیچ‌گونه ترک ظاهری مشاهده نشد. در واقع افزایش گرمای ورودی باعث سرد شدن آهسته‌تر ناحیه جوش و در نتیجه

این نمونه بیشترین گرمای ورودی در بین نمونه‌ها با کرنش اعمالی 3/5 درصد را تحمل کرده است. در بازرسی چشمی، تعدادی از نمونه‌ها فاقد ترک و تعدادی دیگر دارای ترک گرم بودند. جهت بررسی دقیق ترک‌های ایجاد شده در اثر جوشکاری، تنها بازرسی چشمی کافی نیست بنابراین از آزمون‌های مایع نافذ و رادیوگرافی و همچنین جهت مشاهده ریز-ساختار از آزمون متالوگرافی استفاده شد که در ادامه نتایج آن‌ها ارائه شده است.



شکل 4- نمونه جوشکاری شده با کد 3/5-4/5-150، طول ترک 20/9 میلی‌متر

3-2- نتایج آزمون مایعات نافذ

بررسی نتایج آزمون مایعات نافذ نشان می‌دهد در بعضی از نمونه‌ها عیب حفره لوله‌ای (crater pipe) دیده می‌شود. طبق جدول 3 که در آن نتایج حاصل از آزمایش مایع نافذ جمع‌بندی شده است، نمی‌توان ارتباط مشخصی بین این عیب و هیچ یک از پارامترهای جوشکاری پیدا کرد. اگرچه عیب حفره لوله ای یک عیب ناشی از انقباض حوضچه جوش در پایان انجماد است ولی به‌نظر می‌رسد کرنش اعمال‌شده به این نمونه‌ها تاثیری بر وقوع این عیب نداشته است.

با افزایش کرنش و اعمال کرنش 3/5 درصد، ترک‌هایی در سطح نمونه مشاهده شد. اندازه‌گیری‌های به‌عمل آمده در مورد طول ترک‌ها نشان می‌دهد، در یک کرنش ثابت (3/5 درصد) هرچه مقدار گرمای ورودی افزایش یابد، طول ترک نیز افزایش می‌یابد. بیشترین طول ترک مشاهده شده در نمونه 2/6-150-3/5 و حدود 74/7 میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. گرمای ورودی جوشکاری این نمونه برابر 10/57 کیلوژول بر سانتیمتر است. طبق محاسبات انجام شده

جدول 3- نتایج آزمون مایعات نافذ

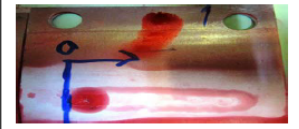
کد نمونه	نتیجه آزمون مایعات نافذ
1-12-185	هیچ ترکی مشاهده نشد
1-10-203	عیب حفره لوله ای مشاهده شد
0/2-16-335	عیب حفره لوله ای مشاهده شد
1-16-335	هیچ ترکی مشاهده نشد
1-13-293	عیب حفره لوله ای مشاهده شد

عنصر مس باعث می‌شود انقباض ذاتی این آلیاژ نسبت به آلیاژهای دیگر مثلاً آلیاژهای حاوی سیلیسیم، بیشتر باشد. وجود عیب حفره لوله‌ای در انتهای جوش خود تاییدی بر این موضوع است یعنی تمامی شرایط متالورژیکی برای وقوع ترک در این نمونه‌ها وجود داشته است ولی مقدار کرنش اعمال شده بر آن‌ها نتوانسته باعث پارگی دندریته‌ها در حوضچه جوش

آلومینیوم 2024 یک آلیاژ حاوی 3/8 درصد مس است. طبق دیاگرام فازی آلیاژی با 3/8 درصد مس دامنه انجماد بسیار وسیعی دارد و این یکی از شرایط اولیه برای وقوع ترک در حین انجماد است. وجود مس در این آلیاژ انجماد آن را خمیری کرده است و ثابت شده که هرچه انجماد خمیری‌تر باشد مقدار کرنش موثر آن در حین انجماد بیشتر است. از طرفی وجود

وقتی عیوب ناشی از جوشکاری به سطح جوش ختم نشوند آزمون مایعات نافذ نمی‌تواند آن‌ها را مشخص سازد. بنابراین جهت بررسی دقیق‌تر عیوب، از آزمون رادیوگرافی نیز استفاده شد که نتایج آن در ادامه ارائه شده است.

شود و از طرفی تنش‌های ذاتی خود قطعه، ناشی از گرم‌شدن ورق نیز نتوانسته باعث ایجاد ترک شود. شکل 5 نمونه‌ای از نتیجه آزمون مایع نافذ را نشان می‌دهد که مربوط است به نمونه با کد 1-10-203.

