



بیست و یکمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک
دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۱۷ تا ۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۲

21st Annual International Conference on Mechanical Engineering
Faculty of Mechanical Engineering K.N.Toosi University of Technology
7-9 May 2013



کواهی ارائه مقاله

بدینوسیله کواهی می شود مقاله
مدلسازی عددی فرآیند تشکیل دکه جوش و بررسی پارامترهای موثر در جوشکاری مقاومتی نقطه ای
ورق های فولادی کالوانیزه
نخارش:

فاطمه میرزائی، فرهاد کلانان، حمید قربانی

در بیست و یکمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک که در تاریخ ۱۷ تا ۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۲ به میزبانی دانشگاه
صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و با همکاری گروه پنا بر گزار گردید ارائه شده است.

دکتر سید علی اکبر موسویان
دبیر کمیته علمی



دکتر علی عطاری
دبیر همایش

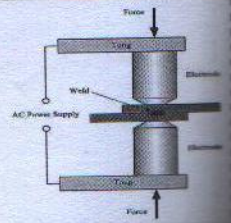


ساخت و تولید - جوشکاری

هیأت رئیسه نشست: دکتر ایرج ستاری فر، دکتر فرهاد کلاهان، دکتر مجید قریشی

مدلسازی عددی فرآیند تشکیل دکمه جوش و بررسی پارامترهای موثر در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های فولادی گالوانیزه
فاطمه میرزائی^۱، فرهاد کلاهان^۱، حمید قربانی^۱
^۱ دانشگاه فردوسی مشهد

کد مقاله: ۱۲۵۵
زمان: ۱۶:۱۰ - ۱۶:۳۰
سالن: ۳۱۰



- مدلسازی و تحلیل هندسه دکمه جوش با استفاده از روش المان محدود
- بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری از جمله شدت جریان، زمان عبور جریان و نیروی اعمالی بر هندسه دکمه جوش

تحلیل تنش در اتصال جوشی رینگ تقویتی داخلی به مخزن تحت فشار استوانه‌ای
امیر راستی^۱، ایرج ستاری فر^۱، منوچهر صالحی^۱، حسام الدین مشیدی^۱
^۱ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

کد مقاله: ۱۱۲۵
زمان: ۱۶:۳۰ - ۱۶:۵۰
سالن: ۳۱۰



- توسعه مدل المان محدود برای جوش محیطی رینگ تقویتی در مخزن استوانه‌ای توسط نرم افزار ANSYS
- بررسی اثر تنش پسماند جوشکاری در یک هندسه خاص رینگ T شکل در مخزن استوانه‌ای آلومینیومی سری ۵۰۰۰

پیش بینی حداکثر نفوذ جوش در فرآیند جوشکاری زیرپودری با استفاده از نانو ذرات اکسید زیرکونیوم
سید عباس حسینی^۱، مسعود آقاخانی^۲، لاله رجی^۱
^۱ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات کرمانشاه، کرمانشاه، ایران، ^۲ دانشگاه رازی کرمانشاه

کد مقاله: ۱۰۳۸
زمان: ۱۶:۵۰ - ۱۷:۱۰
سالن: ۳۱۰



- بررسی پارامترهای موثر در بهینه سازی نفوذ جوش در فرآیند جوشکاری زیرپودری
- استفاده مستقیم از نانو ذرات در تکنولوژی جوشکاری
- بررسی اثر استفاده از نانو ذرات در پارامترهای خروجی قابل اندازه گیری نظیر نفوذ جوش
- مدلسازی فرآیند جوشکاری زیر پودری

بررسی انتقال حرارت در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به روش تجربی و عددی
مالک مرادی جزا^۱، حسن بصیرت تیریزی^۱، ایرج ستاری فر^۱
^۱ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

کد مقاله: ۴۴۸
زمان: ۱۷:۱۰ - ۱۷:۳۰
سالن: ۳۱۰

- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، انتقال حرارت، آلومینیوم

ISME2013-1255

مدلسازی عددی فرآیند تشکیل دکمه جوش و بررسی پارامترهای موثر در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های فولادی گالوانیزه

فاطمه میرزائی^۱، فرهاد کلاهان^۲، حمید قربانی^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد ساخت و تولید، دانشگاه فردوسی مشهد، f_mirzaei84@yahoo.com

^۲دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، kolahan@um.ac.ir

^۳دانشجوی کارشناسی ارشد ساخت و تولید، دانشگاه فردوسی مشهد، hamidghorbani64@gmail.com

چکیده

یک جفت الکتروود با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند. در مرحله جوشکاری، همزمان با اعمال نیرو یک جریان الکتریکی بالا در مدت زمان خیلی کوتاه از قطعه کار بین الکتروودها عبور می‌کند. به علت مقاومت تماسی بین سطوح تماسی و اثر حرارتی ژول، در قطعه کار دکمه جوش تشکیل می‌شود. نگهداری سومین مرحله از فرآیند جوشکاری است که در آن جریان قطع می‌شود ولی نیرو هنوز برای نگهداری و سرد شدن جوش اعمال می‌شود. در آخرین مرحله جوشکاری الکتروود از قطعه کار جدا می‌شود و دمای قطعه به دمای محیط می‌رسد.

