

بررسی اثر نیروی الکتروتود و زمان اعمال آن بر تنش پسماند ناشی از جوشکاری مقاومتی نقطه‌یی ورق‌های آلومینیوم

محمد صدیقی* (دانشیار)

داود افشاری (دانشجوی دکتری)

فرهاد نظری (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۴)
دوری ۳ - ۳۱، شماره ۲، ص. ۹۷-۱۰۲

هدف از این پژوهش بررسی اثر نیروی الکتروتود و زمان اعمال آن بر تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری مقاومتی نقطه‌یی آلیاژ ۶۰۶۱-T۶ آلومینیوم است. در این مطالعه از یک مدل المان محدود مکانیکی - الکتریکی - حرارتی دو بعدی با تقارن محوری برای پیش‌بینی توزیع دما، اندازه‌ی دکمه‌ی جوش و تنش‌های پسماند استفاده شده است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با آزمایش‌های عملی که تنش‌های پسماند در آنها با استفاده از تفرق اشعه‌ی x اندازه‌گیری شده، مقایسه شده است. مطالعات نشان می‌دهد بالاترین مقدار تنش پسماند کششی در فصل مشترک ورق‌ها و مرکز دکمه‌ی جوش رخ می‌دهد و در راستای شعاع جوش مقدار تنش‌ها کاهش می‌یابد. نتایج حاصله نشان‌گر آن است که با افزایش نیروی الکتروتود و زمان اعمال آن تنش‌های پسماند افزایش می‌یابند اما تأثیر زمان اعمال نیرو بر تنش‌های پسماند بیشتر از مقدار نیرو است.

واژگان کلیدی: جوشکاری مقاومتی نقطه‌یی، تنش پسماند، مدل المان محدود،

نیروی الکتروتود، زمان اعمال نیرو.

sedighi@iust.ac.ir
dafshari@iust.ac.ir
f.nazari@mecheng.iust.ac.ir

۱. مقدمه

مخرب، نیمه‌مخرب و غیر مخرب تقسیم می‌شود.^[۳] استفاده از این روش‌ها به دلیل زمان‌بر بودن، نیاز به مهارت بالا و هزینه‌بر بودن بسیار محدود است و لذا، دست‌یابی به یک مدل المان محدود به‌منظور پیش‌بینی تنش‌های پسماند حائز اهمیت است. بررسی تنش پسماند در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌یی روی ورق‌های فولادی (۱۹۹۰) با استفاده از تفرق اشعه‌ی ایکس^[۴] نشان داد که بیشترین مقدار تنش پسماند کششی در مرکز جوش ایجاد می‌شود و با حرکت به سمت مرزهای دکمه‌ی جوش مقدار تنش‌ها کاهش می‌یابد. با استفاده از یک مدل المان محدود حرارتی - الکتریکی - مکانیکی برای بررسی ورق آلومینیوم^[۵] نشان داده شد که به دلیل ضخامت کم ورق تنش‌چندانی ملاحظه نمی‌شود؛ برای اعتبارسنجی این مدل از اندازه‌ی دکمه‌ی جوش استفاده شد. از سوی دیگر محققین با استفاده از یک مدل الکتروترمو مکانیکی برای مدل‌سازی توزیع تنش پسماند در آلومینیوم،^[۶] ابتدا گرما و سپس تنش پسماند را در داخل قطعه محاسبه کردند و برای اعتبارسنجی از دکمه‌ی جوش استفاده کردند. همچنین با بررسی امکان‌سنجی استفاده از ورق پشتیبان در جوشکاری مقاومتی نقطه‌یی آلومینیوم^[۷] نشان داده شد که می‌توان با به‌کارگیری این روش به دکمه‌ی جوش بزرگ‌تر با استحکام بالا با استفاده از جریان جوشکاری پایین دست یافت. نتایج حاصل از بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری بر دکمه‌ی جوش و استحکام آن^[۸] نشان داد که با افزایش جریان و زمان جوشکاری

امروزه استفاده از مواد با چگالی پایین در صنایع مختلف مانند اتومبیل‌سازی و صنایع هوایی بسیار اهمیت پیدا کرده و به افزایش کاربرد آلیاژهای آلومینیوم انجامیده است. جوشکاری مقاومتی نقطه‌یی یکی از روش‌های پرکاربرد مونتاژ است که سرعت بالا و پتانسیل خوبی برای اتوماسیون دارد و به همین دلیل در صنایع با تولید انبوه به‌خصوص خودروسازی و هوافضا کاربرد فراوانی دارد.