Revision number : 0		Liquid penetrant test report	
Surface Condition : —		Test Method code/standard : ASTM E165 (2018)	
Material : AL Base	Thickness : —	Work Instruction Number : RMRC-WI-565-104-01	
Penetrant Type/No : SKL-SP2 Flourescent <input type="checkbox"/> Visible <input checked="" type="checkbox"/>		Lighting Equipment : Visible <input checked="" type="checkbox"/> Black Light <input type="checkbox"/>	
Method : Solvent removable Solvent Type/No: SKC-S DeveloperType/No : SKD-S2			
Sample condition: As weld <input checked="" type="checkbox"/> Grinded <input type="checkbox"/> Machined <input type="checkbox"/> other <input type="checkbox"/>			
Description and results of the test : Weld surface of the mentioned sample was investigated through penetrant method and a CRATER PIPE was observed as the following image.			
			

شکل 5- نتیجه آزمایش مایع نافذ نمونه با کد 1-10-203

جزئی (PMZ)¹ جوش‌ها ایجاد نشده است. از آنجایی که معمولاً ترک‌های ناحیه جوش مشهودتر هستند این احتمال وجود داشت که ترک‌هایی در ناحیه PMZ جوش و در عمق هر نمونه ایجاد شده است. نتایج رادیوگرافی نمونه‌هایی که تحت کرنش 3/5 درصد جوشکاری شدند، نشان داد در تمامی این نمونه‌ها علاوه بر ترک‌های ستاره‌ای، ترک‌های طولی که نشان از ترک گرم است، وجود دارد و به نوعی کرنش 3/5 درصد، کرنش آستانه (Threshold strain) برای این نمونه‌ها بوده است. در نمونه‌ها یک روند افزایشی بین گرمای اعمالی به هر نمونه و مجموع طول ترک‌ها مشاهده شده است به گونه‌ای که در نمونه 3/5-2/6-150 که بیشترین گرما را در بین نمونه‌های تحت کرنش 3/5 درصد دریافت کرده است، بیشترین طول ترک، برابر با 74/4 میلی‌متر به‌دست آمده است.

3-3- نتایج آزمون رادیوگرافی

به‌منظور بررسی دقیق‌تر ترک‌های ایجاد شده، از آزمون رادیوگرافی به‌عنوان یک آزمون تکمیلی بر روی تمام نمونه‌ها استفاده شد. نمونه‌ای از نتایج ارائه شده توسط آزمایشگاه در شکل 6 برای نمونه با کد 3/5-2/6-150 ارائه شده است. نتایج حاصل برای تمام نمونه‌ها در جدول 4 به‌صورت خلاصه ارائه شده است. بررسی این نتایج نشان می‌دهد در نمونه‌ها تحت کرنش اعمالی 0/2، 0/5 و 1 ترک گرم ایجاد نشده است و فقط وجود ترک‌های ستاره‌ای در پایان خط جوش وجود داشته است. این نتایج دقیقاً مشابه نتایج به‌دست آمده از آزمون مایعات نافذ است و همان‌طور که بیان شد دلیل ترک‌های ستاره‌ای انقباض ذاتی آلیاژ است و ارتباطی به مقدار کرنش اعمالی به نمونه‌ها ندارد. نتایج رادیوگرافی در این نمونه‌ها تایید می‌کند که هیچ‌گونه ترکی در ناحیه ذوب

¹ Partial melted zone

Revision number : 0		Radiographic test report						Reference code/standard : —				
Thickness (mm)	No. of film	Film Size (cm)	Visible IQI	Repair	Reject	Accept	Segment /Weld No.	Type of defect(s) / location / Dimension				
—	1	10*12	Wire 13	—	*	—	—	Crack**				
Source Type	Source size (mm*mm)	Total film length(cm)	IQI Type	Film type	Screen Type	Exposure Technique	Ug (mm)	Sensitivity %	Density	SFD (cm)	Exposure Time (minute)	Source Strength(Kv)
X-RAY	2*2	12	10-16 Al	Kodak MX 125	Lead	SWSI	≤ 0.51	1-2	1.8-4	60	0.2	170
Abbreviation	Type of Weld Defects			Technique			Other					
	LOP: Lack of Penetration			SWSI: Single Wall Single Image			SFD: Source To Film Distance					
	LOF: Lack of Fusion			DWSI: Double Wall Single Image			IQI: Image Quality Indicator					
	TI: Tungsten Inclusion			DWDI: Double Wall Double Image			No.: Number					
*REMARK: Test result shall be considered by the customer.												
** تعداد ترک های گرم: 2 عدد طول بزرگترین ترک گرم: 39.8 میلی متر مجموع طول ترک های گرم: 74.4 میلی متر تعداد ترک های ستاره ای: 3 عدد طول بزرگترین ترک ستاره ای: 3.4 میلی متر												

