

شبیه‌سازی المان محدود جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی و تاثیر پارامترهای موثر بر آن در آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم

عباس هنربخش رئوف^{۱*} و احسان غریبشاهیان^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی (FSW)، آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم، آنالیز المان محدود، پارامترهای فرایند.</p>	<p>فرایند جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی (FSW) یک فرایند جوش کاری در حالت جامد می‌باشد که در آن حرارت به‌وسیله اصطکاک ایجاد شده، بین ابزار جوش کاری و قطعه کار ایجاد می‌شود. مقدار حرارت ایجاد شده به‌طور مستقیم بر ساختار متالورژیکی، کیفیت جوش، تنش باقیمانده و اعوجاج ناشی از حرارت در قطعه، اثرگذار است. موفقیت این فرایند جوش کاری در گرو کنترل مناسب دمای حداکثر در طول فرایند جوش کاری می‌باشد. امروزه حل عددی این فرایند می‌تواند کمکی باشد برای پیش‌بینی، فهم فرایند، آنالیز ریز ساختار، تنش باقیمانده و همچنین کنترل فرایند، به‌ویژه فرایند رباتیک FSW که پیش‌بینی دما بسیار پراهمیت و سودمند است. هدف از این پژوهش، مطالعه و پیش‌بینی میزان حرارت لحظه‌ای ایجاد شده در یک صفحه آلومینیوم آلیاژی جوش‌شده به روش FSW می‌باشد. به این منظور یک مدل سه‌بعدی به روش اجزا محدود با استفاده از نرم‌افزار LS-Dyna بسط داده شد و چرخه‌های حرارتی که در طول جوش کاری بر روی آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم ایجاد شد، به‌دست آمد. پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش شامل پارامترهای فرایند مانند سرعت خطی حرکت و سرعت چرخش پین بوده است. در نهایت نتایج حاصل از حل عددی با نتایج عملی مقایسه و تصدیق گردید.</p>

۱- مقدمه

جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی یک تکنیک نسبتاً جدید و مناسب برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم، مس، منیزیم و مواد فلزی با نقطه ذوب پایین می‌باشد. در مقایسه با دیگر روش‌های جوش کاری، جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی ارائه دهنده مزایایی نظیر کاهش تنش باقیمانده در فلز جوش و استحکام بالای جوش به‌واسطه اتصال در حالت جامد می‌باشد. اخیراً تحقیقات و پیشرفت‌هایی برای استفاده از

پتانسیل بالقوه این فرایند برای مواد سخت‌تری همچون تیتانیوم و فولاد نیز در جریان است [۱]. یکی از عناصر کلیدی در فرایند جوش اغتشاشی اصطکاکی حرارت ایجاد شده مابین ابزار جوش کاری و قطعه کار می‌باشد که نیروی محرکه پیشبرد این فرایند است. جریان حرارت تولید شده در قطعه کار می‌بایست به‌میزان کافی بالا باشد تا مواد به اندازه کافی برای ایجاد اتصال و پیوند مناسب نرم شوند، از طرفی می‌بایست به حد کافی پایین باشد تا سبب ذوب فلز نشود. بیشینه حرارت ایجاد شده به‌وسیله این فرایند گستره‌ای است مابین ۸۰ تا ۹۰ درصد دمای ذوب فلز جوش که توسط Chiumenti و

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ahonarbaksh@semnan.ac.ir

۱. دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان.

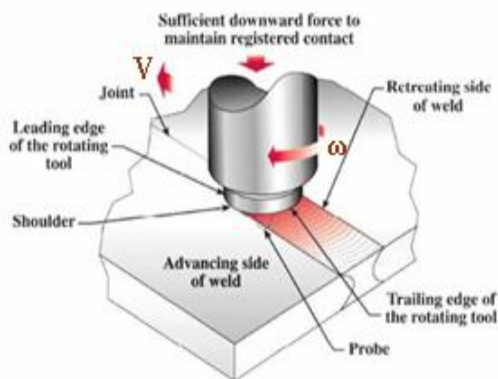
۲. کارشناس ارشد مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان.

همکارانش [۲] همچون Buffa و همکارانش [۳] اندازه‌گیری شده است تا از نقایص جوش کاری و اعوجاج زیاد که در فرایندهای جوش ذوبی معمول است، اجتناب یا در کمترین حد ممکن باشد. جریان حرارت در فرایند جوش اغتشاشی اصطکاکی اصولاً به‌وسیله اصطکاک و فرایند تغییرشکل ایجاد می‌شود. این حرارت در هر دو قطعه‌کار و ابزار جوش کاری ایجاد می‌شود. حرارت ایجاد شده در قطعه‌کار سبب موفقیت فرایند در کیفیت، شکل ریزساختار و کاهش تنش باقیمانده و اعوجاج در قطعه‌کار می‌شود. در مقابل حرارت ایجاد شده در ابزار بر عمر و ظرفیت آن در فرایند اتصال اثرگذار است. برای مثال عدم حرارت کافی ناشی از اصطکاک منجر به شکست پین می‌شود چرا که ماده به اندازه کافی گرم نشده است. بنابراین فهم وضع انتقال حرارت در فرایند جوش اغتشاشی اصطکاکی فوق‌العاده مهم است. گسترش و پیشرفت فرایند جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی از سال ۱۹۹۱ شامل بررسی‌های عملی و آزمایشگاهی متفاوتی می‌باشد. تعدادی از مراکز دانشگاهی و صنعتی تلاش کردند که حل عددی فرایند جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی را گسترش دهند. بسیاری از پژوهش‌ها که در سال‌های اخیر در مقالات زیادی چاپ شده درباره مطالعه بر پارامترهای متعدد مربوط به منحنی‌های حرارت در فرایند جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی می‌باشد. در سال‌های گذشته روش‌های مختلف مدل‌سازی عددی برای این فرایند بیان گردیده است. این روش‌ها برای مدل کردن جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی یک پیش‌بینی عددی را به‌دست می‌آورد و سپس مقایسه و تصدیق نتایج به‌وسیله اندازه‌گیری دما در نمونه عملی در قطعه به‌وسیله ترموکوپل‌ها صورت می‌پذیرد. کرنش‌های زیاد و نرخ کرنش بالا سبب می‌شود که مشاهده جزئیات فرایند سخت شود که این سبب تمایل روز افزون مدل‌سازی فرایند با استفاده از حل عددی و نرم‌افزارها برای درک صحیح موضوع شده است. البته در این روش‌ها نشان دادن جزئیات مخلوط شدن و جریان مواد به‌طور مستقیم ممکن نیست.

