

تحلیل تجربی و عددی اثر شار الکتریکی فرعی بر اتصالات جوش نقطه‌ای مقاوم‌تی آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹

مهدی جعفری وردنجانی، علیرضا آرائی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۸ خرداد ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۱ مهر ۱۳۹۵
پذیرش: ۵ دی ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۶ دی ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

جوش نقطه‌ای مقاوم‌تی
اثر شار الکتریکی فرعی
تحلیل المان محدود
آزمایش تجربی

چکیده: شار الکتریکی فرعی در جوش نقطه‌ای هنگامی رخ می‌دهد که جریان الکتریکی از طریق نقطه جوش موجود عبور می‌کند. مقدار این شار به تعداد، فاصله و اندازه دکمه (های) قبلی وابسته بوده، باعث تغییرات ابعادی و متالورژیکی دکمه جوش پایانی می‌شود. در این مطالعه، اثر شار الکتریکی فرعی به کمک یک مدل المان محدود مورد بررسی قرار گرفته، نتایج آن با آزمایشات تجربی روی ورق‌های آلومینیوم ۲۲۱۹ مورد مقایسه قرار گرفته است. در این راستا، پارامترهای فاصله و جریان جوشکاری جهت کشف اثر شار الکتریکی فرعی بر کیفیت دکمه جوش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در بخش تجربی، طراحی آزمایش سه‌عاملی به منظور تشخیص اهمیت عوامل مؤثر و اعتبارسنجی مدل المان محدود استفاده شده است. در مدل المان محدود، تمامی اثرات متقابل الکترو-ترمال و مکانیکی مد نظر قرار داده شده، خواص جنس بصورت تابعی از دما وارد شده‌اند. نتایج تجربی و عددی از مطابقت قابل قبولی برخوردار هستند. عدم تقارن توزیع دما به همراه ابعاد نقطه جوش تحت اثر عامل مذکور توسط مدل المان محدود پیش‌بینی شده، توسط نتایج تجربی اعتبارسنجی شده است. همچنین تاثیر شار الکتریکی فرعی بر کاهش عمق نفوذ، گرایش منطقه‌ی متأثر از حرارت به نقطه جوش قبلی و تمرکز عناصر آلیاژی در مرز دانه‌های منطقه متأثر از حرارت به اثبات رسیده است.

۱- مقدمه

مطالعات اندکی در زمینه شار الکتریکی فرعی^۱ انجام شده است؛ درحالی‌که اغلب محصولات می‌تواند که در آن‌ها از جوش نقطه‌ای مقاوم‌تی^۲ استفاده شده است، از نقطه جوش‌های متوالی برخوردار هستند. نقطه جوش‌های متوالی کیفیت مکانیکی و متالورژیکی نقطه جوش‌های جدید را به دلیل تغییرات الکترو-ترمال ناشی از شار الکتریکی فرعی تحت تأثیر قرار می‌دهند. این امر اهمیت تحلیل شار الکتریکی فرعی را جهت بهینه‌سازی پارامترها و جبران نتایج نامطلوب این پدیده نشان می‌دهد.

منظور از شار الکتریکی فرعی جریان الکتریکی عبورکننده از مدار الکتریکی ایجادشده به کمک نقطه جوش یا نقطه جوش‌های قبلی می‌باشد. مسلماً هنگامی که دو یا چند جوش در کنار یکدیگر ایجاد می‌شوند، کسری از جریان الکتریکی پیش از آنکه از مسیر موردنظر (منطقه تماس دو ورق) عبور کند، از مسیر نقطه جوش (های) قبلی عبور می‌کند. دلیل این امر رسانایی الکتریکی بالاتر مسیرهای قبلی می‌باشد؛ بنابراین جریان الکتریکی اعمال شده به‌طور کامل وارد عمل تولید دکمه جوش موردنظر نشده، کیفیت نقطه جوش نهایی با توجه به پارامترهای مؤثر بر این پدیده شامل فاصله، تعداد و اندازه نقطه جوش (های) قبلی، نیروی الکترو، ضخامت ورق و صافی سطح تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