در این روش بر اثر عبور جریان الکتریکی با شدت بالا به دلیل مقاومت داخلی و تماسی ورق‌ها، فلز به صورت موضعی ذوب شده و در اثر اعمال فشار همزمان، پس از قطع جریان و سرد شدن، اتصال صورت گرفته و دکمه‌ی جوش شکل می‌گیرد.^[۱] در ورق‌های با ضخامت‌های مختلف قطر دکمه‌ی جوش متفاوت است و محدوده‌ی ایمن آن بین $4\sqrt{t}$ و $5\sqrt{t}$ (ضخامت ورق) ارزیابی شده است.^[۱] در نتیجه‌ی اعمال نیرو و ذوب موضعی در قطعه، پس از سرد شدن مقداری تنش پسماند در ناحیه‌ی جوش ایجاد می‌شود. تنش‌های پسماند از آن روی اهمیت دارند که می‌توانند تنش بیشینه‌ی قطعه را افزایش داده و سبب کاهش عمر خستگی و ایجاد ترک در قطعات شوند. روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند به‌طور کلی در سه دسته روش

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۱/۷، اصلاحیه ۱۳۹۳/۴/۷، پذیرش ۱۳۹۳/۴/۱۶

جدول ۱. عناصر آلیاژی و خواص مکانیکی آلیاژ T6-۶۰۶۱ آلومینیوم.

Al	Si	Mn	Mg	Fe	Cu	Cr	سختی	استحکام کششی	استحکام تسلیم
%Wt.	%Wt.	%Wt.	%Wt.	%Wt.	%Wt.	%Wt.	Vickers	Mpa	Mpa
۹۷/۰	۰/۶	۰/۱	۱/۰	۰/۵	۰/۲	۰/۱	۱۰۷/۰	۳۱۰/۰	۲۷۶/۰

جدول ۲. خواص فیزیکی آلیاژ T6-۶۰۶۱ آلومینیوم. [۱۴]

دما (C)	ضریب انبساط حرارتی ($10^{-6} C^{-1}$)	رسانایی حرارتی (W/m K)	گرمای ویژه (J/kg K)	چگالی (kg/m ³)
۰	۲۲/۴	۱۶۲	۹۱۷	۲۷۰۰
۹۳	۲۴/۶۱	۱۷۷	۹۷۸	۲۷۰۰
۲۰۱	۲۶/۶	۱۹۲	۱۰۲۸	۲۷۰۰
۳۱۶	۲۷/۶	۲۰۷	۱۰۷۸	۲۷۰۰
۴۲۸	۲۹/۶	۲۲۳	۱۱۳۳	۲۷۰۰
۵۷۱	۳۴/۲	۲۵۳	۱۲۳۰	۲۷۰۰

جدول ۳. خواص مکانیکی آلیاژ T6-۶۰۶۱ آلومینیوم. [۱۵]

دما (C)	تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسن
۲۵	۲۷۵	۶۹/۷	۰/۳۳
۱۷۷	۲۴۰	۶۱	۰/۳۳
۲۶۰	۱۶۵	۵۴	۰/۳۳
۳۱۵	۹۰	۴۷	۰/۳۳
۳۷۰	۵۵	۳۸	۰/۳۳
۴۰۰	۳۲	۱۶/۷	۰/۳۳

جدول ۴. پارامترهای انتخاب شده برای بررسی نیرو.

نیرو (N)	زمان نیرو (Cycle)	نیرو (N)	زمان نیرو (Cycle)
(N)	(Cycle)	(N)	(Cycle)
۳۶۰۰	۳	۴۰۳۳	۷
۴۰۳۳	۳	۴۰۳۳	۸
۴۵۰۰	۳	۴۰۳۳	۹
۵۰۰۰	۳	۴۰۳۳	۱۰
۵۵۰۰	۳	۴۰۳۳	۱۱
۶۰۰۰	۳	۴۰۳۳	۱۲

میانگین‌گیری از سه نمونه آزمایش شده است. پس از مقایسه‌ی نتایج با نمونه‌ی شبیه‌سازی شده و اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی، برای طراحی آزمایش‌ها با استناد به استاندارد AWS حد مجاز مقدار نیرو و زمان اعمال آن برای ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ با ضخامت ۲ mm تعیین شد که برای نمایش بهتر روند تغییرات تنش‌های پسماند، از مقادیر کم‌تر و بیشتر از بازه مجاز نیز استفاده شد. تمامی آزمایش‌ها در شدت جریان ۳۶ KA با فرکانس ۵۰ Hz و زمان اعمال جریان ۴ چرخه (۰/۸ ثانیه) انجام شده و زمان خنک‌کاری ۲۵۰ ثانیه در نظر گرفته شد تا از هم‌دما شدن قطعه با دمای محیط و تثبیت تنش‌های پسماند در قطعات اطمینان حاصل شود. شرح پارامترهای هر آزمایش در جدول ۴ آمده است.