Ji و همکارانش [۴] اثر هندسه شولدر و پین بر رفتار جریان پلاستیک مدل خود را بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی عددی آن‌ها نشان داد که سرعت جریان مواد با افزایش فاصله از سطح جوش با محور چرخشی پین کاهش می‌یابد. آن‌ها در محاسباتشان از نرم‌افزار ANSYS و FLUENT استفاده کردند. Heurtier و همکارانش [۵] از یک مدل آنالیز برای پیش‌بینی دمای قطعه‌کار استفاده کردند که در مرحله بعدی برای افزایش دقت در پیش‌بینی تبدیل به آنالیز عددی کردند. یکی از اولین مطالعات عددی جوش اصطکاکی به‌وسیله Qi و Chao [۶] انجام شد. آن‌ها در مطالعاتشان در زمینه دما در طول جوش کاری و توزیع تنش باقیمانده و میزان اعوجاج در قطعه‌کار بعد از جوش اصطکاکی را بررسی کردند. یک مدل مجزا برای انتقال حرارت و عملیات ترمومکانیکال و آنالیز سه‌بعدی از آنالیز اجزا محدود در مطالعات آن‌ها استفاده شد. همچنین یک منبع متحرک حرارت با شبیه‌سازی توزیع حرارت برای حرارت ایجاد شده ناشی از اصطکاک بین پین و قطعه‌کار برای حرارت ورودی بررسی شده بود. Zhu و Chao [۷] در بررسی و مطالعاتشان تاثیر حرارت و وابستگی خواص مواد بر ناپایداری حرارت، تنش باقیمانده و اعوجاج در شبیه‌سازی به روش اجزا محدود در فرایند جوش اغتشاشی اصطکاکی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در روش آنالیزشان پیشنهاد کردند استفاده از یک روش بر اساس ویژگی‌های خواص به‌وسیله یک تابع خطی برای دمای نقطه تسلیم و دمای اتاق بود و بقیه مقادیر را ثابت در نظر گرفتند.

Song و همکارانشان [۸] یک مدل سه‌بعدی لحظه‌ای را برای جوش اغتشاشی اصطکاکی لب‌به‌لب را بسط و تکامل دادند. همچنین انتقال حرارت ناپایدار در پین نفوذ کننده در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است. در این بررسی از روش دیفرانسیل‌گیری صریح برای حل معادلات در فرایند استفاده شده است. Ahmed و همکارانش [۹] در تحقیقاتشان یک مطالعه عددی و عملی برای جوش کاری اصطکاکی با سرعت بالا برای جوش لب‌به‌لب انجام دادند. مدل استفاده شده برای مطالعه

می‌باشد. ابزار جوش‌کاری از جنس فولاد و شامل یک شولدر و پین می‌باشد. قطر شولدر ۲۵ میلی‌متر و قطر پین ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. صفحات جوش‌شده از جنس آلومینیوم با آلیاژ 6061-T6 و ابعاد آن ۸×۵۰×۳۰۵ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱- نمایش شماتیک فرایند جوش اغتشاشی اصطکاکی

دمای وابسته به خواص آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم برگرفته از کتاب راهنمای فلزات می‌باشد [۱۱] که در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- خواص حرارتی آلیاژ 6061-T6 [۱۰]

دما °C	-۱۷/۸	۳۷/۸	۱۴۸/۹	۲۰۴/۴	۲۶۰	۳۷۱/۱	۴۲۶/۷
گرمای ویژه J/Kg °C	۹۰۴	۹۴۵	۱۰۰۴	۱۰۲۸	۱۰۵۲	۱۱۰۴	۱۱۳۳
هدایت حرارتی W/m°C	۱۶۲	۱۶۲	۱۸۴	۱۹۲	۲۰۱	۲۱۷	۲۲۳

۲-۲- شرایط مرزی

برای مدل این طور فرض شده است که اتلاف حرارتی در کل سطح آزاد قطعه‌کار و همچنین از زیر سطح قطعه‌کار رخ می‌دهد. همچنین یک اتلاف حرارت کوچک در ابزار جوش‌کاری و همچنین اتلاف حرارت به‌صورت تشعشع وجود دارد (کمتر از ۰/۳ درصد Khandkar و همکارانش [۱۲]). بنابراین از اتلاف حرارت ناشی از تشعشع می‌توان چشم‌پوشی کرد. شرایط مرزی هدایتی برای این فرایند برای سطح آزاد قطعه‌کار یعنی سطح بالا و اطراف لبه‌ها به‌صورت معادله زیر تعریف می‌شود [۱۳].