یکی از قدیمی‌ترین مطالعات تجربی انجام شده در زمینه شار الکتریکی فرعی توسط هارد [۱] انجام شد. او روشی را جهت تشخیص مسیر عبور جریان فرعی ارائه نمود. در مطالعات بعدی تأثیر ابعاد ورق، فاصله جوش، هندسه الکترو و نیروی الکترو جهت یافتن فاصله حداقل جوشکاری به منظور کمینه‌سازی میزان شار فرعی موردبررسی قرار گرفتند [۲]. هاو [۳] و ونگ و همکاران [۴]، انواع مختلفی از فولاد را تحت بررسی قرار داده، تأثیر فاصله و شرایط سطحی را بر شدت شار الکتریکی فرعی بررسی کردند. مطالعات مذکور صرفاً بر جنبه تجربی قضیه و آن هم بر تعداد معدودی از آلیاژهای فولاد تأکید داشته، با توجه به مقدماتی و ضعیف بودن بخش تحلیلی تأثیر اندکی در رفع مشکل نقطه جوش‌های متوالی داشته‌اند.

سنکارا [۵] و ژانگ [۶] جنبه‌های مکانیکی شار الکتریکی فرعی را در زمینه ایجاد ترک در جوش نقطه‌ای مقاوم‌تی آلیاژ آلومینیوم ۵۷۵۴ موردبررسی قرار دادند. گرچه در این مطالعه تأثیر شار الکتریکی فرعی بر تولید ترک تا حدودی مشخص شد، به دلیل عدم تمرکز این مطالعه بر موضوع مذکور به نظر می‌رسد که مطالعات گسترده‌تری جهت کشف اثر مستقیم پارامترهای جوشکاری بر میزان تولید ترک‌ها موردنیاز می‌باشد.

در مدل سه‌بعادی الکترو-ترمال ایجادشده توسط چانگ [۲] توزیع ولتاژ و دما برای یک نقطه جوش متأثر از اثر شار فرعی موردبررسی قرار گرفت که به دلیل فرضیات متعدد ساده‌کننده هندسه پیکربندی مسئله و عدم شمول جنبه مکانیکی، نتایج تا حد قابل‌توجهی از واقعیت دور مانده‌اند. همچنین در مدل تئوری ارائه شده توسط لی و همکاران [۷]، فاصله حداقل موردنیاز

- 1 Shunting effect
- 2 Resistance Spot Welding (RSW)

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: alarace@ut.ac.ir

قابل چشم‌پوشی است، از تغییرات ولتاژ در داخل الکتروود صرف‌نظر شده است.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] = 0 \quad (1)$$

که در آن ρ مقاومت الکتریکی توده‌ای^۱ می‌باشد. جهت اعمال جریان الکتریکی به‌کاررفته در دستگاه جوش از رابطه زیر استفاده شده است [۱۷].

$$I_e = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

که در آن I_e جریان الکتریکی اعمال‌شده بر الکتروود و I_p حداکثر جریان الکتریکی فراهم‌شده توسط ماشین جوش است. رابطه‌ی زیر جهت محاسبه مقاومت تماسی الکتریکی ویژه استفاده شده است [۱۷].

$$\rho_c(T) = R_c(20^\circ\text{C}) \cdot \frac{A_c}{L_c} \sqrt{\frac{\sigma_{e,ave}(T)}{\sigma_{e,ave}(20^\circ\text{C})}} \quad (3)$$

که در آن $R_c(20^\circ\text{C})$ مقاومت تماسی الکتریکی اندازه‌گیری‌شده^۲ مرز تماس ورق و الکتروود در دمای 20°C و تحت فشار مکانیکی معین، L_c ضخامت مشخصه سطوح تماس (برابر 10^{-4} [۱۸])، A_c سطح تماس ظاهری، و $\sigma_{e,ave}(T)$ و $\sigma_{e,ave}(20^\circ\text{C})$ تنش تسلیم متوسط اجسام تماس به ترتیب در دمای T و 20°C می‌باشند.