شکل 6-نتیجه آزمایش رادیوگرافی نمونه با کد 3/5-2/6-150

جدول 4-نتایج آزمون رادیوگرافی

کد نمونه	نتیجه آزمون رادیوگرافی
0/2-10-203	سه مورد ترک ستاره ای هر یک به طول کمتر از 1/2 میلی متر مشاهده شد
0/5-10-203	ترکی مشاهده نشد
1-10-203	سه مورد ترک ستاره ای هر یک به طول کمتر از 2/3 میلی متر مشاهده شد
0/2-16-335	پنج مورد ترک ستاره ای هر یک به طول کمتر از 3/7 میلی متر مشاهده شد
0/5-16-335	دو مورد ترک ستاره ای هر یک به طول کمتر از 3/8 میلی متر مشاهده شد
1-16-335	ترکی مشاهده نشد
0/2-13-293	یازده مورد ترک ستاره ای هر یک به طول کمتر از 2/4 میلی متر مشاهده شد
0/5-13-293	شش مورد ترک ستاره ای هر یک به طول کمتر از 3/2 میلی متر مشاهده شد
1-13-293	دو مورد ترک ستاره ای هر یک به طول کمتر از 5/1 میلی متر مشاهده شد
3/5- 6/8-185	یک مورد ترک گرم با طول 7/20 میلی متر مشاهده شد. یک مورد ترک ستاره ای به طول کمتر از 2/3 میلی متر مشاهده شد.
3/5-4/5-150	یک مورد ترک گرم با طول 20/9 میلی متر مشاهده شد.
3/5-4/6-185	یک مورد ترک گرم با طول 48/8 میلی متر مشاهده شد. چهار مورد ترک ستاره ای به طول کمتر از 4/3 میلی متر مشاهده شد.
3/5-2/6-150	دو مورد ترک گرم مشاهده شد که طول بزرگترین ترک گرم 39/8 میلی متر است. مجموع طول ترک های گرم برابر 74/4 میلی متر است. سه مورد ترک ستاره ای به طول کمتر از 3/4 میلی متر مشاهده شد.

میزان بحرانی نرسیده است بنابراین ترک گرم در نمونه‌ها ایجاد نشد. با افزایش میزان کرنش به مقدار 3/5 درصد، به دلیل تجاوز تنش اعمال شده از حد بحرانی، ترک گرم تشکیل شد.

نتایج جوشکاری با کرنش اعمالی 3/5 درصد نشان می‌دهد در حالت جوشکاری با جریان 185 آمپر، با افزایش سرعت جوشکاری طول ترک کاهش می‌یابد. همچنین در حالت جوشکاری با جریان 150 آمپر با افزایش سرعت جوشکاری، طول و تعداد ترک کاهش می‌یابد. در حالتی که سرعت های جوشکاری برابر است با کاهش جریان از 185 آمپر به 150 آمپر، طول ترک تا حدی کاهش می‌یابد. از طرفی، زمانی که با کاهش جریان از 185 آمپر به 150 آمپر انتظار می‌رود طول و تعداد ترک کاهش یابد با کاهش سرعت جوشکاری، افزایش بسیار چشمگیر طول و تعداد ترک مشاهده می‌شود.

شکل 7 طول ترک‌ها را برای نمونه‌های جوشکاری مختلف تحت کرنش 3/5 درصد نشان می‌دهد. جهت بررسی دقیق‌تر ارتباط میان پارامترهای جوشکاری و طول ترک‌های گرم ایجاد شده منحنی مجموع طول ترک‌ها بر حسب حرارت ورودی رسم شد که نتایج آن در شکل 8 ارائه شده است. مطابق شکل 8 رابطه مجموع طول ترک‌ها با حرارت ورودی یک رابطه خطی است که با تطبیق دادن بهترین خط بر روی آن رابطه (1) به دست می‌آید.