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{free-surface}} = h_{\infty} (T - T_{\infty}) \quad (1)$$

عددی یک مدل برای منبع حرارت متحرک در امتداد طول اتصال لب‌به‌لب بود. برای مدل کردن حرارتی سه منبع حرارتی در نظر گرفته شد؛ حرارت به‌وجود آمده از سطح اصطکاک قطعه‌کار و شولدر، حرارت ناشی از اصطکاک پین و تغییر فرم پلاستیک فلز جوش شده. حرارت ایجاد شده وابستگی زیادی به نیرو و سرعت حرکت ابزار جوش‌کاری دارد.

Khandkar و همکارانشان [۱۰] یک گشتاور ورودی بر اساس مدلی برای جوش اصطکاکی آلومینیوم 6061-T6 ارائه دادند. موضوع تحقیق آن‌ها پیش‌بینی توزیع دمایی در طول جوش لب‌به‌لب به روش جوش اغتشاشی اصطکاکی بود. در مطالعات آن‌ها منبع حرارت متحرک به‌وسیله ابزار جوش‌کاری چرخشی و شولدر و پین با حرکت خطی ایجاد حرارت می‌کرد که با اطلاعات به‌دست آمده از گشتاور واقعی هم‌خوانی داشت.

روش استفاده شده در این پژوهش برای پیش‌بینی توزیع حرارت در طول جوش‌کاری براساس نقاط مهم برگرفته از مقالات گذشته که قبل از این بیان گردید در یک مدل سه‌بعدی می‌باشد. روش شبیه‌سازی ارائه شده را می‌توان با داده‌های عملی از مقالات مقایسه کرد. در این پژوهش برای شبیه‌سازی فرایند و پارامترها از نرم‌افزار LS-Dyna استفاده شد. به‌دلیل تاثیر مستقیم سرعت خطی و سرعت چرخشی در حرارت ایجاد شده، سرعت حرکت ابزار جوش‌کاری و سرعت چرخشی از پارامترهای مطالعه شده برای مشاهده دمای قطعه‌کار در طول فرایند جوش‌کاری می‌باشند.

۲- مدل‌سازی

۱-۲- توضیح مدل

اساس فرایند جوش‌کاری اغتشاشی اصطکاکی در شکل ۱ به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. V سرعت عرضی پیمایش ابزار جوش‌کاری و ω سرعت چرخشی آن

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ahonarbaksh@semnan.ac.ir.
 ۱. دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان.
 ۲. کارشناس ارشد مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان.

گرمای ایجاد شده به‌وسیله تغییر فرم پلاستیک در منطقه اطراف پین مقدار کمی است و مشخص کردن میزان آن کار مشکلی است [۶]. بنابراین در محاسبه از آن صرف‌نظر می‌شود. در نتیجه گرمای ایجاد شده فقط به‌وسیله اصطکاک مابین قطعه کار و ابزار جوش کاری می‌باشد. دمای محاسبه شده براساس معادله فوریه عبارت است از [۱۶]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} k_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} k_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} k_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \quad \text{in } \Omega \quad (3)$$

در این معادله q گرمای ایجاد شده به‌وسیله ابزار جوش کاری در تماس با سطح است. Ω حجم ماده، T دما، k ضریب هدایت حرارتی، ρ چگالی ماده و c ظرفیت گرمایی می‌باشد. اصلی‌ترین منبع گرما همان‌طور که گفته شد اصطکاک مابین قطعه کار و ابزار جوش کاری می‌باشد. باتوجه به این که نرخ ایجاد حرارت از اصطکاک شولدر با شعاع r مشتق می‌شود؛ داریم [۱۶]:

$$dq = 2\pi\omega r^2 \mu(T)P(T)dr \quad (4)$$

ω سرعت چرخش ابزار جوش کاری، $\mu(T)$ ضریب اصطکاک مابین ابزار جوش کاری و ماده و $P(T)$ فشار ابزار جوش کاری بر سطح قطعه کار می‌باشد. نرخ ایجاد حرارت (به‌علت اصطکاک)، کل سطح مشترک تماس خواهد بود؛ پس [۱۶]:

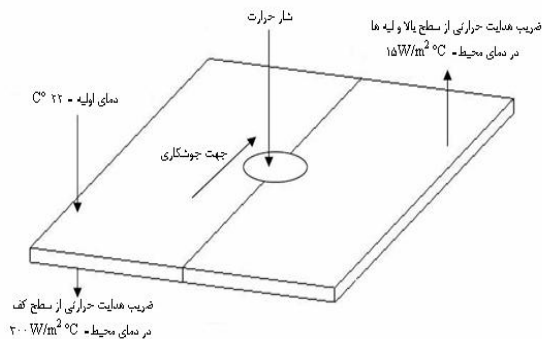
$$q = \int_0^{R_0} 2\pi\omega r^2 \mu(T)P(T)dr \\ = 2/3\pi\omega\mu(T)P(T)(R_0^3 - r_0^3) \quad (5)$$