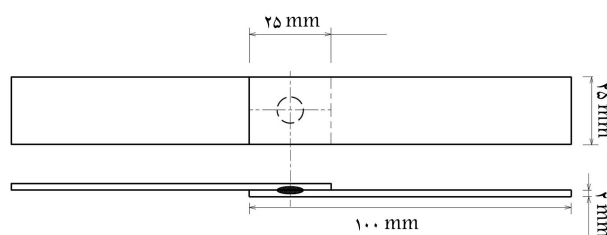
قطر دکمه‌ی جوش و استحکام آن افزایش یافته و نوع شکست از حالت داخلی به خارجی تغییر می‌کند. مطالعه‌ی تنش‌های پسماند در جوشکاری مقاومتی نقطه‌یی با استفاده از تفرق اشعه‌ی نوترونی [۱۰،۹] محققین را در ترسیم یک مدل سه‌بعدی از تنش پسماند در ورق آلومینیوم باری رساند. آنها در پژوهشی دیگر درخصوص عمر خستگی ورق آلومینیوم T6-۶۰۶۱ دریافتند که پارامترهای جوشکاری تأثیر بسیاری بر عمر و مدل‌های شکست خستگی در جوشکاری مقاومتی نقطه‌یی ایفا می‌کنند. بررسی ورق آلومینیوم با ضخامت ۲ mm نشان داد که با افزایش شدت جریان و زمان جوشکاری بار شکست افزایش یافته و بیشینه تنش پسماند کاهش می‌یابد. [۱۲،۱۱] براساس ریزساختار شکل‌گرفته پس از جوشکاری کم‌ترین سختی و بیشترین تنش کششی در مرکز دکمه‌ی جوش رخ می‌دهد که در راستای شعاع دکمه‌ی جوش سختی افزایش و تنش‌های پسماند کاهش می‌یابد.

با توجه به این که مقدار نیروی الکتروود و مدت زمان اعمال آن از پارامترهای مهم در جوشکاری مقاومتی نقطه‌یی است می‌توان مشاهده کرد که تاکنون در بررسی‌های انجام شده روی آلومینیوم این پارامترها بررسی نشده‌اند. در این مطالعه با استفاده از یک مدل الکتریکی - حرارتی - مکانیکی در نرم افزار ANSYS ۱۲/۱، تأثیر پارامترهای نیرو الکتروود و مدت زمان اعمال آن بر تنش‌های پسماند روی ورق آلومینیوم T6-۶۰۶۱ با ضخامت ۲ mm بررسی شده است.

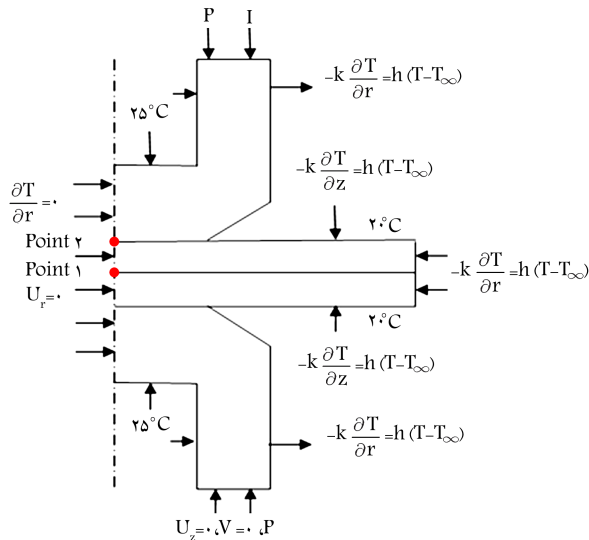
۲. شرایط آزمایش

برای بررسی تأثیر نیرو بر تنش‌های پسماند، نمونه‌هایی از ورق آلومینیوم T6-۶۰۶۱ با ضخامت ۲ mm و ابعاد ۲ mm × ۲۵ mm × ۱۰۰ mm مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱). اطلاعات مربوط به عناصر آلیاژی و خواص فیزیکی و مکانیکی این آلیاژ در جداول ۱ تا ۳ آمده است.

دستگاه جوشکاری مورد استفاده NIMAK مدل PMP۱۷DGS بوده و آزمایش براساس پارامترهای پیشنهادی توسط AWS [۱۲] طراحی شده است. ابتدا سطح نمونه‌ها با استفاده از کاغذ سنباده کاملاً تمیز شده و آزمایش با شدت جریان ۳۶ KA در ۴ چرخه (۰/۸ ثانیه) و نیروی ۴۰۳۳ N روی نمونه‌هایی با ضخامت ۲ mm انجام، و روی ۳ نمونه تکرار شده است. اندازه‌ی دکمه‌ی جوش به‌وسیله‌ی متالوگرافی اندازه‌گیری، و سپس با استفاده از روش تفرق اشعه‌ی ایکس تنش‌های پسماند آن بررسی شده است. اندازه‌ی تنش‌های پسماند گزارش شده براساس



شکل ۱. ابعاد نمونه‌ی آزمایش.



شکل ۳. شرایط مرزی حاکم بر محیط‌های مکانیکی، الکتریکی و حرارتی و موقعیت نقاط مورد بررسی.

محدود نیز دارای چرخه‌ی تکرار است. حل مدل المان محدود در بازه‌های زمانی مختلف با توجه به ویژگی‌ها و دقت مورد نیاز در هر مرحله انجام شده است. زمان به‌روز رسانی در مرحله‌ی اعمال جریان الکتریکی معادل ۰/۰۰۱ ثانیه، در مرحله‌ی قطع جریان و اعمال نیرو معادل ۰/۰۰۱ ثانیه، در زمان باربرداری و جدا شدن الکترودها معادل ۰/۰۱ ثانیه، و در زمان خنک‌کاری معادل ۱ ثانیه است؛ هر حلقه خود به ۱۰ زیرحلقه‌ی کوچک‌تر تقسیم می‌شود. تعداد کل چرخه‌ها براساس پارامترهای حل متفاوت است که به‌طور متوسط شامل ۷۱۷ مرحله به‌روز رسانی و ۷۱۷۰ زیرحلقه حل است.