رابطه اصلی حرارتی به‌صورت رابطه (۴) استفاده شده است [۲].

$$D \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{1}{\rho} \nabla \phi \cdot \nabla \phi \quad (4)$$

که در آن D چگالی جرمی، c ظرفیت گرمایی ویژه و k ضریب رسانش حرارتی تماسی است. ظرفیت گرمایی ویژه در دمای ذوب به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۲].

$$c_{xyz} = c_{T_s} + \frac{H_m}{T_s} \quad (5)$$

که در آن H_m حرارت نهان ذوب، T_l و T_s به ترتیب دماهای سالیدوس^۳ و لیکوئیدوس^۴، و c' ظرفیت گرمایی ویژه پس از تغییر فاز است. رابطه‌ی نسبی الاستیک-پلاستیک زیر که توسط هو [۱۹] تشریح شده است جهت تحلیل بخش ترمو-مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته است.

$$d\{\sigma\} = [C] d\{\varepsilon\} - \{C_T\} dT \quad (6)$$

- 1 Bulk electrical resistance
- 2 Electrical Contact Resistance (ECR)
- 3 Solidus
- 4 Liquidus

جهت غلبه بر شار الکتریکی فرعی به‌دست آمد. البته ساده‌سازی‌های هندسی و محاسباتی متعددی در این مدل در نظر گرفته شده است که در مطالعه انجام‌شده توسط جعفری و همکاران [۸] این فرضیات با در نظر گرفتن تابعیت دمایی پارامترها و ارتقای هندسه به‌کارگرفته‌شده در سطح قابل‌توجهی اصلاح شده‌اند.

تحلیل‌های المان محدود متعددی در زمینه جوش نقطه‌ای مقاومتی منفرد انجام‌شده است. گرچه استفاده از این مدل‌ها جهت تحلیل فرآیند شار الکتریکی فرعی نیاز به تغییراتی دارد، اساس کار یکسان است. از جمله تحلیل‌های صورت گرفته در زمینه جوش نقطه‌ای منفرد، شبیه‌سازی توزیع پارامترهای الکتریکی و حرارتی توسط هو [۹] و سای [۱۱]، پیش‌بینی ویژگی‌های تماسی حرارتی و الکتریکی و شعاع تماس توسط لؤلؤ [۱۲] و شن [۱۳]، رشد دکمه جوش و تغییر شکل‌های مکانیکی توسط نید [۱۴] و تحلیل‌های الکترو-ترمال-مکانیکال توسط ژانگ [۱۵] و کیم [۱۶] قابل‌ذکر هستند. باید توجه نمود که عدم تقارن موجود در پیکربندی مکانیزم شار الکتریکی فرعی استفاده از فضای تک‌بعدی، یا دوبعدی متقارن مورد استفاده در مطالعات المان محدود مذکور را غیرممکن می‌سازد.

در این مقاله شار الکتریکی فرعی جوش نقطه‌ای مقاومتی به کمک یک مدل المان محدود تحت تحلیل قرار گرفته، نتایج آن با آزمایش‌های تجربی انجام‌شده روی آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹ با ضخامت یک میلی‌متر مورد مقایسه قرار گرفته است. در این راستا پارامترهای فاصله، زمان و جریان جوشکاری جهت کشف اثر شار الکتریکی فرعی بر کیفیت نهایی دکمه جوش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. علی‌رغم اکثر مطالعات گذشته، تابعیت دمایی پارامترهای جنس و تماسی در مدل عددی لحاظ شده، شبیه‌سازی به‌صورت کوپل الکتریکی-حرارتی-مکانیکی انجام‌شده است. همچنین بررسی‌های متالورژیکی نقطه‌جوش نهایی باعث کشف نتایج مهمی چون تأثیر شار فرعی بر ابعاد دکمه جوش، رشد نامتقارن منطقه تحت تأثیر حرارت و نحوه توزیع عناصر آلیاژی شده است.

۲- روش کار

روش کار در دو قسمت تشریح تحلیل المان محدود و آزمایش‌های تجربی به‌طور کامل ارائه شده است.

۲-۱- تحلیل المان محدود

روابط، مدل‌سازی عددی و ویژگی‌های جنس به‌کاررفته در مدل المان محدود در این بخش به‌طور مجزا تشریح شده است.