R_0 و r_0 به ترتیب شعاع خارجی ابزار جوش کاری و پین می‌باشند. نرخ ایجاد حرارت در فصل مشترک بین شولدر و سطح بالایی قطعه کار تابعی از ضریب اصطکاک $\mu(T)$ ، سرعت زاویه‌ای ω و شعاع r می‌باشد. $P(T)$ وابسته به دمای موضعی و میزان شعاع r می‌باشند که ارزیابی آن‌ها در معادله شماره (۴) مشکل می‌باشد. میزان ضریب اصطکاک دینامیک μ یک فاکتور پیچیده و تابعی از پارامترهای مختلفی همچون دما، زبری سطح، سرعت حرکت ابزار و نیروی اعمالی است. بنابراین به‌منظور ارزیابی ضریب اصطکاک یک راهبرد معکوس به کار برده شد. به این صورت که دو حل

n متناسب با جهت، h_∞ ضریب هدایت در محیط، k هدایت حرارتی صفحه و T_∞ دمای محیط می‌باشد. در این مدل مقدار h برای سطح رو و لبه‌های اطراف $15 \text{ W/m}^2\text{C}$ در نظر گرفته شده است [۱۰ و ۱۲]. به‌منظور حساب کردن اتلاف هدایت حرارتی از کف صفحه فرض شده که بیشترین مقدار از اتلاف حرارت مربوط به این قسمت است [۶]. این فاکتور به‌وسیله مدل ساده شده شبه هدایت نیوتون به‌صورت معادله زیر بیان می‌شود [۱۳]:

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\text{bottom}} = h(T - T_\infty) \quad (2)$$

ضریب هدایت حرارتی از سطح زیرین ورق است که در تماس با صفحه پشتی می‌باشد. در این پژوهش مقدار $300 \text{ hW/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ می‌باشد. صفحه پشتی برای نگهداری صفحات آلومینیومی معمولاً فولادی می‌باشد و میزان ضریب هدایت حرارتی این صفحات پشتی در حدود $300 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ می‌باشد، این مقدار در تحقیق سایر پژوهشگران نیز لحاظ شده است [۱۰ و ۱۲]. شکل ۲ نمایش شماتیک است از شرایط مرزی که در مدل برای جوش لب‌به‌لب اعمال شده است.



شکل ۲- نمایش شماتیک از شرایط مرزی اعمالی

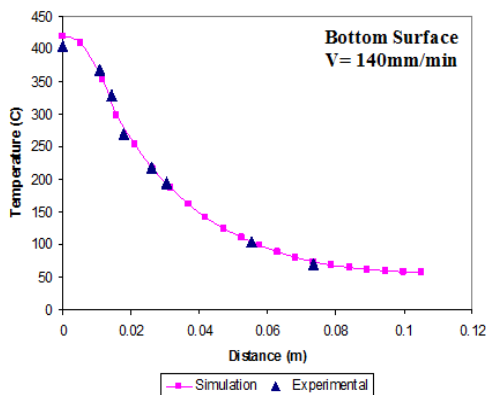
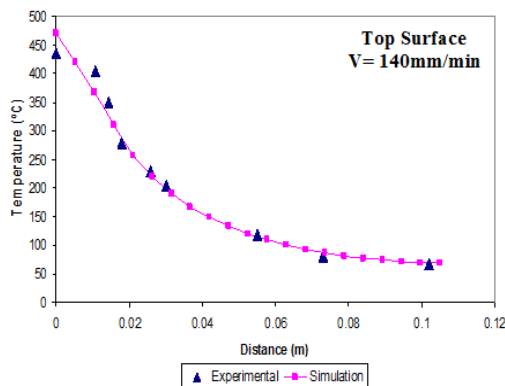
۲-۳- میزان حرارت ورودی

حرارت تولید شده در فرایند جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی به‌واسطه فاکتورهای مهم زیر می‌باشد [۱۴]:

- حرارت اصطکاکی در سطح مشترک شولدر و قطعه کار
- تغییر فرم پلاستیک در فلز جوش در منطقه اطراف پین

جوش کاری نیز از ابزار جوش کاری با قطر شولدر ۲۵ میلی‌متر و قطر پین ۱۰ میلی‌متر استفاده گردیده است. طول پین ۸ میلی‌متر و سرعت چرخش ابزار جوش کاری 390 rpm بوده است. نیروی رو به پایین ابزار جوش کاری نیز $22/4 \text{ kN}$ و سرعت حرکت ابزار جوش کاری 140 mm/min بوده است.

اعداد حاصل از آزمایش عملی با استفاده از ۲۵ عدد ترموکوپل که در نقاط مختلف صفحه قرار داشتند به دست آمده است. شکل ۴ مقایسه‌ای است بین نتایج حاصل از آزمایش عملی با داده‌های عددی که از شبیه‌سازی از سطح بالا و پایین ورق در فاصله ۱۹۰ میلی‌متری از ابتدای قطعه‌کار، عمود بر خط جوش به دست آمده است.



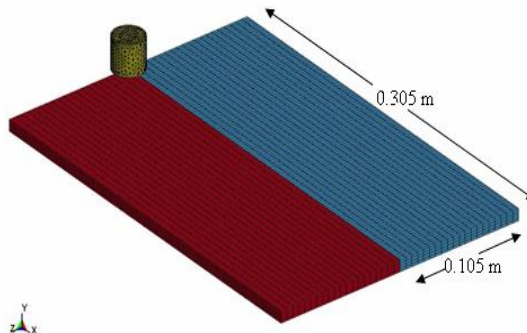
شکل ۴- مقایسه نتایج حاصل از آزمایش عملی و شبیه‌سازی

در جدول ۲ درصد خطای به دست آمده از مطابقت اعداد حاصل از شبیه‌سازی نسبت به اعداد آزمایش عملی، آورده شده است. حداکثر دمای به دست آمده در سطح قطعه در مدل شبیه‌سازی 471°C می‌باشد که 37 درجه با عدد به دست آمده از آزمایش عملی اختلاف دارد. بیشینه دما در لبه ورق در مدل شبیه‌سازی شده 69°C بود که با آزمایش واقعی 3 درجه فاصله دارد. در مجموع یک روند

عددی و شبیه‌سازی با بیشترین میزان ضریب اصطکاک و کمترین ضریب اصطکاک برای محاسبه در نظر گرفته و اجرا شد؛ سپس، به واسطه یک راه‌کار سعی و خطا ضریب اصطکاک مابین $0/3$ تا $0/4$ که باعث ایجاد مطابقت خوبی بین داده‌های آزمایش عملی و حل عددی می‌باشد، استفاده شد. گستره ضریب اصطکاک استفاده شده با نتایج تحقیقات مشابه به وسیله دیگر پژوهشگران هم‌خوانی دارد [۶، ۱۰، ۱۲ و ۱۳]

۲-۴- مدل شبیه‌سازی اجزاء محدود (FEM)

هندسه مدل با استفاده از نرم‌افزار Solid work مدل‌سازی شد. دو صفحه مدل شده که ابعاد هر صفحه برابر با $0.305\text{m} \times 0.105\text{m} \times 0.008\text{m}$ می‌باشد، در شکل ۳ دیده می‌شود.