معادلات استفاده شده در این مدل، دوبعدی و در مختصات استوانه‌ای است. رابطه‌ی ۱ معادله‌ی حاکم بر پتانسیل الکتریکی است که در آن r فاصله‌ی شعاعی، z فاصله در راستای محور دستگاه استوانه‌ای، و σ هدایت الکتریکی است. حل معادله نشان‌گر توزیع پتانسیل الکتریکی φ در مدل است.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\sigma}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

مدل حرارتی شامل بررسی دینامیکی دما در نتیجه‌ی تغییرات جریان الکتریکی و تولید گرما در مدل و انتقال حرارت از طریق رسانایی و همرفت است و توسط معادله‌های ۲ و ۳ بیان شده است:

$$q = \frac{\varphi^{\dagger} t}{R} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

که در آن q حرارت تولید شده در اثر پتانسیل الکتریکی، R مقاومت ماده، ρ چگالی، C ظرفیت گرمایی و k هدایت حرارتی است که وابسته به دما هستند. در این روابط T توزیع دما و t زمان را بیان می‌کنند. برای محاسبه‌ی تنش و کرنش نیز از معادله‌ی ۴ استفاده شده که یک رابطه‌ی ماتریسی است و در آن H ماتریس سختی، ϕ بردار جابه‌جایی و f بردار نیرو را معرفی می‌کنند.

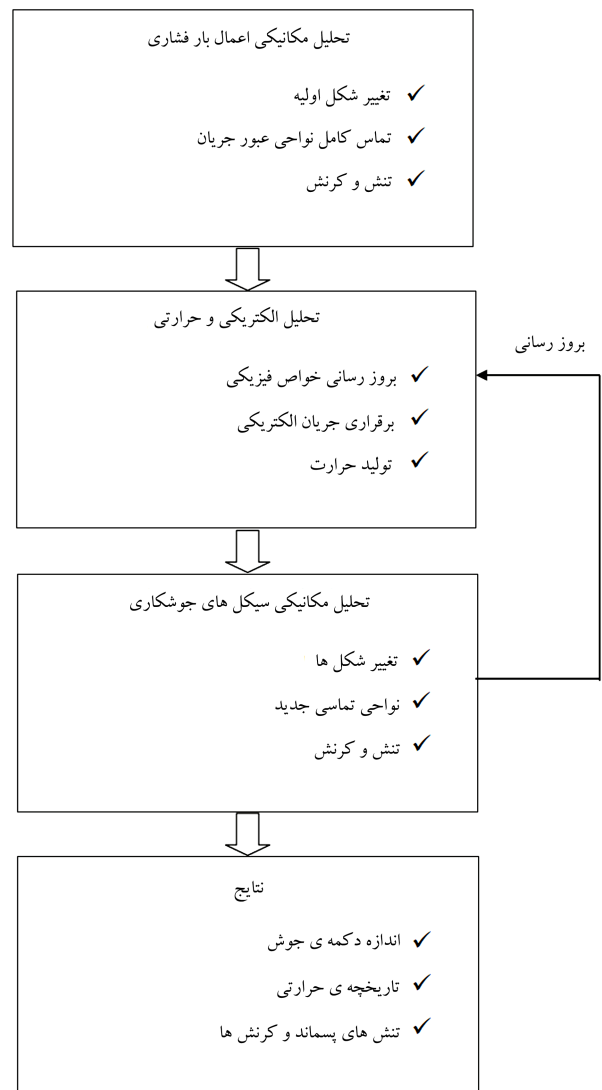
$$H \cdot \phi + f = 0 \quad (4)$$

۳. شرایط مرزی و معادلات حاکم بر فرایند

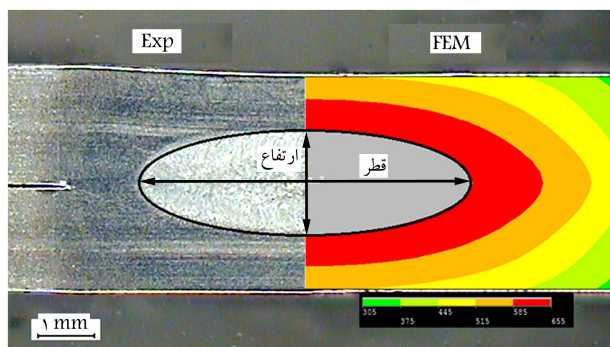
در این پژوهش از مدل دوبعدی متقارن محوری، کوپل شده به‌صورت الکتریکی - حرارتی - مکانیکی استفاده شده است که می‌تواند تاریخچه‌ی حرارتی، اندازه‌ی دکمه‌ی جوش و تنش‌های پسماند را شبیه‌سازی کند. الگوی عملکرد این مدل در شکل ۲ به‌صورت شماتیک بیان شده است.