۲-۱-۱- روابط

رابطه شبه لاپلاس پتانسیل الکتریکی (ϕ) (رابطه (۱))، در مختصات سه‌بعدی، جهت دستیابی به توزیع پتانسیل الکتریکی داخل ورق به‌کار گرفته شد [۱]. از آنجایی که مقاومت الکتریکی الکتروود در مقابل ورق

در ابتدای مرحله فشردگی میدان الکتریکی و تنش وجود ندارد و دما برابر دمای اتاق است. پس از شروع عمل بارگذاری الکترودها در داخل ورق‌ها نفوذ کرده، تماس بین دو ورق در محل بین دو الکتروود تشدید می‌شود. در مرحله جوشکاری نیروی الکتروود افزایش یافته، جریان الکتریکی مابین دو الکتروود برقرار می‌شود. پتانسیل الکتریکی با توجه به جریان الکتریکی اعمال شده، برای کل محدوده موردبررسی به دست می‌آید. سپس از توزیع انرژی الکتریکی به دست آمده به عنوان منبع تولید حرارت جهت یافتن توزیع دما استفاده می‌شود؛ که این کار به کمک روابط انتقال حرارت صورت می‌پذیرد.

در مرحله‌ی نگهداری نیروی الکترودها با هم افزایش یافته، جریان الکتریکی قطع می‌شود. پس از این مرحله کل مجموعه با شرایط تنش و دمایی نهایی به دست آمده از همین مرحله وارد فاز کاهش دما می‌شوند. خواص مواد با توجه به دمای محاسبه شده برای هر المان و در هر بازه‌ی زمانی به روزرسانی شده، برای محاسبات الکتریکی، حرارتی و مکانیکی بازه‌ی زمانی بعدی استفاده شده است.

که در آن $d\{\epsilon\}$ و $d\{\sigma\}$ به ترتیب تفاضل بردارهای تنش و کرنش، $[C]$ ماتریس الاستیک-پلاستیک، $\{C_T\}$ بردار ضریب حرارتی، و dT اختلاف دما می‌باشد.

۲-۱-۲ مدل سازی عددی

• پیکربندی

ابعاد ورق و الکترودها (شکل ۲) در مدل المان محدود مشابه ابعاد قطعات به کاررفته در آزمایش‌های تجربی در نظر گرفته شده است. جهت ساده سازی روند محاسبات دکمه جوش قبلی به صورت یک استوانه در نظر گرفته شده است. ابعاد این دکمه جوش با توجه به نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده برای نقطه جوش منفرد با پارامترهای جوشکاری متوسط در مدل تعیین شده است.

• روند شبیه سازی

مراحل شبیه سازی براساس بازه‌های اعمال نیرو که شامل مرحله‌ی فشردگی، جوشکاری و نگهداری می‌شود قابل تشریح است.