در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای کیفیت و استحکام اتصالات تحت تأثیر پارامترهای فرآیند، شامل شدت جریان، زمان جوشکاری و نیروی اعمالی می‌باشد. بنابراین مطالعه تأثیر پارامترهای تنظیمی بر استحکام اتصالات در جوشکاری نقطه‌ای از اهمیت بسزایی برخوردار است. در اغلب موارد هندسه و ابعاد دکمه جوش که رابطه مستقیم با استحکام اتصال دارد، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این میان شبیه‌سازی عددی به عنوان یک ابزار مفید با هزینه نسبتاً پایین به طور گسترده برای بررسی این فرآیند به کار می‌رود.

فولوارچ^۲ و همکاران [۱] مدلی را با در نظر گرفتن مقاومت‌های تماسی الکتریکی و حرارتی بر مبنای روش المان محدود طراحی کردند و توانستند فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای را شبیه‌سازی نمایند. نتایج شبیه‌سازی ایشان که بر روی شکل دکمه جوش و اندازه منطقه متأثر از حرارت صورت گرفت، مطابقت خوبی را با نتایج عملی

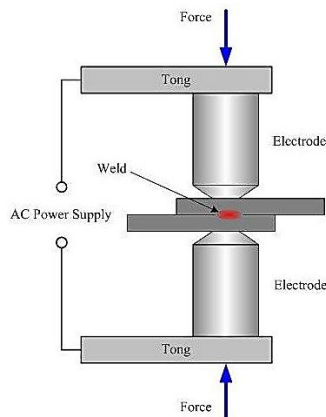
جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای^۱ یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تولیدی است که کاربرد زیادی در صنایع مختلف از قبیل خودروسازی، هواپیمایی و لوازم خانگی دارد. در این نوع جوشکاری، اندازه و شکل دکمه جوش یکی از عوامل بسیار مهم و موثر بر کیفیت و خواص مکانیکی اتصال، همچون استحکام کششی-برشی و استحکام خستگی است. هندسه دکمه جوش خود تحت تأثیر پارامترهای جوشکاری از جمله شدت جریان، زمان عبور جریان و نیروی اعمالی است. در این تحقیق با استفاده از روش المان محدود، تشکیل دکمه جوش در جوشکاری ورق‌های فولادی گالوانیزه IF و BH مورد استفاده در بدنه خودرو، مدلسازی و تحلیل شده است. به منظور شبیه‌سازی فرآیند یک مدل اجزاء محدود کوپل مکانیکی-الکتریکی-حرارتی در محیط نرم‌افزار ANSYS و با استفاده از زبان برنامه نویسی APDL به کار گرفته شده است. جهت افزایش دقت، خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی مواد به صورت غیرخطی و وابسته به دما تعریف شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش جریان و زمان جوشکاری، اندازه دکمه جوش افزایش می‌یابد. در این میان نقش شدت جریان در ابعاد و هندسه دکمه جوش بسیار چشم‌گیرتر بوده است. همچنین با افزایش نیرو، ابعاد دکمه جوش کاهش خواهد یافت. نتایج مدل نرم‌افزاری انطباق مناسبی را با مطالعات تجربی در این زمینه دارد.

واژه‌های کلیدی

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، آنالیز المان محدود، هندسه دکمه جوش، فولاد گالوانیزه

مقدمه

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به‌خاطر هزینه پایین و بهره‌وری بالا در صنایع مختلف از جمله خودروسازی برای اتصال ورق‌های فلزی نازک به طور گسترده به کار می‌رود. شکل ۱ شمای کلی این فرآیند را نشان می‌دهد. این روش جوشکاری شامل چهار مرحله فشردن، جوشکاری، نگهداری و سرد شدن می‌باشد. در مرحله فشردن، ورق‌ها تحت فشار



شکل ۱: فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای



شکل ۲: میکروساختار سطح مقطع عرضی یک نمونه جوشکاری شده

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای با فرکانس ۵۰ Hz جوشکاری گردید. جوشکاری با استفاده از یک الکتروود مسی با قطر ۶ میلی‌متر، نیروی الکتروود ۲۰۰۰ نیوتن و زمان نگهداری ۱۲ سیکل انجام شده است. بعد از جوشکاری، نمونه‌ها برای بررسی متالوگرافی و اندازه‌گیری ابعاد دکمه جوش آماده شده‌اند.

با توجه به آزمایش‌های عملی انجام شده، محدوده مناسب برای جریان جوشکاری ۱۰ تا ۱۲ کیلوآمپر و برای زمان جوشکاری ۸ تا ۱۲ سیکل به دست آمد. شکل ۲ میکروساختار سطح مقطع عرضی یک نمونه جوشکاری شده با جریان جوشکاری ۱۰ کیلوآمپر و زمان جوشکاری ۱۲ سیکل را نشان می‌دهد.

معادلات حاکم

در این مطالعه، به علت متقارن بودن هندسه و بارگذاری ورق‌ها و الکتروود، از یک مدل المان محدود دو بعدی متقارن محوری در محیط ANSYS برای شبیه‌سازی استفاده شده است (شکل ۳). معادلات حاکم برای تحلیل‌های الکتریکی، حرارتی و مکانیکی در سیستم مختصات استوانه‌ای دو بعدی تعریف شده‌اند.