در ابتدای کار نیروی فشاری به الکترودها اعمال شده و سپس جریان الکتریکی سینوسی با فرکانس ۵۰ Hz در الکترودها بالا برقرار می‌شود. ولتاژ الکتریکی صفر به الکترودها پایین نسبت داده شده است. محیط جانبی الکترودها و ورق در انتقال حرارت با هوای ۲۰ درجه هستند و از جریان آب با دمای ۲۵ درجه برای خنک کردن الکترودها استفاده شده است. شرایط مرزی حاکم بر محیط‌های مکانیکی، الکتریکی و حرارتی به‌طور کامل در شکل ۳ بیان شده است.

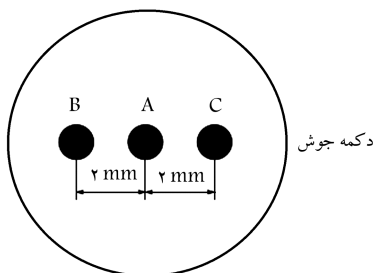
در قسمت تحلیل مکانیکی مدل المان محدود، از المان PLANE42 و در تعریف سطوح تماس از المان‌های TARGE169 و CONTA171 استفاده شده است. چنان که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، الگوریتم مورد استفاده در مدل المان



شکل ۲. نمودار الگوریتم حل مدل.



شکل ۴. مقایسه‌ی اندازه و شکل دکمه‌ی جوش شبیه‌سازی شده با نمونه‌ی متالوگرافی.



شکل ۵. مختصات نقاط مورد بررسی در تنش پسماند.

جدول ۵. مقایسه‌ی دکمه‌ی جوش در مدل المان محدود و آزمایش تجربی.

شبه‌سازی	تجربی	درصد خطا	
قطر دکمه‌ی جوش (mm)	۶٫۰۶	۵٫۷	۶٫۳
ارتفاع دکمه‌ی جوش (mm)	۲٫۱	۲٫۰۳	۳٫۴

جدول ۶. مقایسه‌ی تنش‌های پسماند در مدل المان محدود و آزمایش تجربی.

شبه‌سازی	تجربی	درصد خطا	
نقطه‌ی A (MPa)	۴۱٫۰	۳۸٫۴	۶٫۷
فاصله ۲ میلی‌متری از مرکز جوش	۸۷٫۰	۷۷٫۸	۱۱٫۸

۵. نتایج

در مراحل اولیه‌ی اعمال جریان، حوضچه‌ی جوش و مناطق مجاور آن بر اثر افزایش دما تعادل به انبساط دارند اما مناطق دیگر ورق که افزایش دمای زیادی نداشته‌اند از انبساط ممانعت کرده و در نتیجه موجب ایجاد تنش فشاری در ناحیه‌ی جوشکاری می‌شوند. نیروی فشاری الکتروتود نیز مزید بر علت می‌شود و این تنش را افزایش می‌دهد. با قطع جریان و سرد شدن دکمه‌ی جوش، این فرایند برعکس شده و باعث می‌شود که در ناحیه‌ی جوش تنش‌های کششی و در نواحی مجاور و سطح ورق تنش‌های فشاری ایجاد شود. در شکل ۶ توضیحات بیان شده برای نقاط ۱ و ۲ که در شکل ۳ مشخص شده‌اند، نمایش داده شده است.

بیشترین تنش پسماند در مرکز دکمه‌ی جوش رخ می‌دهد که با دور شدن از مرکز دکمه کاهش می‌یابد و با نرخ تولید حرارت رابطه‌ی مستقیم دارد. با فاصله گرفتن از مرکز دکمه‌ی جوش نرخ تولید حرارت کاهش می‌یابد که باعث می‌شود در هنگام سرد شدن نیز تنش‌های پسماند کم‌تری تولید شود (شکل ۷).

چنان که در شکل ۸ مشاهده می‌شود افزایش نیرو و زمان اعمال بار هر دو

انتقال گرما به روش رسانش بین سطوح در تماس با استفاده از رابطه‌ی ۵ تعریف شده که در آن q گرمای منتقل شده بین سطوح در تماس، TCC ضریب رسانایی حرارتی، و T_t و T_c دمای نقاط سطوح در تماس‌اند.

$$q = TCC \times (T_t - T_c) \quad (5)$$

برای تعریف ضریب رسانایی حرارتی (TCC) از رابطه‌ی ۶ استفاده شده است که در آن رسانایی حرارتی سطوح، m شیب ناهمواری‌ها، σ کیفیت سطوح تماس، P فشار وارد بر سطح، و E' مدول کشسان معادل است. [۱۶]

$$TCC = \frac{\sigma h_c}{mk_s} = 1,54 \left(\frac{\sqrt{2}P}{mE'} \right)^{0,92} \quad (6)$$

خواص الکتریکی برای دو سطح در تماس با استفاده از رابطه‌ی ۷ تعریف شده است که در آن J چگالی جریان الکتریکی، ECC ضریب رسانایی الکتریکی، و V_t و V_c پتانسیل الکتریکی در نقاط سطوح در تماس‌اند.

$$J = ECC \times (V_t - V_c) \quad (7)$$

برای تعریف ECC از روابط ۸ و ۹ استفاده شده که در آنها R و ρ مقاومت الکتریکی، l طول المان‌ها، A_c مساحت ناحیه‌ی تماس و $\sigma_{y,ave}$ تنش تسلیم میانگین است. [۱۷]

$$R(T) = \rho(T) \frac{l}{A_c} = R(20^\circ C) \sqrt{\frac{\sigma_{y,ave}(T^\circ C)}{\sigma_{y,ave}(20^\circ C)}} \quad (8)$$

$$ECC = \frac{1}{R(T^\circ C)} \quad (9)$$

همچنین جریان سینوسی با استفاده از رابطه‌ی ۱۰ تعریف شده که در این معادلات I_m مقدار بیشینه جریان بر حسب آمپر، f فرکانس بر حسب هرتز (Hz) و t زمان بر حسب ثانیه است.