$$L = 12.472Q - 54.215 \quad (1)$$

در این رابطه L نشان‌دهنده مجموع طول ترک‌های گرم برای هر نمونه و Q حرارت ورودی بر حسب کیلوژول بر سانتیمتر است. تحقیقات انجام شده توسط دیگر محققین نیز نتایج مشابهی نشان داده است، به این صورت که مجموع طول ترک‌ها در هر نمونه جوشکاری شده با حرارت ورودی رابطه خطی داشته است (Kato and Kerr 1987). از این رابطه می‌توان پیش‌بینی کرد که کمترین میزان حرارت ورودی برای ایجاد ترک گرم، حدود 4/34 کیلوژول بر سانتیمتر است. به عبارتی انتظار می‌رود در حرارت‌های ورودی کمتر از 4/34 کیلوژول بر سانتیمتر برای

مطابق نتایج به دست آمده در نمونه‌هایی که بر آن‌ها کرنش 0/2، 0/5 و 1 درصد اعمال شد حتی با افزایش حرارت ورودی و تغییرات زیاد در پارامترهای جوشکاری، هیچ ترک گرمی ایجاد نشد. با بررسی و مطالعه پژوهش‌های پیشین بر عوامل ایجاد ترک گرم بر روی آلیاژهای فولادی و آلومینیومی مشخص شد که، در نمونه‌هایی با اعمال کرنش بالاتر، ترک گرم ایجاد شده است. نتایج تحقیقی که بر روی آلیاژهای گروه 6xxx انجام شده بود، نشان داد در جوشکاری با حرارت ورودی کمتر از 11 کیلوژول بر سانتیمتر و کرنش تا 3/2 درصد، ترک گرم ایجاد نشده است. در صورتی که در کرنش‌های بالاتر ترک مشاهده شد.

با بررسی تحقیقات انجام شده، تصمیم بر این شد که از کرنش بالاتری به اندازه 3/5 درصد، جهت بررسی احتمال ایجاد ترک گرم بر روی نمونه‌ها استفاده شود. در حرارت ورودی بالاتر از 11 کیلوژول بر سانتیمتر و کرنش 3/5 درصد، نمونه تحت جوشکاری کاملاً ذوب شد به همین دلیل با استفاده از تغییر جریان، حرارت ورودی کاهش داده شد. دلیل ذوب شدن نمونه ضخامت پایین آن بود (3 میلی‌متر) در حالی که ضخامت نمونه عنوان شده در تحقیق مورد نظر 6 میلی‌متر بود.

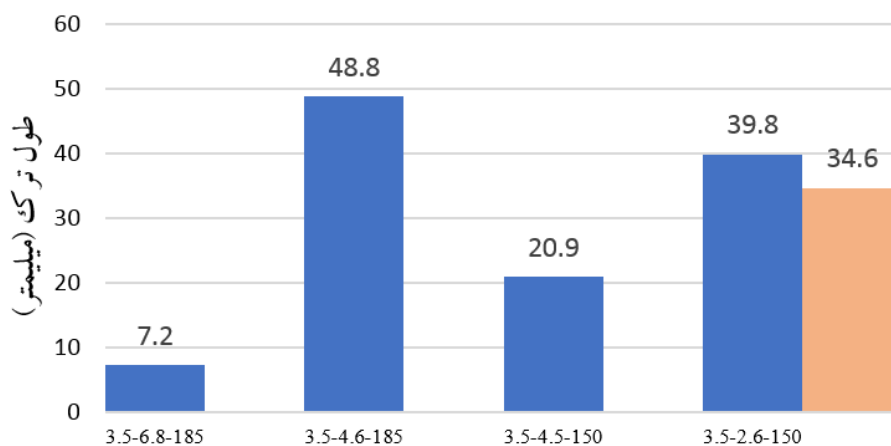
نتایج نشان داد با اعمال کرنش 3/5 درصد، جریان‌های 150 و 180 آمپر و سرعت جوشکاری بین 2/5 تا 7 میلی‌متر بر ثانیه در نمونه‌های جوشکاری شده، ترک گرم ایجاد شد. این نتایج نشان می‌دهد که میزان کرنش اعمالی جهت ایجاد ترک گرم، بسیار موثر است به گونه‌ای که در کرنش‌های اعمالی پایین، حتی تحت تغییرات زیاد پارامترهای جوشکاری، ترک گرمی در قطعه‌ها ایجاد نشد. ترک گرم در اثر تشکیل یک شبکه جامد در هم فرورفته است که توسط لایه‌های نازکی از مذاب به هم پیوسته از یکدیگر جدا شده‌اند. در صورتی که تنش‌های کششی وارد بر این ساختار از حد بحرانی تجاوز کنند باعث لغزش دانه‌های احاطه شده توسط لایه مذاب می‌شود و منجر به ایجاد ترک در ساختار می‌گردد.