معادله دیفرانسیل حاکم برای توزیع میدان الکتریکی به صورت زیر بیان می‌شود:

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

پارامترهای r و z مختصات شعاعی و محوری، μ رسانایی الکتریکی مواد و ϕ پتانسیل الکتریکی هستند.

معادله حاکم برای محاسبه حرارت تولید شده توسط جریان الکتریکی با استفاده از قانون ژول به صورت زیر می‌باشد:

$$Q = RI^2 t \quad (2)$$

Q حرارت، I جریان الکتریکی، R مقاومت الکتریکی ماده و t زمان عبور جریان است.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی ورق فولادی گالوانیزه IF

C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr
0.003	0.006	0.005	0.018	0.173	0.011	0.031
Mo	V	Cu	Al	Nb	Zn	Ti
0.001	0.002	0.017	0.035	0.001	0.004	0.05

جدول ۲: ترکیب شیمیایی ورق فولادی گالوانیزه BH

C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr
0.002	0.005	0.006	0.018	0.162	0.022	0.021
Mo	V	Cu	Al	Nb	Zn	Ti
0.0006	0.001	0.015	0.044	0.005	0.008	0.005

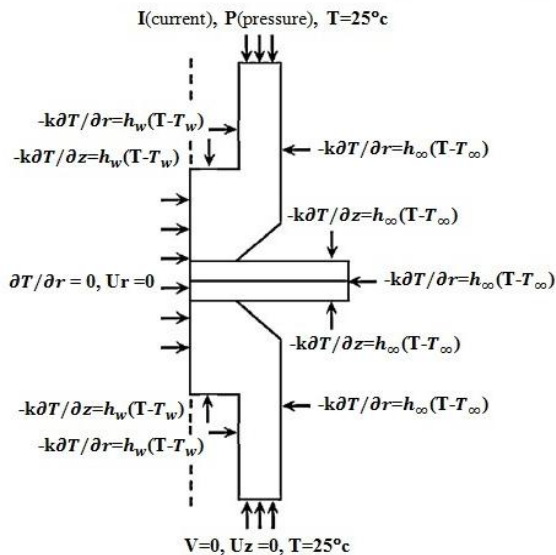
نشان داد. هو^۱ و همکاران [۲] یک مدل کوپل مکانیکی-الکتریکی-حرارتی دو بعدی متقارن را بر مبنای روش اجزاء محدود برای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد معمولی در نرم‌افزار ANSYS ارائه نمودند. هدف از ارائه این تحقیق نشان دادن توزیع تنش و کرنش در فرآیند در طی سیکل‌های مختلف جوشکاری بوده است. ما^۲ و موراکاوا^۳ [۳] فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سه ورق از جنس فولاد استحکام بالا را شبیه‌سازی کردند. آنها اندازه دکمه جوش را برای زمان و جریان‌های جوشکاری مختلف به دست آوردند و نتایج تحلیل را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند که توافق خوبی بین نتایج مشاهده شد. عیسی‌زاده و همکاران [۴] فرآیند تشکیل دکمه جوش را در جوشکاری نقطه‌ای ورق‌های فولادی AISI 1008 با استفاده از مدل المان محدود در نرم‌افزار ANSYS شبیه‌سازی کردند و تأثیر پارامترهای مختلف جوشکاری را بر روی توزیع دمایی سطح تماس ورق‌ها بررسی کردند. شن^۴ و همکاران [۵] فرآیند جوشکاری نقطه‌ای سه ورق فلزی با ضخامت و جنس‌های متفاوت فولاد گالوانیزه SAE1004 و فولاد دو فازی DP600 را با استفاده از یک مدل کوپل مکانیکی-الکتریکی-حرارتی در نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی و شبیه‌سازی کردند. آنها نشان دادند که ترتیب قرار گرفتن ورق‌های فولادی بر اندازه دکمه جوش تشکیل شده موثر می‌باشد.

شکل و اندازه دکمه جوش مهمترین پارامتر در تعیین کیفیت و استحکام اتصالات جوش نقطه‌ای می‌باشد. از این‌رو، در این مقاله پدیده تشکیل دکمه جوش در جوشکاری ورق‌های فولادی گالوانیزه IF^۵ و BH^۶ مدل‌سازی شده و تأثیر پارامترهای فرآیند بر روی هندسه دکمه جوش بررسی شده است. فولاد گالوانیزه IF و BH، به دلیل شکل‌پذیری خوب و خواص مکانیکی مناسب، کاربرد گسترده‌ای در ساخت بدنه خودرو دارد. برای شبیه‌سازی این فرآیند، یک مدل کوپل مکانیکی-الکتریکی-حرارتی با استفاده از روش المان محدود در نرم‌افزار ANSYS ایجاد شده است. در تحلیل‌های انجام شده، تأثیر جریان جوشکاری، زمان جوشکاری و نیرو بر روی هندسه و ابعاد دکمه جوش مورد بررسی قرار گرفته است. با مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشی، مدل المان محدود اعتبارسنجی شده است که مطابقت خوبی را نشان می‌دهد.