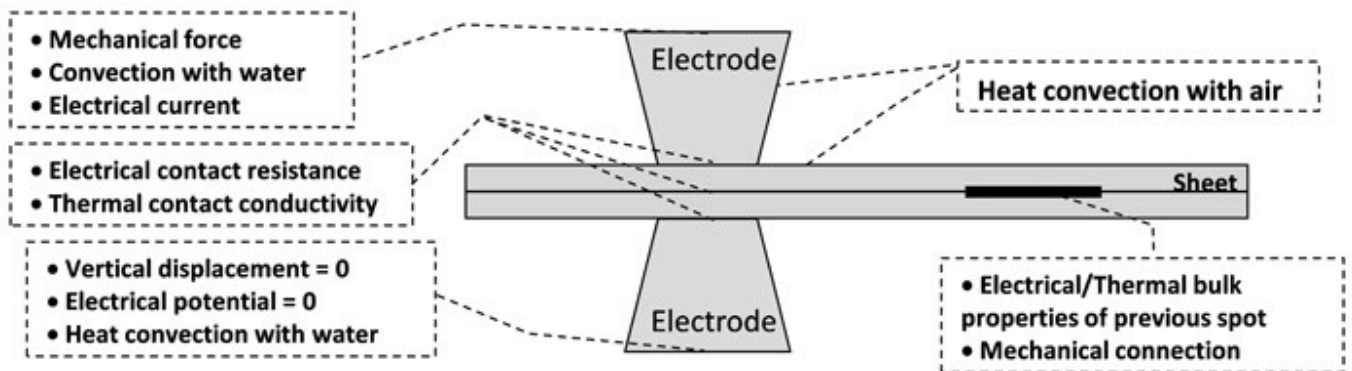


Fig. 1. Boundary conditions and specific domains

شکل ۱: شرایط مرزی و نواحی مفروض

• المان بندی

پس از تشخیص اهمیت نقاط مختلف، بهینه سازی و ساده سازی المان‌های این مدل انجام شد. در مدلی که برای این کار مورد استفاده قرار گرفت نواحی دور از نقطه جوش اول و دوم با المان‌هایی درشت تر از المان‌های مناطق مذکور مورد بررسی قرار گرفتند. این مطلب در مورد الکترودها نیز صادق است. شکل ۳ توزیع مطلوب المان‌ها را برای مقطع برش خورده‌ی الکترودها، ورق و جوش قبلی نشان می‌دهد. در مدل شبیه سازی مورد استفاده نیز سعی شد تا مش بندی انجام گرفته با توجه به رعایت اصول مش بندی و بر اساس اهمیت نواحی مختلف از قبیل منطقه تماس دو ورق، مسیر جریان الکتریکی در جوش قبلی و منطقه‌ی تماس الکتروود و ورق انجام گیرد.

المان‌های به کار رفته در دامنه‌های مهم از قبیل مناطق تماس بین ورق‌ها، تماس الکتروود و ورق، انتهای الکترودها و دکمه جوش قبلی از نوع

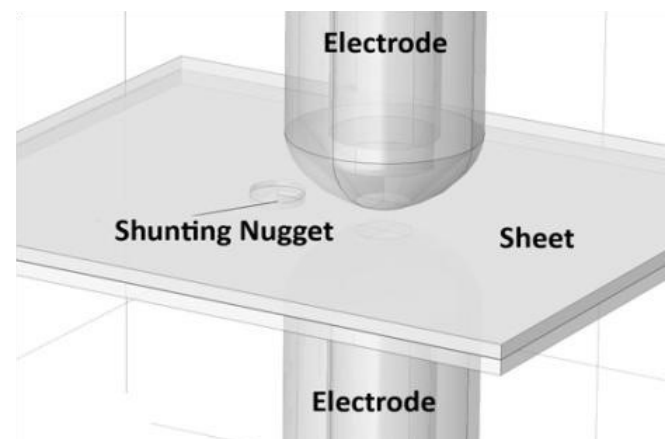


Fig. 2. Finite element model configuration, including previous welding nugget, sheets, and electrodes