شکل ۳- مدل هندسی از دو ورق جوش شده

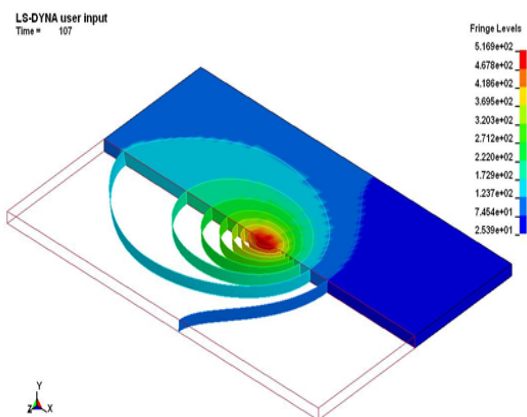
برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار LS-Dyna استفاده شد [۱۵]. هر دو صفحه با المان سه‌بعدی Solid ساخته و با پارامتر یکسان شبکه‌بندی شد. مجموع کل المان‌های هر صفحه 20000 المان می‌باشد.

۳- صحت سنجی

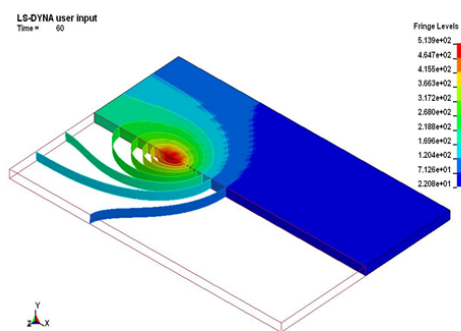
به منظور تصدیق نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی فرایند جوش کاری، نیاز است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با اعداد حاصل از یک آزمایش عملی شبیه به مدل، مطابقت داشته باشند. بنابراین مدل با یک آزمایش عملی که توسط Khandkar [۱۲] انجام شده بود تصدیق شد. مدل عملی برای تصدیق صفحه‌ای با ابعاد $30.5 \times 10.5 \times 8$ میلی‌متر از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ بوده است. برای

۴- نتایج و بحث

در مجموع برای آلیاژ ۶۰۶۱ دو سرعت چرخشی ابزار جوش کاری یعنی ۳۹۰rpm و ۵۰۰ rpm در نظر گرفته و شبیه‌سازی شد. همچنین در سرعت ۳۹۰rpm در پنج سرعت حرکت خطی پین، یعنی ۹۰، ۱۱۵، ۱۴۰، ۱۷۰ و ۲۰۰ تعیین و برای سرعت ۵۰۰rpm سه سرعت حرکت ۱۴۰، ۱۷۰ و ۲۰۰ انتخاب شد. لازم به ذکر است که سرعت خطی ابزار طوری تعیین شد که دمای قطعه‌کار زیر دمای انجماد بماند که این از شرایط لازم برای یک فرایند خوب جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی می‌باشد. شکل ۵ منحنی‌های دمایی به ترتیب از ۶۰ و ۱۰۷ ثانیه فرایند جوش کاری با سرعت خطی ۹۰mm/min با سرعت چرخشی ۳۹۰rpm را نمایش می‌دهد.



الف)



ب)

شکل ۵- توزیع دمایی به ترتیب از ۶۰ و ۱۰۷ ثانیه فرایند جوش کاری با سرعت خطی ۹۰mm/min با سرعت چرخشی ۳۹۰rpm

شبیه به هم در حل عددی و آزمایش مشاهده می‌شود که نشان دهنده مطابقت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج واقعی است. البته اختلاف کوچکی نیز در نتایج حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی در فاصله ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متری از خط جوش دیده می‌شود که مابین ۱۰ تا ۲۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. این مسئله را می‌توان به خطای عملکردی ترموکوپل نسبت داد.

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی و درصد خطا در فاصله ۱۹۰mm از لبه ورق عمود بر خط جوش

الف) دمای روی سطح قطعه

نتایج	مرکز جوش	۱۵mm	۱۸mm	۲۶mm	۳۰mm	۵۵mm	۷۳mm
تست واقعی	۴۳۴	۳۴۸	۲۷۹	۲۲۹	۲۰۳	۱۱۸	۷۹
شبیه سازی	۴۷۱	۳۳۶	۲۸۲	۲۲۲	۱۹۷	۱۱۳	۷۴
درصد خطا	٪۸/۲	٪۲/۴	٪۱	٪۳	٪۲/۹	٪۴/۲	٪۶/۳