آزمایشات تجربی

در این تحقیق، از فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای برای اتصال دو ورق فولادی گالوانیزه IF و BH پرکاربرد در صنایع خودروسازی با ضخامت ۰/۶۷ میلی‌متر استفاده شده است. ترکیب شیمیایی ورق‌های فولادی مورد بررسی در جداول ۱ و ۲ داده شده است. به منظور صحت‌گذاری مدل نرم‌افزاری، تعدادی نمونه با استفاده از یک دستگاه

^۱ Hou
^۲ Ma
^۳ Murakawa
^۴ Shen
^۵ Interstitial Free
^۶ Bake Hardenable



شکل ۴: شرایط مرزی مکانیکی، الکتریکی و حرارتی

مقدار جذر میانگین مربع^۱ جریان به صورت زیر به دست می آید:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin 2\pi f t)^2 d(2\pi f t)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (۶)$$

در رابطه فوق I_{rms} جذر میانگین مربع جریان جوشکاری، I_m ماکزیمم جریان جوشکاری، I مقدار واقعی جریان و f فرکانس است. بنابراین جریان جوشکاری اعمال شده به صورت زیر می باشد:

$$I = I_m \sin(2\pi f t) = \sqrt{2} I_{rms} \sin(2\pi f t) \quad (۷)$$

• شرایط مرزی حرارتی

در سطوح جانبی الکترودها و ورق ها که در تماس با هوای محیط قرار دارند، شرایط مرزی انتقال حرارت همرفتی به صورت زیر است:

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{\infty}(T - T_{\infty}) \quad (۸)$$

در سطوح داخلی الکترودها که در تماس با آب قرار دارند، شرایط مرزی انتقال حرارت در این حالت نیز همرفتی است:

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial n} = h_w(T - T_w) \quad (۹)$$

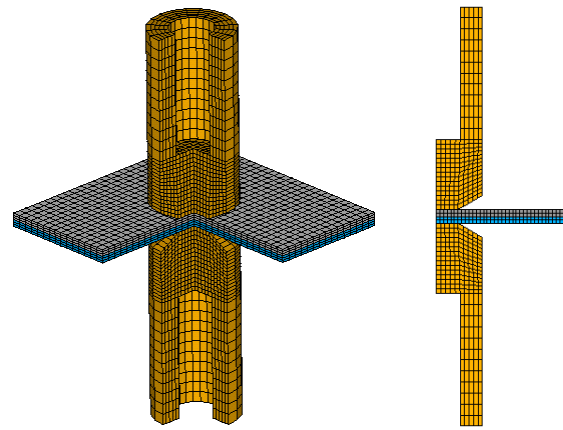
به طوری که q ، h_{∞} ، h_w ، T_{∞} و T_w به ترتیب، حرارت تولیدی بر واحد حجم در سطوح مرزی، ضریب همرفت هوا $21 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ، ضریب همرفت آب $300 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ، دمای هوا 25°C ، دمای آب 25°C و گرادیان در امتداد عمود بر سطح است.

با توجه به اینکه به دلیل تقارن محوری الکترودها و ورق تنها نیمی از هندسه برای مدل سازی در نظر گرفته شده است، در نتیجه انتقال حرارت شعاعی از محور تقارن مرکزی الکترودها و ورق صفر است.

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (۱۰)$$

• شرایط مرزی مکانیکی

در جوشکاری نقطه ای نیروی فشاری بین دو الکترودها باعث تماس دو ورق می گردد. در شبیه سازی نیرو در سطح فوقانی الکترودها بالایی اعمال می شود. نیرو در سیکل فشردن به طور خطی افزایش می یابد و



شکل ۳: مدل المان محدود فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه ای

معادله دیفرانسیل حاکم برای تحلیل انتقال حرارت گذرا با در نظر گرفتن حرارت ناشی از مقاومت الکتریکی به صورت زیر بیان می شود:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \quad (۳)$$

پارامترهای ρ ، c ، k ، T و t به ترتیب چگالی، ظرفیت گرمایی، ضریب هدایت حرارتی مواد، دما و زمان هستند. همچنین \dot{q} نرخ تولید حرارت داخلی بر واحد حجم در داخل مرز نواحی تحلیل می باشد.

برای آنالیز تنش و کرنش، معادله حاکم بر اساس تئوری الاستیک - پلاستیک - حرارتی به صورت زیر می باشد:

$$[d\sigma] = [D^{ep}][d\varepsilon] - [C^{th}] \quad (۴)$$

که

$$[D^{ep}] = [D^e] + [D^p]$$

$[D^{ep}]$ ماتریس سفتی الاستیک - پلاستیک، $[D^e]$ ماتریس سفتی الاستیک، $[D^p]$ ماتریس سفتی پلاستیک، $[d\varepsilon]$ تانسور کرنش، $[d\sigma]$ تانسور تنش، $[C^{th}]$ ماتریس سفتی حرارتی و dT افزایش دما است.

برای تحلیل ساختاری، معادله تعادل تنش به صورت زیر است:

$$\sigma_{ij} + b_i = 0 \quad (۵)$$

در این رابطه b_i نیروی حجمی و σ_{ij} تانسور تنش است.