شکل ۲: پیکربندی مدل المان محدود، شامل دکمه جوش قبلی، ورق‌ها و الکترودها

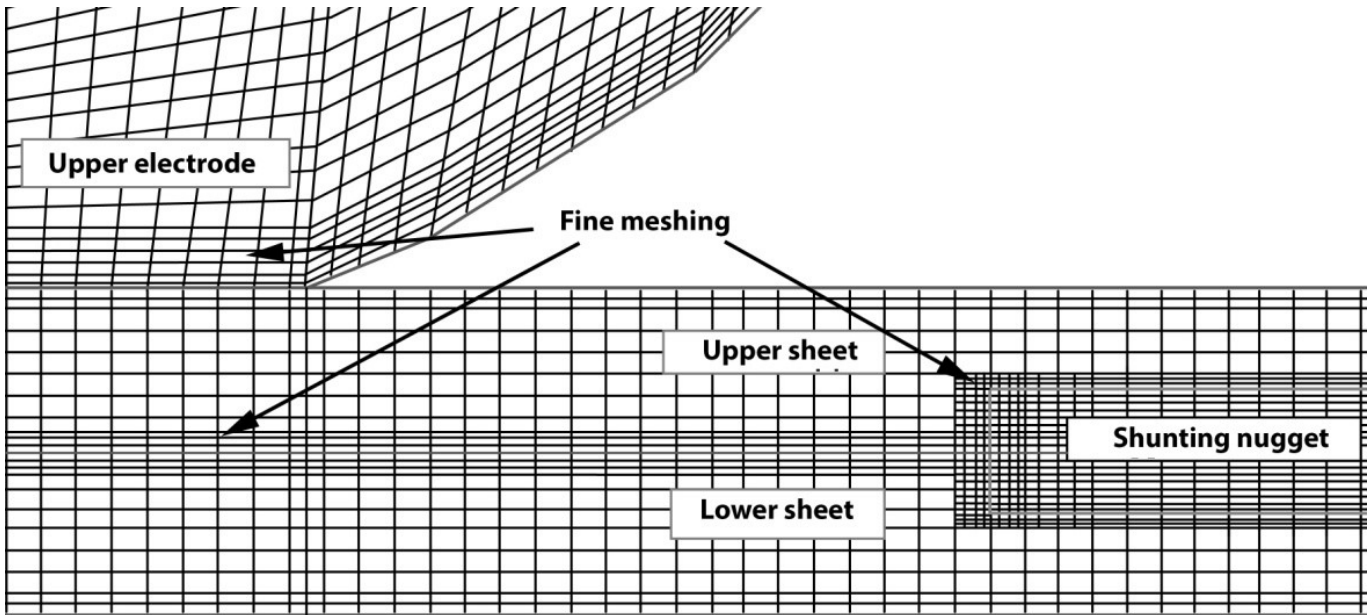


Fig. 3. Meshing of electrodes, sheets, previous welding nugget

شکل ۳: مش بندی مطلوب برای الکترودها، ورق‌ها و دکمه جوش قبلی در سطح مقطع نقطه جوش مورد نظر

با توجه به زمان انجام محاسبه و میزان خطای مشاهده شده در نتایج، تعداد بهینه المان که در اینجا ردیف سوم محسوب می‌شود انتخاب شد (جدول ۲). لازم به ذکر است که به دلیل زمان بالای انجام محاسبات فرآیند، شبیه‌سازی این بخش با ساده‌سازی جزئی جنبه مکانیکی فرآیند انجام شده است.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای منتخب جهت انجام مطالعه تعداد المان

Table 1. Specified parameters for mesh study

مقدار	پارامتر
۲۶۷۰۰ آمپر	جریان جوشکاری
۴ سیکل	زمان جوشکاری
۰/۰۲ متر	فاصله جوشکاری
۴۵۰۰ نیوتون	نیروی جوشکاری

منشوری^۱ ریز، المان‌های مربوط به ساق الکترودها از نوع چهاروجهی^۲ درشت و المان‌های طرفین ورق‌ها از نوع منشوری درشت انتخاب شدند. بررسی تعداد بهینه المان با مقایسه ابعاد دکمه جوش به دست آمده بر اساس تعداد المان‌ها و زمان حل انجام شد. بدین ترتیب تعداد المان و زمان بهینه با توجه به اندازه مرجع قطر دکمه جوش حاصل انتخاب شد. بدین منظور مدل‌های متعددی مورد بررسی قرار گرفتند. این بررسی از مدلی که دارای کمترین تعداد المان ممکن بود آغاز شد. سرانجام اولین مدلی که منجر به دستیابی قطر دکمه جوش حاصل در یک بازه‌ی خطایی معقول شد انتخاب گردید. جهت انجام این مقایسه ابتدا یک تیمار آزمایش تجربی انتخاب شد. سپس نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل برای تعداد مختلف المان، با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. جدول ۱ پارامترهای جوشی منتخب جهت انجام این مطالعه را نشان می‌دهد. جدول ۲ نتایج این بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۲: نتایج بررسی حساسیت مدل المان محدود به تعداد المان اختصاص داده شده، با توجه به ابعاد دکمه جوش

Table 2. Mesh study results according to nugget dimension

تعداد المان	قطر (mm)	ارتفاع (mm)	بیشینه دما (K)	زمان (min)	خطای قطر (%)	خطای ارتفاع (%)
۱۳۹۸۵	۵/۱	۱/۴۵	۱۳۴۴/۴۲	۱۵۱	۴/۶۷	۳/۵۷
۱۲۱۵۵	۵/۰۸	۱/۴۹	۱۳۵۰/۲۲	۱۰۴	۵/۰۵	۶/۴۳
۱۱۸۱۸	۵/۰۶	۱/۴۲	۱۳۳۸/۱۸	۹۸	۵/۴۲	۱/۴۳
۱۰۶۳۴	۵/۰۱	۱/۴۳	۱۳۲۹/۱۴	۶۵	۶/۳۶	۲/۱۴
۵۰۲۴	۴/۹۸	۱/۴۵	۱۳۲۰/۶۹	۲۲	۶/۹۲	۳/۵۷