در این تحقیق، در کرنش‌های اعمالی تا 1 درصد، میزان تنش اعمال شده به نمونه در حال جوشکاری، به

نیز تاثیرگذار هستند. بررسی‌هایی که *singh* و همکارانش در این زمینه بر روی فولاد زنگ نزن آستنیتی 314 انجام دادند، نشان داد که با تغییر جریان و سرعت جوشکاری در حالی که حرارت ورودی ثابت بماند محل تشکیل ترک تغییر کرده است (Singh, Hurtig, and Andersson 2018).

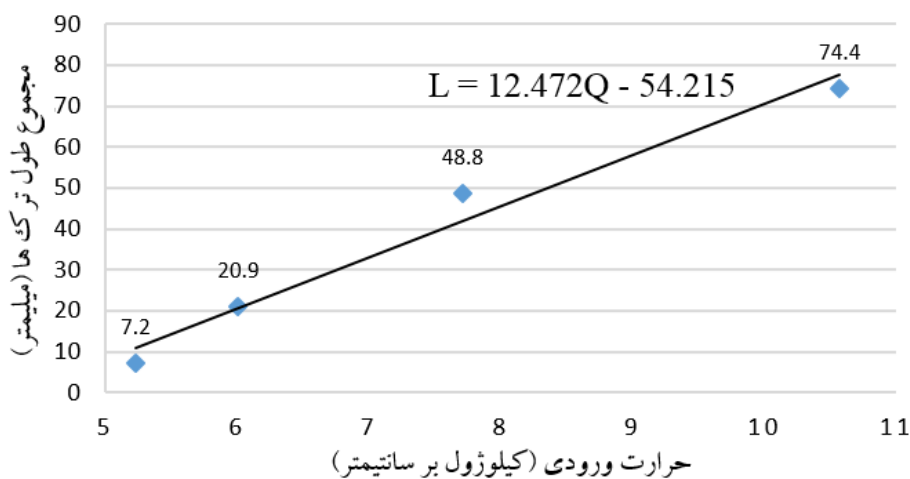
ورق‌های آلومینیوم آلیاژی 2024-T3 با ضخامت 3 میلیمتر و کرنش اعمالی 3/5 درصد ترک گرم ایجاد نشود.

البته بررسی‌های انجام شده توسط دیگر محققین نشان داده است که نه تنها حرارت ورودی بر ایجاد ترک گرم در حین جوشکاری موثر است بلکه در یک حرارت ورودی یکسان، تغییر پارامترهای جوشکاری



نمونه های جوشکاری شده

شکل 7- نمودار طول ترک‌های گرم در نمونه‌های جوشکاری شده تحت کرنش 3/5%



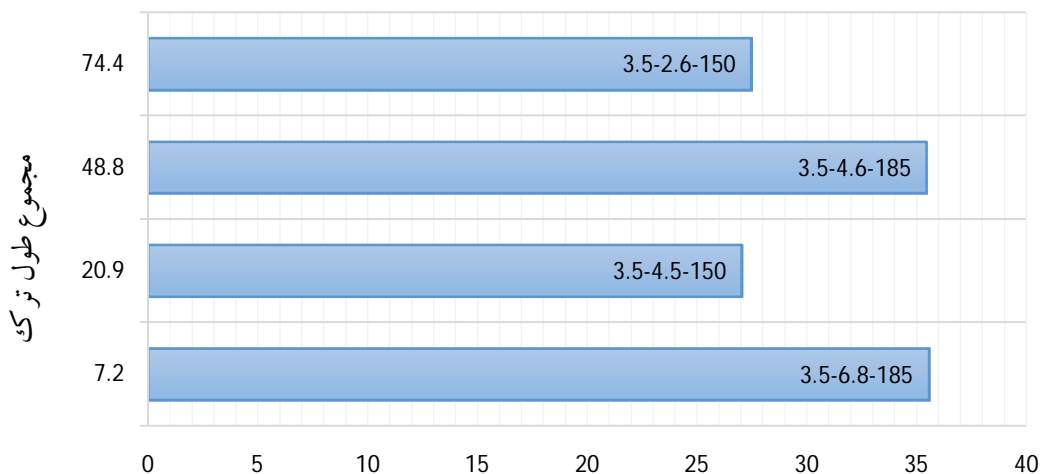
شکل 8 - نمودار مجموع طول ترک‌های گرم بر حسب حرارت ورودی

برای بررسی این تاثیر، پارامتر (گرما×سرعت) برای نمونه‌های جوشکاری شده تحت کرنش اعمالی 3/5 درصد محاسبه شد.