ب) دمای زیر سطح قطعه کار

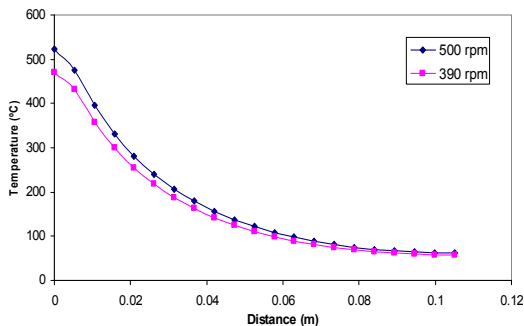
نتایج	مرکز جوش	۱۵mm	۱۸mm	۲۶mm	۳۰mm	۵۵mm	۷۳mm
تست واقعی	۴۰۶	۳۲۹	۲۶۹	۲۱۹	۱۹۴	۱۰۴	۷۰
شبیه سازی	۴۳۰	۳۱۹	۲۷۵	۲۱۶	۱۹۳	۱۰۳	۷۳
درصد خطا	٪۵/۹	٪۳	٪۲/۲	٪۱/۳	٪۰/۵	٪۰/۹	٪۴/۲

نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاکی از این موضوع است که توزیع دما در سطح رو و زیر قطعه‌کار مطابقت خوبی با شرایط عملی دارد. تصدیق این مدل با جوش لب‌به‌لب برای آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم برای بررسی پارامترهای بعدی نیز استفاده شد، که شامل تغییر در سرعت حرکت ابزار جوش کاری و همچنین سرعت چرخش پین در کنار ثابت نگه داشتن نیروی رو به پایین ابزار کار، ضریب اصطکاک، ابعاد ابزار جوش کاری و ابعاد قطعه کار می‌باشد. جدول ۳ خلاصه‌ای از پارامترهای ثابت و متغیر استفاده شده در مدل شبیه‌سازی می‌باشد.

جدول ۳- پارامترهای مورد مطالعه در فرایند جوش کاری

۰/۳۰۵×۱/۰۲×۱۰۰۸	ابعاد نمونه (m)
۰/۰۲۵	قطر پین (m)
۰/۰۱	قطر شولدر (m)
۰/۰۰۸	طول پین (m)
۲۰۰ - ۱۷۰ - ۱۴۰ - ۱۱۵ - ۹۰	سرعت حرکت (mm/min)
۵۰۰ - ۳۹۰	سرعت چرخش (rpm)
۲۲/۴	نیروی اعمالی (KN)
۳۰۰	ضریب هدایت حرارتی از کف قطعه کار (W/m ² °C)
۲۲	دمای محیط و دمای اولیه (°C)

شکل ۸ تاثیر تغییر سرعت چرخش از ۳۹۰ rpm به ۵۰۰ rpm را برای سرعت حرکت ثابت ۱۴۰ mm/min نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود افزایش سرعت چرخش نیز سبب افزایش بیشینه دمایی می‌شود به‌نحوی که بیشینه دما از ۴۷۰ °C به ۵۲۰ °C می‌رسد.



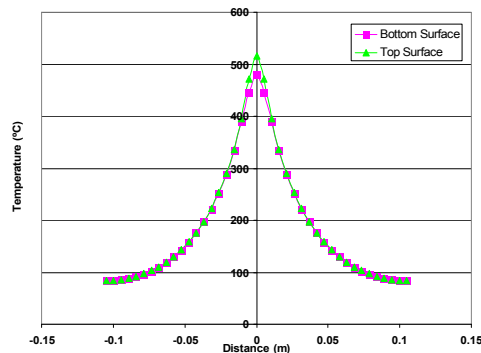
شکل ۸- تغییرات دمایی بر روی سطح قطعه‌کار را با تغییر سرعت چرخش ابزار جوش کاری با سرعت خطی ۱۴۰ mm/min

کیفیت خوب جوش در بازه دمایی بین ۴۵۰ °C تا ۵۰۰ °C به‌دست می‌آید [۱۳] که می‌توان با دامنه سرعت بین ۱۱۵ mm/min تا ۱۷۰ mm/min با سرعت چرخش ۳۹۰ rpm و یا سرعت ۱۷۰ mm/min تا ۲۰۰ mm/min با سرعت چرخش ۵۰۰ rpm ایجاد کرد. دمای بیشینه از این لحاظ اهمیت دارد که فاکتور مهمی است برای مشخص شدن خواص مکانیکی که حاصل از ایجاد ساختار منطقه جوش است. جدول ۴ حاوی مقادیر حداکثر دما به‌دست آمده حاصل از حل عددی برای سطح بالا و پایین قطعه‌کار در شرایط مختلف می‌باشد.

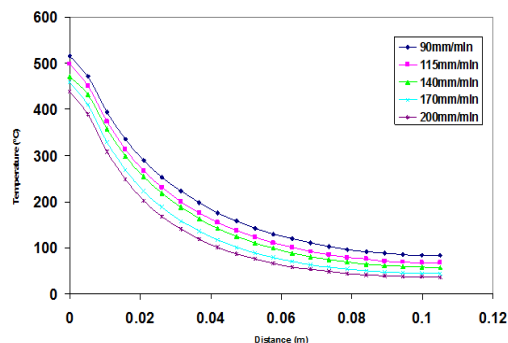
جدول ۴- دمای بیشینه حاصل از شبیه‌سازی فرایند جوش اغتشاشی اصطکاکی آلیاژ ۶۰۶۱

ماده	سرعت چرخش (rpm)	سرعت حرکت (mm/min)	دمای ماکزیمم سطح بالا قطعه کار (°C)	دمای ماکزیمم سطح زیر قطعه کار (°C)
آلیاژ ۶۰۶۱	۳۹۰	۹۰	۵۱۶	۴۷۳
		۱۱۵	۴۹۹	۴۵۴
		۱۴۰	۴۷۱	۴۳۰
		۱۷۰	۴۵۸	۴۱۴
		۲۰۰	۴۳۸	۳۹۶
آلیاژ ۶۰۶۱	۵۰۰	۱۴۰	۵۲۵	۴۷۹
		۱۷۰	۵۰۸	۴۶۰
		۲۰۰	۴۸۷	۴۴۰

شکل ۶ پروفیل حرارت لحظه‌ای را برای سرعت خطی ۹۰ mm/min را در فاصله ۱۹۰ mm از نقطه شروع جوش کاری عمود بر خط جوش نشان می‌دهد. همچنین شکل ۷ تغییرات دمایی بر روی سطح قطعه‌کار را با تغییر سرعت خطی ابزار جوش کاری نشان می‌دهد.