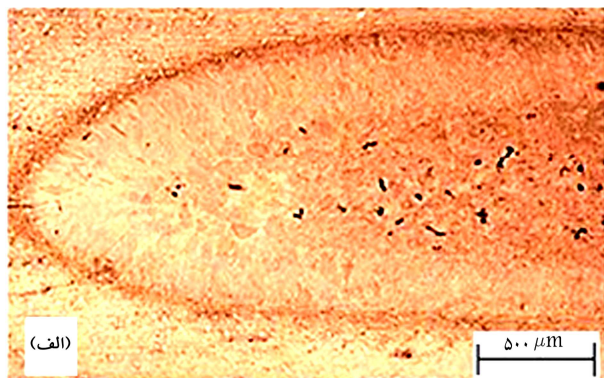
$$I = I_m \sin(2\pi ft) \quad (10)$$

۴. اعتبارسنجی مدل

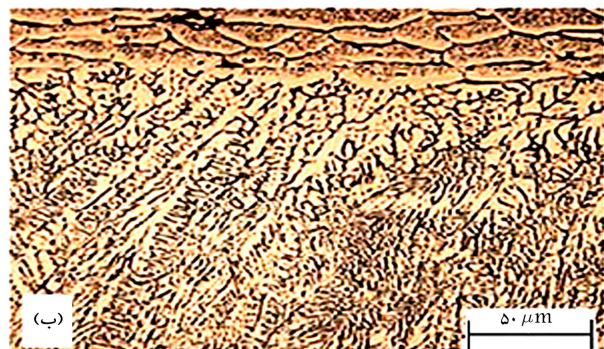
جهت اعتبارسنجی مدل المان محدود، نتایج استخراج شده از این مدل با نتایج بدست آمده از تست‌های آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. اعتبارسنجی در دو مرحله انجام گرفته است. ابتدا اندازه‌ی دکمه‌ی جوش مقایسه شده و سپس نتایج به دست آمده از تنش‌های پسماند مورد بررسی قرار گرفته است. برای تعیین قطر دکمه‌ی جوش نمونه‌ها متالوگرافی شده و دکمه اندازه‌گیری شده است. یکی از دلایل وجود خطا، همان تأثیر خواص فیزیکی وابسته به دماست؛ همچنین روابط مورد استفاده برای محاسبه‌ی مقاومت‌ها و رسانایی الکتریکی و حرارتی سطوح تماس خطاهایی را در مدل وارد کرده‌اند که اجتناب ناپذیر بوده است. شکل ۴ مقایسه‌ی هندسی دکمه‌ی جوش شبیه‌سازی شده و نمونه‌ی متالوگرافی شده را نشان می‌دهد که نتایج آن در جدول ۵ بیان شده است.

برای بررسی تنش‌های پسماند از دستگاه SEIFERT مدل XRD۳۰۰۰ PTS استفاده شده است. به این صورت که ۳ نقطه از سطح نمونه‌ها مطابق شکل ۵ در منطقه جوش انتخاب شده و تنش در این مناطق اندازه‌گیری شده است و سپس در هر نقطه بین تنش‌های به دست آمده از نمونه‌ها، میانگین‌گیری انجام شده است. [۱۸]

نتایج حاصل از مقایسه‌ی مدل المان محدود و نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول ۶ آمده است.



الف) نمای نیمی از دکمه جوش و فلز پایه؛



ب) دکمه ی جوش در نواحی مرزی دارای ساختار دندردیتی ستونی است و با رفتن به سمت مرکز دکمه ی جوش ساختار به حالت سلولی تغییر می کند.

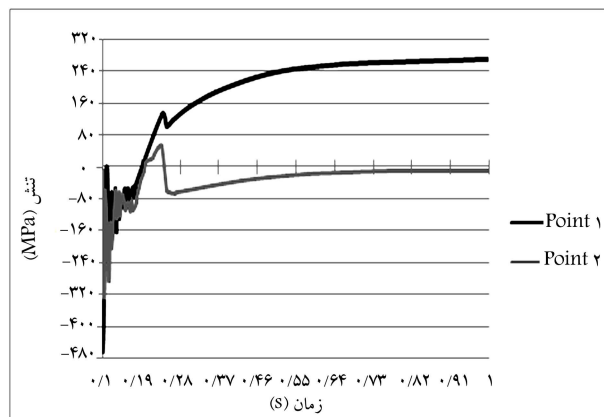
شکل ۹. ریز ساختار دکمه ی جوش.