نتایج نشان داد مقدار پارامتر (گرما×سرعت) برای دو نمونه 3/5-6/8-185 و 3/5-4/6-185 تقریباً برابر است ولی مجموع طول ترک به دست آمده در نمونه 3/5-4/6-185 بیشتر است. همچنین پارامتر (گرما×سرعت) برای دو نمونه 3/5-4/5-150 و 3/5-2/6-150 برابر است ولی مجموع طول ترک به دست آمده برای نمونه 3/5-2/6-150 بیشتر است. در شکل (9) نمودار مجموع طول ترک بر حسب (گرما×سرعت) ارائه شده است. نتیجه به دست آمده از این نمودار مشخص می‌کند در یک پارامتر (گرما×سرعت) ثابت نمونه‌ای که با سرعت کمتری جوشکاری شده است، استعداد به ترک بیشتری داشته است.

3-4- بررسی تاثیر سرعت جوشکاری بر تشکیل ترک گرم

به طور کلی می‌توان گفت یکی از پارامترهای مهم که بر شکل‌گیری و طول ترک‌ها تاثیر می‌گذارد، سرعت جوشکاری است. افزایش سرعت جوشکاری می‌تواند باعث باریک شدن ناحیه جوش و همچنین تغییر در ریزساختار ناحیه جوش شود. از آنجایی که سرعت جوشکاری به گرمای ورودی بستگی دارد به عبارتی با افزایش گرمای ورودی به قطعه، اپراتور مجبور به افزایش سرعت حرکت الکتروود است پس به نوعی سرعت جوشکاری یک عامل دو طرفه در گرمای ورودی است. یعنی هم سرعت جوشکاری، مقدار گرمای ورودی را تعیین می‌کند و هم مقدار گرمای ورودی، سرعت پیشروی را تعیین می‌کند.



شکل 9- نمودار مجموع طول ترک بر حسب (گرما×سرعت) گرمای ورودی × سرعت جوشکاری

تمایل ساختار از هم‌محور به ساختار ستونی می‌شود (Coniglio and Cross 2016).

ریزساختار ستونی دارای انقباض متمرکز است و در نتیجه کل انقباض ناحیه جوش در مرکز آن متمرکز می‌شود و احتمال جوانه‌زنی و رشد ترک را افزایش می‌دهد. همچنین در سرعت جوشکاری پایین‌تر

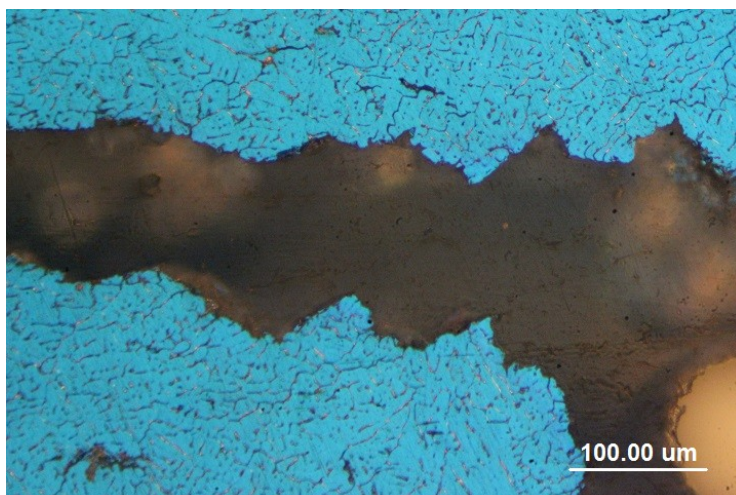
درواقع کاهش سرعت جوشکاری باعث پهن‌تر شدن ناحیه ذوبی و PMZ می‌شود. پهن‌تر شدن این ناحیه، باعث اعوجاج در قسمت جامد و در نتیجه باعث افزایش تنش‌های ناشی از انقباض می‌شود. همچنین پهن شدن ناحیه جوش در سرعت‌های جوشکاری پایین باعث تغییر در ریزساختار ناحیه جوش می‌شود و باعث

طبق تئوری کرنش، وجود فیلم مذاب بین دندریتهایی که به مراحل پایانی انجماد رسیده‌اند ولی هنوز در دمای بالاتر از خط سالییدوس قرار دارند باعث پارگی گرم می‌شود. زمانی که حوضچه جوش در مرحله فیلم مذاب قرار دارد، در ابتدا لایه فیلم مذاب ضخیم است و قابلیت جذب کرنش‌های ناشی از دیگر قسمت‌های منجمد شده قطعه را دارد. در مراحل بعدی فیلم مذاب نازک‌تر می‌شود و تمرکز کرنش در فیلم افزایش می‌یابد که در این زمان احتمال وقوع پارگی و ترک وجود دارد. در شکل (11) نیز به خوبی نشان داده شده است که در لحظات پایانی انجماد دندریته‌ها از داخل یکدیگر بیرون کشیده و به نوعی پاره شده‌اند و مذاب باقی‌مانده روی سطح آن‌ها منجمد شده است.