شرایط مرزی

در تحلیل عددی، به منظور دستیابی به نتایج صحیح باید شرایط مرزی و خواص مواد به درستی تعریف شوند. شرایط مرزی الکتریکی، حرارتی و مکانیکی به کار رفته در مدل اجزاء محدود، در شکل ۴ نشان داده شده است. شرایط مرزی برای حل معادلات حاکم به صورت زیر بیان می شود:

• شرایط مرزی الکتریکی

از آنجایی که در این تحقیق یک دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه ای با جریان متناوب با فرکانس 50 Hz استفاده شده است، در شبیه سازی عددی جریان الکتریکی سینوسی در سطح فوقانی الکترودها بالایی اعمال می شود. پتانسیل الکتریکی سطح تحتانی الکترودها پایینی صفر قرار داده می شود.

^۱ Root Mean Square

در سیکل‌های جوشکاری و نگهداری ثابت نگه داشته می‌شود. جابجایی شعاعی در امتداد محور تقارن مرکزی مدل مقید شده است. جابجایی در سطح تحتانی الکتروود پایینی صفر قرار داده می‌شود.

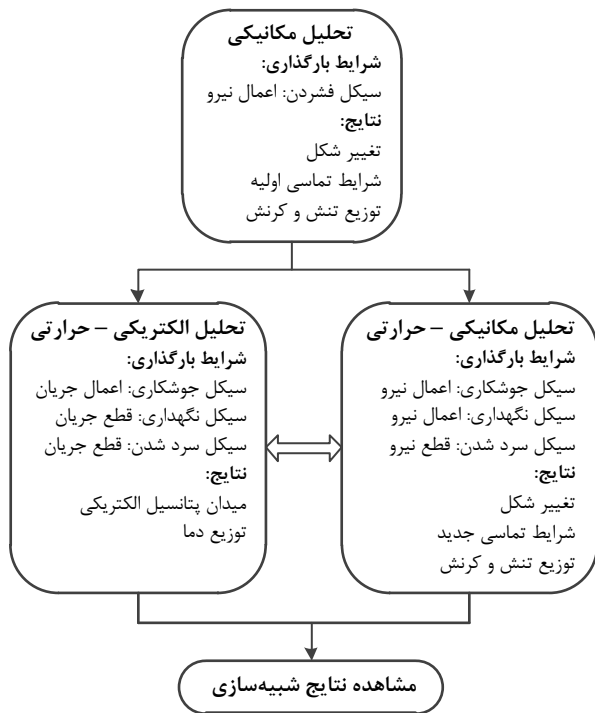
تحلیل عددی

در این مطالعه، فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به عنوان یک مسئله کوپل مکانیکی-الکتریکی-حرارتی با استفاده از روش المان محدود در نرم‌افزار ANSYS تحلیل شده است. برای مدل‌سازی الکتروود و ورق‌های فولادی از المان‌های متقارن محوری استفاده شده است. در تحلیل مکانیکی المان Plane42 و در تحلیل کوپل الکتریکی-حرارتی المان Plane67 به کار می‌رود. برای سطوح تماس ورق-الکتروود و ورق-ورق از المان‌های تماسی Targe169 و Conta171 استفاده می‌شود.

فلوچارت تحلیل فرآیند جوشکاری نقطه‌ای در شکل ۵ نشان داده شده است. سیکل فشردن به عنوان یک مرحله بارگذاری تعریف می‌شود، در حالیکه سیکل جوشکاری در چند مرحله بارگذاری انجام می‌گیرد. شبیه‌سازی فرآیند با تحلیل سیکل فشردن شروع می‌شود، که نیرو به الکتروودها اعمال می‌شود. نتایج تحلیل مکانیکی در مرحله فشردن شامل تنش، جابجایی، تغییر شکل و تغییرات سطح تماسی و فشار تماسی است، که به عنوان ورودی در آنالیز الکتریکی-حرارتی به کار می‌روند. در تحلیل کوپل الکتریکی-حرارتی بعد از اعمال شرایط مرزی الکتریکی و حرارتی به مدل، توزیع دما در اولین مرحله به دست می‌آید و به عنوان بار حرارتی گره‌ای در تحلیل مکانیکی-حرارتی به کار می‌رود. توزیع فشار تماسی، مساحت تماسی و تغییر شکل، نتایج تحلیل مکانیکی-حرارتی هستند که به تحلیل الکتریکی-حرارتی فرستاده می‌شود، تا شرایط تماسی تغییر یابد و حرارت تولید شده توسط اعمال جریان الکتریکی در این مرحله محاسبه شود. این حلقه تا پایان زمان جوشکاری ادامه می‌یابد. کوپل بین دو تحلیل در هر مرحله بارگذاری در مدت زمان ۰/۰۲ ثانیه (یک سیکل) انجام می‌شود. خروجی مدل در نهایت هندسه دکمه جوش است که با توجه به دمای ذوب ورق تعیین می‌شود.

نتایج و بحث

در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای جریان جوشکاری، زمان جوشکاری و نیرو بیشترین تأثیر را بر روی اندازه و هندسه دکمه جوش دارند، از این رو به بررسی تأثیر این پارامترها بر روی توزیع دما و اندازه دکمه جوش پرداخته شده است. به منظور بررسی دقت مدل نرم‌افزاری، نتایج تحلیل‌ها با نتایج آزمایشات عملی مقایسه گردید. شکل ۶ توزیع تنش فون مایزر را در پایان مرحله فشردن، که به الکتروودها نیرو اعمال می‌شود، نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود حداکثر تنش در لبه سطح تماس الکتروود-ورق رخ می‌دهد. شکل ۷ توزیع دما را در انتهای سیکل جوشکاری، برای شدت جریان ۱۰ کیلوآمپر و زمان ۱۲ سیکل، نشان می‌دهد. دکمه جوش ناحیه‌ای است که دمای آن به بالاتر از نقطه ذوب ورق‌ها رسیده باشد.