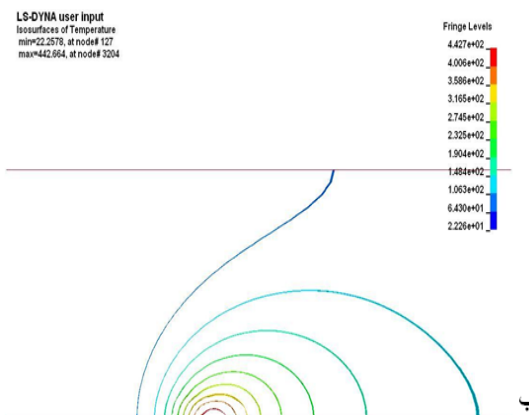
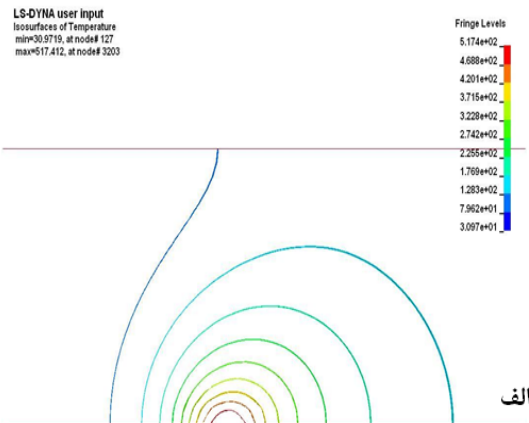
شکل ۶- پروفیل حرارت لحظه‌ای عمود بر خط جوش با سرعت خطی حرکت ۹۰ mm/min



شکل ۷- تغییرات دمایی بر روی سطح قطعه‌کار را با تغییر سرعت خطی ابزار جوش کاری

توزیع دمایی در شکل ۶ نشان می‌دهد که منحنی‌های حرارت شبیه به حالت واقعی فرایند جوش اغتشاشی اصطکاکی است. به‌طور مشابه منحنی حرارت در شکل ۷ نشان دهنده تاثیر حرارت در مسیر ابزار جوش کاری است. یک رابطه خطی بین سرعت حرکت ابزار و بیشینه دمایی وجود دارد.

همان‌طور که شکل ۷ نشان می‌دهد، حداکثر دما به‌دست آمده بین ۴۴۰ °C و ۵۱۶ °C برای سرعت حرکت ۹۰ mm/min تا ۲۰۰ mm/min و سرعت چرخش ثابت ۳۹۰ rpm تغییر می‌کند. مطابق انتظار کاهش سرعت حرکت همراه است با افزایش بیشینه دمایی که نشان دهنده فرصت بیشتر برای گرم شدن موضعی قطعه‌کار می‌باشد. همچنین کمینه دمایی بین ۳۷ °C تا ۸۳ °C در لبه‌های ورق عمود بر خط جوش به‌دست آمده است.



شکل ۹- تغییرات منحنی‌های دمای و منطقه (HAZ). الف- ۹۰ mm/min ب- ۲۰۰ mm/min ، سرعت چرخش ۳۹۰ rpm

۵- نتیجه گیری

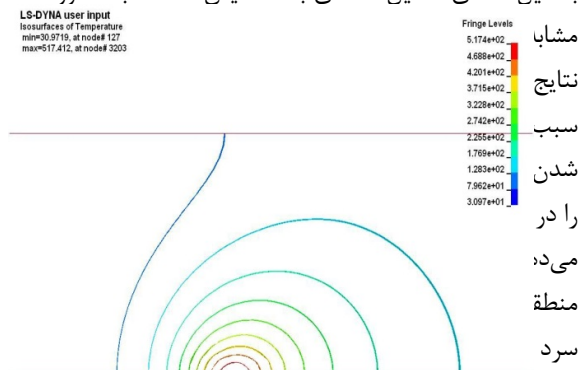
در این پژوهش سوابق حرارتی و توزیع دما در یک صفحه از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ که به صورت لب‌به‌لب جوش شده است به وسیله شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت و با یک آزمایش واقعی مورد مطابقت قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که:

- کاهش سرعت حرکت خطی ابزار جوش کاری دمای بیشینه را در مرکز جوش افزایش می‌دهد.
- تاثیر سرعت چرخشی ابزار جوش کاری نیز بررسی شد که افزایش سرعت چرخشی نیز سبب افزایش دمای بیشینه در مرکز جوش می‌شود.
- در تغییر هر دو پارامتر سرعت حرکت و سرعت چرخش یک اختلاف ثابت در دمای بالا و پایین قطعه کار دیده می‌شود.

تفاوت دما بین سطح بالا و پایین قطعه کار در خط جوش حدود ۴۰°C می‌باشد. مدت زمان ماندن در دمای بالا یا نرخ سرد شدن در نقاط مشخص در طول جوش کاری فاکتور مهمی برای مطالعه می‌باشد، چرا که اثر خود را بر اعوجاج قطعه بعد از فرایند جوش کاری نیز می‌گذارد.