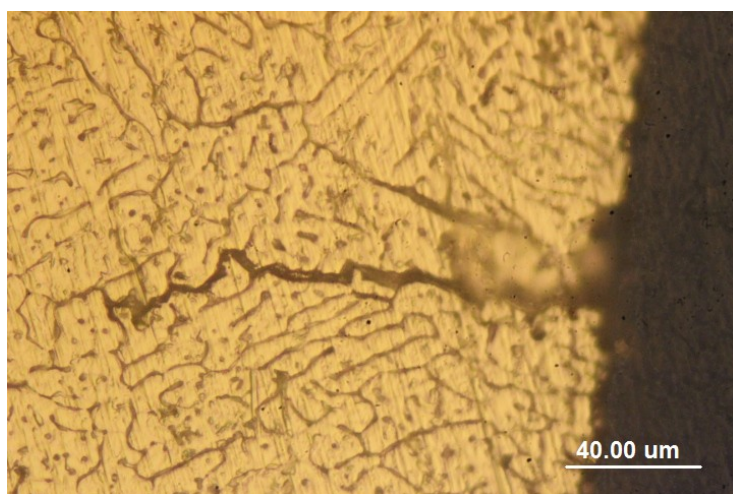
به دلیل پهن شدن حوضچه جوش، زمان انجماد افزایش می‌یابد و احتمال هم‌زمان شدن تمرکز کرنش و حرارت افزایش می‌یابد که این موضوع یکی از شروط اصلی برای رخداد ترک گرم است.

3-5- بررسی ریزساختاری

در شکل (10) تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه 3/5- 6/8-185 نشان می‌دهد ترک‌های ایجاد شده در نمونه، مسیر بین دندریته‌ی را طی کرده‌اند و در مقیاس میکروسکوپی مسیر آن‌ها زیگزاگ است و تقریباً هیچ دندریته‌ی در مسیر ترک شکسته نشده است. این موضوع تاییدی بر رخداد ترک گرم است و فرض شکل‌گیری ترک‌ها پس از پایان انجماد (ترک سرد) را کاملاً رد می‌کند.



شکل 10- تصویر میکروسکوپ نوری ترک در نمونه 3/5- 6/8-185



شکل 11- تصویر میکروسکوپ نوری ترک در نمونه 3/5- 6/8-185

6-3- نتیجه گیری

در این پژوهش، استعداد آلومینیوم آلیاژی 2024 به تشکیل ترک گرم در حین فرآیند جوشکاری با الکتروود تنگستن (نیگ) مورد بررسی قرار گرفت تا تاثیر پارامترهای جوشکاری بر تشکیل ترک گرم ارزیابی شود.

نتایج به دست آمده عبارتند از:

1- در نمونه های جوشکاری شده تحت کرنش های 0/2، 0/5 و 1 با افزایش مقدار گرمای ورودی به نمونه ها، پس از ارزیابی چشمی، آزمون مایعات نافذ و رادیوگرافی هیچ ترکی مشاهده نشد. پس می توان نتیجه گرفت افزایش گرمای ورودی به تنهایی در صورتی می تواند منجر به ترک شود که کرنش آستانه به نمونه اعمال شود.

2- کرنش 3/5% بیشتر از مقدار کرنش آستانه بود. در تمام سرعت های جوشکاری بین 2/5 تا 7 میلی متر بر ثانیه ترک گرم ایجاد شده است. نتیجه این که نقش کرنش پررنگ تر از نقش گرمای ورودی است.

3- پس از رسیدن به کرنش آستانه هرچه گرمای ورودی افزایش یافت، جوش پذیری نمونه کمتر شده است و به نوعی مجموع طول ترک افزایش یافته است

مراجع

باقری مسعودزاده، مجید. 1395. ارائه یک معیار آزمایشگاهی تحلیلی جدید برای پیش بینی ترک گرم در فرآیند ریخته گری پیوسته. پایان نامه. دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.

Coniglio N., and Cross C. E., 2016. Towards Establishment of Weldability Testing Standards for Solidification Cracking. In Cracking Phenomena in Welds IV: 37-66.