برابر 316 MPa بوده است. در زمان اعمال نیروی ثابت (۳ چرخه) افزایش نیرو از 4033 تا 6000 نیوتون، ابتدا باعث افزایش تنش فشاری می شود اما پس از باربرداری، بخش زیادی از تنش های فشاری کاهش می یابد. همچنین در این مرحله چون ورق ها فقط از طریق تماس با هوا خنک می شوند نرخ انتقال حرارت کم است که باعث می شود بخشی از تنش ها تعدیل شوند. به همین دلیل بیشترین مقدار تنش پسماند در نیروی 6000 N و زمان نگهداری ۳ چرخه برابر 296 MPa بوده که از بیشینه تنش پسماند با نیروی 4033 N و زمان نگهداری ۸ چرخه (316 MPa) کم تر است.

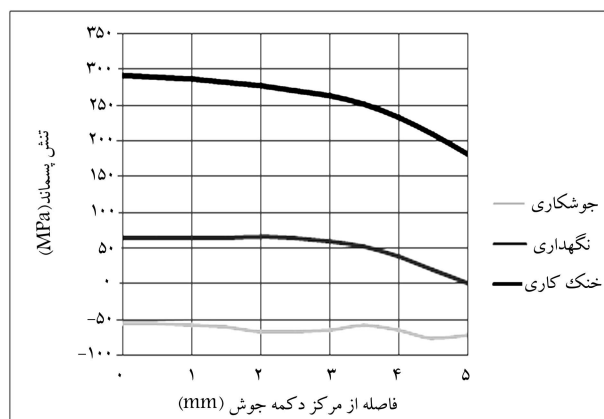
از نظر ریزساختاری با افزایش نیرو نوعی عملیات فورج روی دکمه ی جوش انجام می شود که باعث می شود حفره ها و عیوب در جوش کاهش یابد و در نتیجه استحکام دکمه ی جوش افزایش یابد.^[۱۹] پس افزایش نیرو تا حد بهینه می تواند باعث افزایش کیفیت جوش شود، اما با توجه به شکل ۹ افزایش زمان اعمال نیرو سبب می شود با افزایش سرعت سرد شدن و وسعت ساختارهای دندردیتی ستونی در دکمه ی جوش افزایش یابد و در نتیجه استحکام و تمرکز تنش در دکمه ی جوش کاهش می یابد.

۶. نتیجه گیری

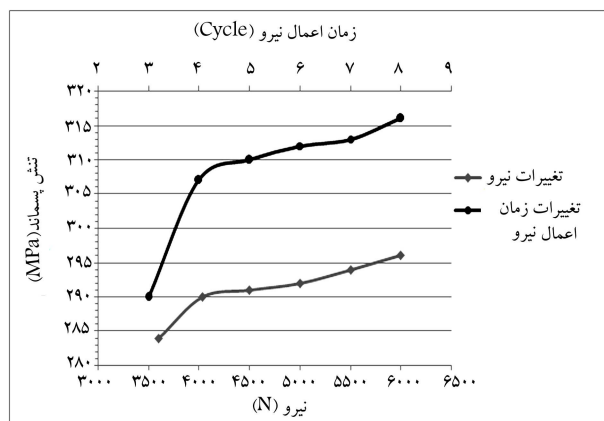
در این مطالعه اثر نیروی الکتروود و زمان اعمال آن بر تنش های پسماند ناشی از جوشکاری مقاومتی نقطه یی آلیاژ $6061-T6$ آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از یک مدل المان محدود مکانیکی - الکتریکی - حرارتی برای پیش بینی توزیع دما و تنش های پسماند طی مراحل جوشکاری مقاومتی نقطه یی و روش تفرق



شکل ۶. روند تغییرات تنش در مرکز و سطح ورق.



شکل ۷. روند تغییرات تنش پسماند در سطح مشترک دو ورق در راستای شعاع دکمه ی جوش.



شکل ۸. تغییرات تنش های پسماند در نتیجه ی افزایش نیروی الکتروود و زمان اعمال آن.

باعث افزایش تنش های پسماند می شوند اما افزایش زمان اعمال نیرو تأثیر بیشتری در افزایش تنش های پسماند دارد. در نیروی ثابت (4033 N) با افزایش زمان اعمال نیرو از ۳ تا ۸ دوره، چون الکتروودهای مسی با ورق مدت بیشتری در تماس هستند و نرخ انتقال حرارت مس زیاد است، و نیز از آنجا که الکتروودها از درون به وسیله ی جریان آب خنک می شوند، ناحیه ی جوش به سرعت سرد می شود و همین سبب افزایش تنش های پسماند می شود؛ بیشترین مقدار تنش پسماند در زمان ۸ چرخه و

۳. افزایش نیروی الکتروود و زمان اعمال آن سبب افزایش تنش‌های پسماند خواهد شد اما افزایش زمان اعمال نیرو به دلیل سرعت بخشیدن به نرخ انتقال حرارت نسبت به نیرو پارامتر مؤثرتری است.
۴. گسترش ریزساختار دندریتی ستونی در نتیجه‌ی افزایش زمان اعمال نیرو باعث کاهش استحکام، کاهش عمر خستگی و ایجاد تمرکز تنش در دکمه‌ی جوش می‌شود.
۱. تنش‌های پسماند در دکمه‌ی جوش و اطراف آن کششی و در نواحی دورتر و سطح قطعه فشاری است.
۲. تنش‌های پسماند در ناحیه‌ی مرکزی دکمه‌ی جوش بیشینه است و با حرکت در راستای طول قطعه کاهش می‌یابد.