- 1 Swept
- 2 Tetrahedral

۲-۱-۳- ویژگی‌های جنس

به ذکر است که از آنجایی که دمای نقطه‌جوش قبلی طی فرآیند تا حد کمی افزایش می‌یابد، این خواص در دمای اتاق در مدل المان محدود تعریف شدند. مقادیر مقاومت الکتریکی تماسی برای سطح تماس الکتروود و ورق به مقدار $8/1 \times 10^{-7} \Omega$ و برای دو ورق برابر $6/8 \times 10^{-3} \Omega$ به دست آمد. این مقادیر نیز به کمک روش مورد استفاده توسط وگلر [۲۳] اندازه‌گیری شدند.

۲-۲- آزمایش‌ها

بخش اول فاز آزمایش‌ها به تست‌های جوش‌پذیری و بخش دوم به طراحی آزمایش، اعتبارسنجی مدل و تشخیص میزان اهمیت فاکتورها اختصاص داده شد. اصول آماده‌سازی نمونه‌ها، بازرسی نتایج و محدوده‌ی پارامترهای جوشکاری و پیش‌گرم از هندبوک‌های جوشکاری [۲۵] و صنایع

ورق آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹ به صورت الاستیک-پلاستیک در مدل تعریف شده است. جدول ۳ خواص این آلیاژ را به صورت تابعی از دما ارائه می‌دهد. دمای سالیدوس، دمای لیکوئیدوس و گرمای نهان ذوب این آلیاژ طبق مراجع [۲۰ و ۲۱] به ترتیب برابر 543°C ، 643°C و 389kJ/kg تعریف شده‌اند. جدول ۴ ویژگی‌های جنس مورد استفاده برای الکتروود را به صورت تابعی از دما نشان می‌دهد. مقاومت الکتریکی ویژه نقطه‌جوش قبلی نیز با اندازه‌گیری تجربی این پارامتر برای نقطه‌جوش منفرد به کمک روش گزارش شده توسط وگلر [۲۳] با مقدار $7/11 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ اندازه‌گیری شد. همچنین مدول الاستیسیته و تنش تسلیم آن به کمک روش گزارش شده توسط جعفری و همکاران [۲۴]، به ترتیب با مقدار 75GPa و 342MPa اندازه‌گیری شد. لازم

جدول ۳: خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 2219-T6 به صورت تابعی از دما.

Table 3. Physical and mechanical properties of Al-2219-T6 as a function of temperature

تابع	پارامتر
$D(T) \cong 0.0002 \times T^2 - 0.17 \times T + 2858.3$	چگالی (kg/m^3) [۲۰]
$\rho(T) = 5.7 \times 10^{-8} \times (1 + 0.0017 \times (T - 293))$	مقاومت الکتریکی ویژه $(\Omega \cdot \text{m})$ [۲۰]
$\alpha(T) \cong (0.0063 \times T + 19.708) \times 10^{-6}$	ضریب انبساط حرارتی خطی $(1/\text{K})$ [۲۲]
$c(T) \cong -0.0016T^2 + 1.3521T + 567.72$	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K) [۲۲]
$k(T) \cong 0.1836T + 71.847$	ضریب رسانش حرارتی (J/m.K) [۲۲]
$E(T) \cong 2 \times 10^{-7}T^3 - 0.0005T^2 + 0.2253T + 43.386$	مدول الاستیسیته (GPa) [۲۲]
$\sigma_e(T) \cong 7 \times 10^{-6}T^3 - 0.0102T^2 + 4.0876T - 129.96$	تنش تسلیم (MPa) [۲۰]

جدول ۴: ویژگی‌های جنس آلیاژ C18150 به صورت تابعی از دما.