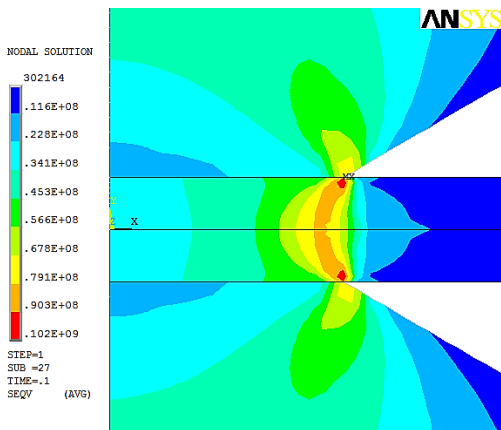


شکل ۵: دیاگرام مدل‌سازی المان محدود فرآیند جوشکاری نقطه‌ای

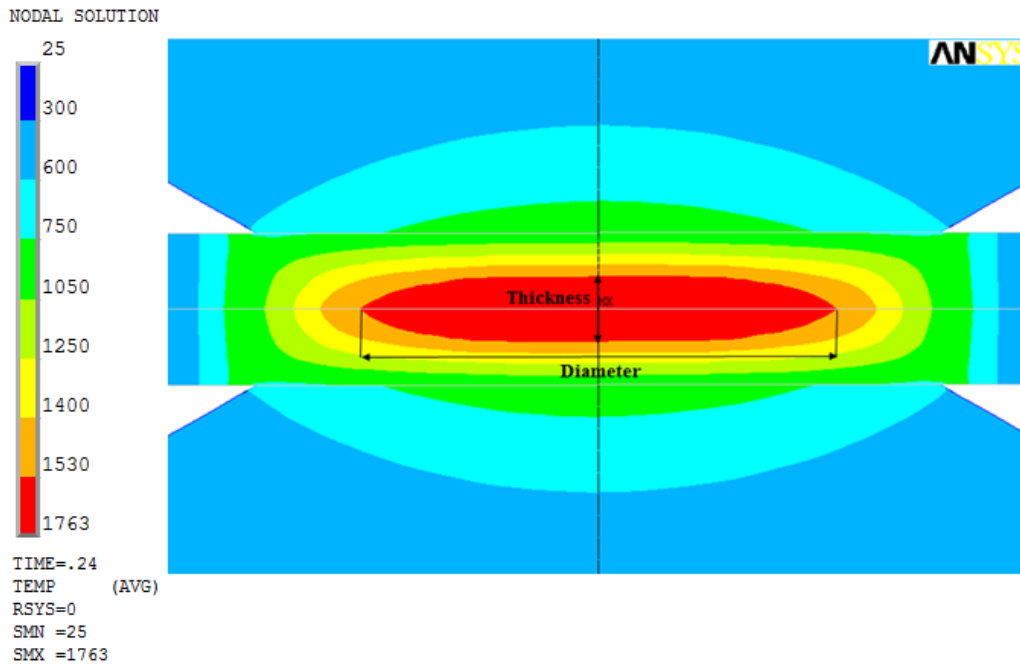
با فرض 1530°C به عنوان دمای ذوب فولاد، ناحیه جوش به رنگ قرمز مشاهده می‌شود. قطر و ضخامت دکمه جوش اندازه‌گیری شده از آزمایش عملی به ترتیب $4/7$ و $0/58$ میلی‌متر بوده است، و مقدار محاسبه شده از تحلیل المان محدود $4/1$ و $0/6$ میلی‌متر است. خطای نسبی محاسبه شده بین 4% و 13% است، که مطابقت خوبی را بین نتایج محاسبه شده و نتایج تجربی نشان می‌دهد.

شکل ۸ توزیع دما را برای شرایط جوشکاری داده شده در سه موقعیت مرکز دکمه جوش، مرکز سطح تماس الکتروود و ورق و لبه الکتروود نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود همواره بیشترین دما در دکمه جوش در مرکز سطح تماس ورق‌ها است. همچنین دمای سطح تماس ورق‌ها به علت بزرگتر بودن مقاومت تماسی، بیشتر از دمای سطح تماس ورق-الکتروود است.