منابع (References)

- Neville, T.W., *Resistance Spot Welding*, In ASM Handbook Welding, Brazing and Soldering, Joseph R. Davis et al, Ed., 10th Edn. (6), pp. 226-230, ASM International, Materials Park, OH (1993).
- Han, L., Thornton, M., Boomer, D. and Shergold, M. "A correlation study of mechanical strength of resistance spot welding of AA5754 aluminium alloy", *J. Materials Processing Technology*, **211**, pp. 513-521 (2011).
- Walton, H.W. *Deflection Methods to Estimate Residual Stress*, In ASM Handbook Residual Stress and Deformation of Steel, G. Totten, M. Hawes and T. Inoue, Ed., pp. 99-118, ASM International, Materials Park, OH (2002).
- Aanastassiou, M., Babbit, M. and Lebrun, J.U. "Residual stresses and microstructure distribution in spot-welded steel sheets: Relation with fatigue behaviour", *Materials Science and Engineering A*, **125**, pp. 141-156 (1990).
- Sun, X. and Dong, P. "Analysis of aluminium resistance spot welding processes using coupled finite element procedure", *J. Welding*, **79**, pp. 215-221 (2000).
- Long, X. and Khanna, S.K. "Residual stresses in spot welded new generation aluminium alloys part B-finite element simulation of residual stresses in a spot welded in 5754 aluminium alloy", *J. Science and Technology of Welding and Joining*, **10**(1), pp. 88-94 (2005).
- Ranfeng, Q., Chihiro, I. and Shinobu, S. "Interfacial microstructure and strength of steel/aluminum alloy joints welded by resistance spot welding with cover plate", *J. Materials Processing Technology*, **209**, pp. 4186-4193 (2009).
- Pereira, A.M., Ferreira, J.M., Loureiro, A., Costa, J.D.M. and Brtollo, P.J. "Effect of process parameters on the strength of resistance spot welds in 6082-T6 aluminium alloy", *J. Materials and Design*, **31**, pp. 2454-2463 (2010).
- Florea, R.S., Hubbard, C.R., Solanki, K.N., Bammann, D.J., Whittington, W.R. and Marin, E.B. "Quantifying residual stresses in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy sheets via neutron diffraction measurements", *J. Materials Processing Technology*, **212**, pp. 2358-2370 (2012).
- Florea, R.S., Bammann, D.J., Yeldell, A., Solanki, K.N. and Hammi, Y. "Welding parameters influence on fatigue life and microstructure in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy", *J. Materials and Design*, **45**, pp. 456-465 (2013).
- Afshari, D., Sedighi, M., Barsoum, Z. and Peng, R.L. "An approach in prediction of failure in resistance spot welded aluminum 6061-T6 under quasi-static tensile test", *Proc IMechE Part B: J. Engineering Manufacture*, **226**(6), pp. 1026-1032 (2012).
- Afshari, D., Sedighi, M., Karimi, M.R. and Barsoum, Z. "On residual stresses in resistance spot welded aluminum alloy 6061-T6: Experimental and numerical analysis", *J. Materials Engineering and Performance*, **22**(12), pp.3612-3619 (2013).
- American Welding Society, *Recommended Practices for Resistance Welding*, AWS C1.1M/C1.1:2000, Miami, FL (2003).
- Chao, Y. and Qi, X. "Thermal and thermo-mechanical modeling of friction stir welding of aluminium alloy 6061-T6", *J. Materials Processing Technology*, **7**, pp. 215-233 (1998).
- Hirsch, J., Skrotzkiand, B. and Gottstein, G., *Aluminum Alloys: Their Physical and Mechanical Properties*, Weinheim Wiley-veh (2008).
- Rohsenow, W.M., Hartnettand, J.R. and Cho, Y.I., *Handbook of Heat Transfer*, 3rd ed., McGraw-hill, New York (1998).
- Tsai, C.L., Dia, W.L., Dickinson, D.W. and Papritan, J.C. "Analysis and development of real-time control methodology in resistance spot welding", *J. Weld.*, **69**, pp. 339-351 (1991).
- Sedighi, M. and Nazemnezhad, R. "Analysis of the effect of diffraction peak positioning method on residual stress measurement, using the standard XRD technique", *J. Aerospace Mechanics*, **7**(2), pp. 73-88 (1390), In Persian.
- Hongxin, S., Ranfeng, Q., Jinhong, Z., Keke, Z., Hua, Y. and Gaojian, D. "Effects of welding parameters on the characteristics of magnesium alloy joint welded by resistance spot welding with cover plates", *J. Materials and Design*, **31**, pp. 4853-4857 (2010).