Idowu O. A., Ojo O. A., and Chaturvedi M. C., 2007. Effect of heat input on heat affected zone cracking in laser welded ATI Allvac 718Plus superalloy. Materials Science and Engineering: A 454: 389-397.

به گونه ای که از 7/2 میلی متر در نمونه 185-6/8 - 3/5 به 74/4 میلی متر در نمونه 150-2/6-3/5 رسیده است.

4- تقریباً در تمامی نمونه ها عیب حفره لوله ای (ترک ستاره ای) در انتهای مسیر جوشکاری دیده شد و توسط آزمون های مایع نافذ و رادیوگرافی تایید شد. این موضوع دلیلی بر انقباض نسبتاً زیاد ذاتی در این آلیاژ است که منجر به افزایش استعداد به ترک شده است. اما کنترل پارامترها در این تحقیق توانسته است مانع از ترک گرم در نمونه ها شود.

5- مسیر زیگزاگ ترک در ریزساختار میکروسکوپی و عبور آن از بین دندریت ها تاییدی بر رخداد ترک گرم است. پس عوامل انتخاب شده برای کنترل آن یعنی کاهش گرمای ورودی و باریک کردن حوضچه جوش با افزایش سرعت جوشکاری کاملاً صحیح بوده است و نقش موثری در کاهش آن داشته اند.

6- ثابت شد در یک مقدار (گرمای سرعت) ثابت با افزایش سرعت جوشکاری به دلیل باریک شدن حوضچه جوش و در نتیجه تغییر در ریزساختار آن، احتمال رخداد ترک کاهش می یابد.

John C. Lippold, Damian J. Kotecki. 2005. Welding metallurgy and weldability of stainless steels. Wiley.

Katoh M., and Kerr H. W., 1987. Investigation of heat-affected zone cracking of gta weld of Al-Mg-Si alloys using the vareststraint test. welding research supplement: 360-368.

Mathers G., 2002. The welding of aluminium and its alloys, Woodhead publishing.

Singh S., Hurtig K., and Andersson J., 2018. Investigation on effect of welding parameters on solidification cracking of austenitic stainless steel 314. Procedia Manufacturing. 25: 351-357.

Statharas, D., Atkinson, H., Thornton, R., Marsden, J., Dong, H., and Sh. Wen, 2019. Getting the Strain Under Control: Trans-Varestraint Tests for Hot Cracking Susceptibility. Metallurgical and Materials Transactions 50:1748-1762.

Investigation of Hot Crack Formation in Aluminum 2024 Alloy during Tungsten Arc Welding

Abstract

TIG welding or tungsten arc welding, is one of the most important methods of welding in various large and small industries. This type of welding allows welding of different products from thin sheets (e.g. aluminum sheets) to pressured tubes. Among the weld defects, crack is the most dangerous defect because the weldability of the materials are evaluated based on their tendency to create and grow crack during and after welding. The cracks are divided into two groups of hot cracks and cold cracks, depending on the degree of heat generated. The hot cracking is due to the instability of weld metal under strain during cooling in the critical temperature range. In this study, the susceptibility to hot cracking of aluminum alloy 2024-T3 under welding process with TIG was investigated. In order to apply strain, V-restraint test was used. For this purpose, four blocks with different radius were built for applying strains of 0.2, 0.5, 1 and 3.5%. Radiographic and Penetrant tests were used to observe hot cracking and inspection of welding defects. In order to observe microstructure of welded samples, metallographic test was used. Experimental results showed that in the welded samples, under 0.2, 0.5, and 1% strain, with variation of welding parameters and increasing heat input, hot cracking was not created. By applying 3.5% strain, hot cracks in the samples with various welding parameters were created, which indicates that strain is more effective parameter than heat input for creating hot cracks. In one specimen, two cracks were formed and in the other just one. For specimen with two cracks, the total crack length was 74.4 mm and the largest crack was 39.8 mm. Among the specimen with one crack, the length of the longest crack was 48.8 mm. In the state of applying strain above threshold strain, with increasing input heat, crack length was increased. Crater cracks were observed in some of the welding samples. This type of crack occurs when a crater is not filled before the arc is broken. This causes the outer edges of the crater to cool more quickly than the crater, which creates sufficient stresses to form a crack. Zigzag path of crack and crossing through the dendrites in the microscopic scale, confirmed the occurrence of hot cracking in the samples. Also, results show that the length of the hot cracks decreased with increasing welding speed.

Keywords: TIG Welding; Hot Cracking; Input Heat; Strain; 2024 Aluminum Alloy.