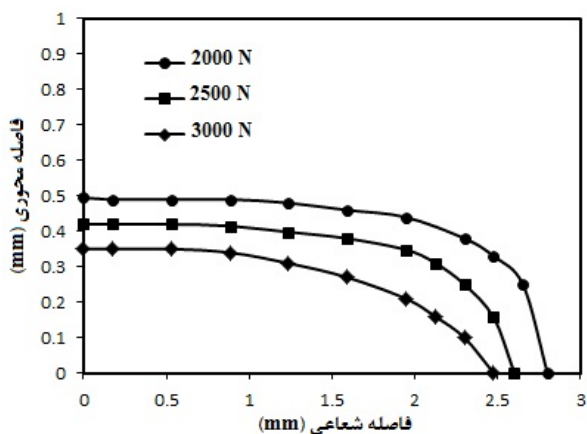
شکل ۹ تأثیر نیروی الکتروود را بر هندسه و ابعاد دکمه جوش تشکیل شده تحت جوشکاری با جریان ۱۲ کیلوآمپر و مدت زمان ۱۲



شکل ۶: توزیع تنش فون مایزر در پایان سیکل فشردن

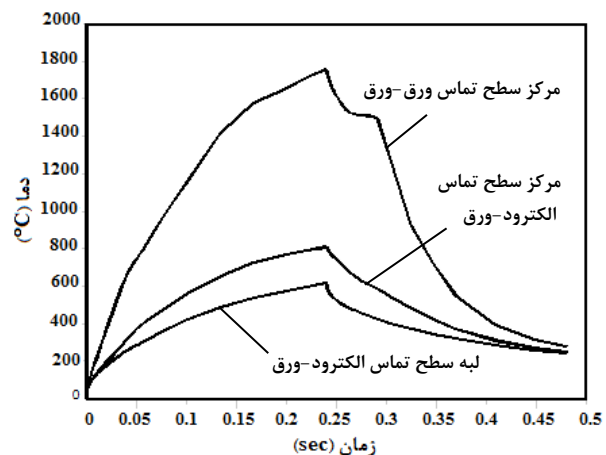


شکل ۷: توزیع دما و اندازه دکمه جوش در پایان زمان جوشکاری



شکل ۹: تأثیر نیروی الکتروود بر هندسه دکمه جوش

طریق هدایت و همرفت می‌شود، به طوریکه تأثیر زمان جوشکاری را بر رشد دکمه جوش ناشی از تولید حرارت کاهش می‌دهد. شکل ۱۱ تأثیر جریان جوشکاری را بر قطر و ضخامت دکمه جوش، در زمان جوشکاری ۱۲ سیکل، نشان می‌دهد. دکمه جوش در جریان بیشتر از ۹ کیلوآمپر تشکیل می‌شود و اولین پدیده بیرون زدگی مذاب^۱ در جریان بیشتر از ۱۲ کیلوآمپر رخ می‌دهد. هنگامی که جریان افزایش می‌یابد نرخ رشد دکمه جوش کاهش می‌یابد، با این حال اندازه دکمه جوش همچنان افزایش پیدا می‌کند تا اینکه بیرون زدگی مذاب رخ می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود کاهش نرخ رشد دکمه جوش با افزایش جریان نسبت به افزایش زمان کمتر است. به عبارت دیگر، نرخ رشد دکمه جوش بیشتر تحت تأثیر جریان جوشکاری است.



شکل ۸: توزیع دما در سه موقعیت مختلف در فرآیند جوشکاری نقطه‌ای

۱۲ سیکل نشان می‌دهد. با افزایش نیرو، سطح تماس ورق‌ها افزایش می‌یابد که این باعث کاهش چگالی جریان عبوری و مقاومت تماسی می‌شود، و در نتیجه ابعاد دکمه جوش کاهش خواهد یافت. شکل ۱۰ تأثیر زمان جوشکاری را بر قطر و ضخامت دکمه جوش، برای جریان جوشکاری ۱۲ کیلوآمپر، نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است، تشکیل دکمه جوش از زمان چهار سیکل شروع شده و در سه سیکل بعدی رشد دکمه جوش به شدت افزایش می‌یابد، و پس از آن نرخ افزایش اندازه دکمه جوش کاهش پیدا می‌کند. دلیل این روند این است که با افزایش زمان جوشکاری، اندازه دکمه جوش و ناحیه تماس در سطح تماس ورق‌ها بزرگ می‌شود، در نتیجه چگالی جریان عبوری و مقاومت تماسی کاهش می‌یابد. دلیل دیگر برای کاهش نرخ رشد دکمه جوش با افزایش زمان جوشکاری این است که افزایش زمان باعث اتلاف حرارت بیشتر از ناحیه ذوب از

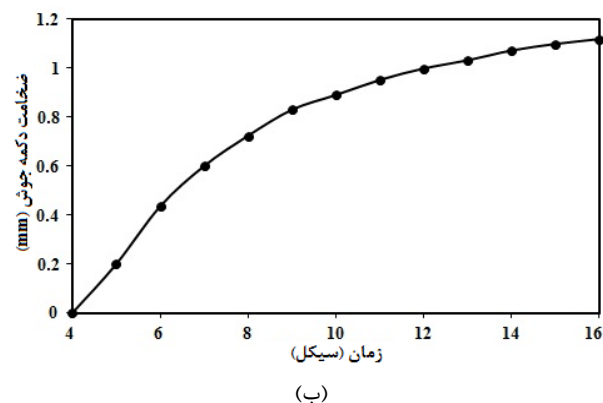
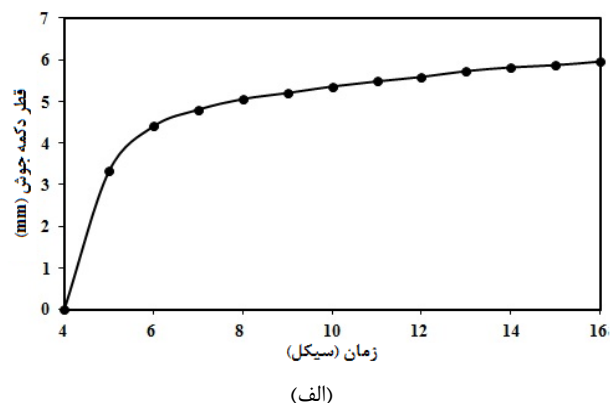
^۱ Expulsion