آنچه از نتایج حاصل شده، نشان دهنده این واقعیت است که کاهش سرعت خطی ابزار جوش کاری و همچنین افزایش سرعت چرخش هر دو سبب افزایش دمای بیشینه خواهند شد. علت افزایش دما در قبال کاهش سرعت خطی را می‌توان این گونه توجیه کرد که با کاهش سرعت حرکت، زمان ماندگاری ابزار جوش کاری بر روی سطح قطعه کار بیشتر است و این مساله سبب افزایش بیشتر حرارت ایجاد شده در اثر افزایش زمان تماس شولدر و پین با قطعه کار می‌شود، به نحوی که کاهش سرعت از ۲۰۰ mm/min به ۹۰ mm/min سبب افزایش ۱۵ درصدی حرارت در خط جوش می‌شود.

در مورد افزایش حرارت در اثر افزایش سرعت چرخش ابزار این طور می‌توان گفت که باتوجه به معادله (۵) افزایش سرعت چرخش رابطه مستقیم با افزایش حرارت ورودی (Q) دارد و به طور طبیعی افزایش حرارت ورودی سبب افزایش دمای بیشینه می‌شود. افزایش سرعت چرخش از ۳۹۰ rpm به ۵۰۰ rpm در سرعت ثابت ۱۴۰ mm/min سبب افزایش ۱۰/۲ درصد دما در قطعه می‌گردد. این مقدار درصد افزایش همان طور که در جدول ۴ آمده است در حدود ۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. این مساله با توجه به معادله (۵) کاملاً بدیهی است و نمی‌تواند به دلیل خطای تحلیل عددی باشد. این مساله به طور



مشابه نتایج سبب شدن را در می‌ده منطقه سرد ۹۰ mm/min منطقه متاثر از حرارت (HAZ) کاملاً گسترده می‌باشد و منحنی‌های دمای بازی را در پشت سر خود دارد.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله نویسندگان مقاله از دانشگاه سمنان برای در اختیار قرار دادن امکانات در راستای پایان نامه کارشناسی ارشد و شرکت عقاب افشان برای حمایت مالی مراتب تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌دارند.

- افزایش سرعت چرخش و کاهش سرعت حرکت ابزار جوش کاری سبب بزرگ شدن منطقه متأثر از حرارت (HAZ) می‌شود.
- در تغییر هر دو پارامتر سرعت حرکت و سرعت چرخش یک اختلاف ثابتی در دمای بالا و پایین قطعه کار دیده می‌شود.

مراجع

- [1] Dongun, K., Harsha, B., Ji, H.K., Chongmin, K., Kazutaka, O., Wagoner, R.H., Kwansoo, C. (2010). "Numerical simulation of friction stir butt welding process for AA5083-H18 sheets". *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Vol. 29, pp. 204-215.
- [2] Chiumenti, M., Cervera, M., Agelet de Saracibar, C., Dialami, N. (2012). "Numerical modeling of friction stir welding processes". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 254, pp. 353-369.
- [3] Buffa, G., Ducato, A., Fratini, L. (2011). "Numerical procedure for residual stresses prediction in friction stir welding". *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 47, pp. 470-476.
- [4] Ji, S.D., Shi, Q.Y., Zhang, L.G., Zou, A.L., Gao, S.S., Zan, L.V. (2012). "Numerical simulation of material flow behavior of friction stir welding influenced by rotational tool geometry". *Computational Materials Science*, Vol. 63, pp. 218-226.
- [5] Heurtier, P., Desrayaud, C., Montheillet, F. (2002). "A thermomechanical analysis of the friction stir welding process". *Materials Science Forum*. Vol. 396, pp 1537-1542.
- [6] Chao, Y.J., Qi, X. (1998). "Thermal and thermo-mechanical modeling of friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6". *Journal of Materials Processing and Manufacturing Science*, Vol. 7, pp 215-233.
- [7] Zhu, X.K., Chao, Y.J. (2002). "Effects of temperature-dependent material properties on welding simulation". *Computers & Structures*, Vol. 80, pp. 967-976.
- [8] Song, M., Kovacevic, R., Ouyang, J., Valant, M. (2002). "A detailed three-dimensional transient heat transfer model for friction stir welding". *Proceeding of the 6th International Trends in Welding Research Conference*, pp. 212-217.
- [9] Raikoty, H., Ahmed, I., Talia, G.E. (2005). "High speed friction stir welding: A computational and experimental study", *Proceedings of the ASME Summer Heat Transfer Conference 2005*, pp 431-436.
- [10] Khandkar, M.H. (2005). "Thermo-mechanical modeling of friction stir welding". PhD Dissertation, University of South Carolina.
- [11] AAC. (1970). "Handbook of Aluminum". Alcan Aluminum Corporation.
- [12] Khandkar, M.H., Khan, J.A., Reynolds, A.P. (2002). "Input torque based thermal model of friction stir welding of Al-6061". *Trends in welding research, Proceedings of the 6th International Conference*, Callaway Gardens Resort, Phoenix, Arizona, pp. 218-223.
- [13] Khandkar, M.H., Khan, J.A. (2006). "Predicting residual thermal stresses in friction stir welded metals". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 174, pp.195-203.
- [14] Russell, M.J., Sherliff, H.R., Threadgill, P.L. (2001). "Development and application of an analytical process model for friction stir welding". pp. 225-237.
- [15] LS-DYNA, Keyword Manual, www.lstc.com
- [16] Chen, C., Kovacevic, R. (2004). "Thermomechanical modelling and force analysis of friction stir welding by the finite element method". *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 218, pp. 509-519.