نتیجه‌گیری

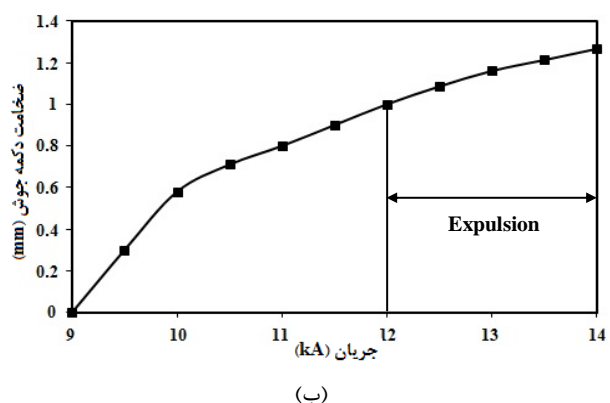
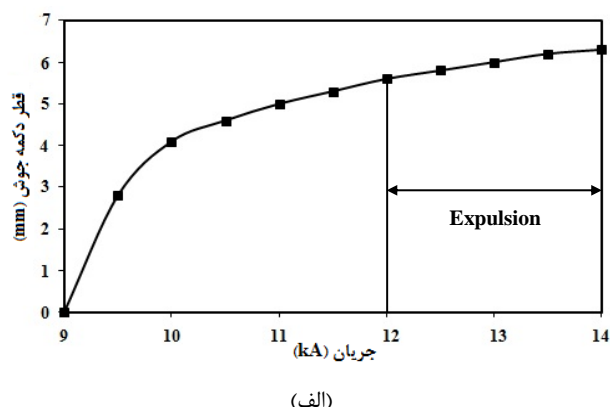
در این مقاله، فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای دو ورق فولادی کم کربن گالوانیزه IF و BH، پر کاربرد در صنعت خودروسازی مدل‌سازی شده است. به منظور بررسی توزیع دما و تشکیل دکمه جوش، از یک مدل المان محدود دو بعدی متقارن برای شبیه‌سازی فرآیند استفاده شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با آزمایشات تجربی مبین دقت خوب مدل المان محدود در پیش‌بینی فرآیند جوشکاری نقطه‌ای است. کیفیت و استحکام اتصالات جوشکاری شده، تحت تأثیر هندسه و ابعاد دکمه جوش می‌باشد. از این رو به مطالعه تأثیر پارامترهای مهم جریان جوشکاری، زمان جوشکاری و نیروی الکتروود بر اندازه دکمه جوش پرداخته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش زمان جوشکاری، اندازه دکمه جوش افزایش می‌یابد ولی نرخ رشد دکمه جوش کاهش پیدا می‌کند که علت آن کاهش مقاومت تماسی و اتلاف حرارتی است. با افزایش جریان جوشکاری، اندازه دکمه جوش افزایش می‌یابد تا اینکه بیرون زدگی مذاب رخ می‌دهد. با توجه به اینکه تأثیر جریان جوشکاری بر اندازه دکمه جوش بیشتر از زمان جوشکاری است، برای دستیابی به اندازه دکمه جوش مناسب، افزایش جریان به جای افزایش زمان توصیه می‌شود. همچنین با افزایش نیرو، به علت افزایش سطح تماسی و کاهش چگالی جریان و مقاومت تماسی، اندازه دکمه جوش کاهش می‌یابد. به همین دلیل به منظور تشکیل دکمه جوش و جلوگیری از پدیده بیرون زدگی مذاب انتخاب مقدار نیروی مناسب ضروری می‌باشد.

مراجع

- [1] Feulvarch, E., Robin, V., Bergheau, J.M., 2004. "Resistance spot welding simulation: a general finite element formulation of electrothermal contact conditions". *Journal of Materials Processing Technology* 153-154, 436-441.
- [2] Hou, Z., Kim, I.S., Wang, Y., Li, C., Chen, C., 2007. "Finite element analysis for the mechanical features of resistance spot welding process". *Journal of Materials Processing Technology* 185, 160-165.
- [3] Ma, N., Murakawa, H., 2010. "Numerical and experimental study on nugget formation in resistance spot welding for three pieces of high strength steel sheets". *Journal of Materials Processing Technology* 210, 2045-2052.
- [4] Eisazadeh, H., Hamed, M., Halvae, A., 2010. "New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using finite element method". *Materials and Design* 31, 149-157.
- [5] Shen, J., Zhang, Y., Lai, X., Wang, P.C., 2011. "Modeling of resistance spot welding of multiple stacks of steel sheets". *Materials and Design* 32, 550-560.



شکل ۱۰: تأثیر زمان جوشکاری بر قطر و ضخامت دکمه جوش



شکل ۱۱: تأثیر جریان جوشکاری بر قطر و ضخامت دکمه جوش