Table 4. Properties for C18150 alloy as a function of temperature

تابع	پارامتر
$\alpha_E(T) \cong (3 \times 10^{-6}T^2 + 0.0013 \times T + 15.934) \times 10^{-6}$	ضریب انبساط حرارتی خطی $(1/\text{K})$ [۱۱]
$\rho_E(T) \cong (10^{-5}T^2 + 0.0009 \times T + 1.3754) \times 10^{-8}$	مقاومت الکتریکی ویژه $(\Omega \cdot \text{m})$ [۱۱]
$c_E(T) \cong 8 \times 10^{-5}T^2 + 0.0726T + 369.7$	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K) [۱۱]
$k_E(T) \cong -2 \times 10^{-5}T^2 - 0.1147T + 424.89$	ضریب رسانش حرارتی (J/m.K) [۱۱]
$E_E(T) \cong 10^{-7}T^3 - 0.0002T^2 - 0.0516T + 150.81$	مدول الاستیسیته (GPa) [۱۱]
83	تنش تسلیم (MPa) [۱۱]

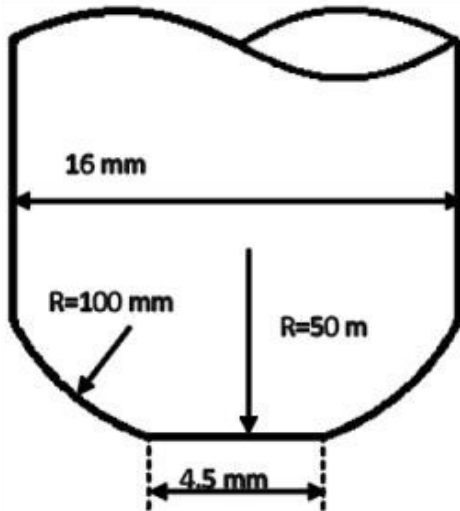


Fig. 4. Geometrical specifications of electrodes
 شکل ۴: مشخصات هندسی الکترود مورد استفاده

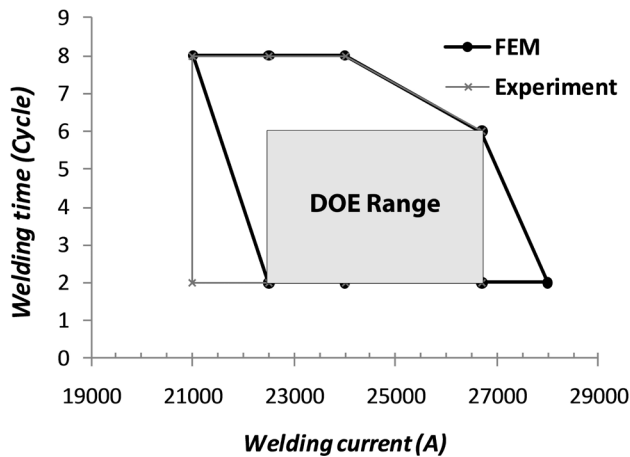


Fig. 5. Numerical and experimental weldability window, and DOE range

شکل ۵: محدوده‌ی جوش پذیری به دست آمده توسط نتایج عددی و تجربی و محدوده طراحی آزمایش مورد انتخاب

همان طور که نمودار پارتوی شکل ۶ و نتایج تحلیل واریانس (جدول ۷) نشان می‌دهد پارامتر جریان مهم‌ترین پارامتر می‌باشد؛ بنابراین به تعداد سطوح بیشتری برای آزمایش‌های بعدی نیاز دارد. همچنین از آنجایی که پارامتر فاصله یکی از پارامترهای مهم این مطالعه به شمار می‌آید، برای این پارامتر نیز تعداد سطوح قابل توجهی در نظر گرفته شده است. به این ترتیب برای پارامتر فاصله ۵ سطح، پارامتر جریان ۴ سطح و پارامتر زمان ۳ سطح در نظر گرفته شد. جدول ۸ تیمارهای جدید آزمایشی را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول مجموعاً ۶۰ آزمایش جدید با ۲ تکرار علاوه بر آزمایش‌های بخش طراحی آزمایش انجام شد. لازم به ذکر است که به دلیل اهمیت سه فاصله جوشکاری ۵، ۱۲/۵ و ۲۰ میلی‌متر، تمرکز اصلی در بخش نتایج روی این مقادیر است.

شکل ۷ ابعاد نمونه‌ها و چیدمان نقطه‌جوش‌ها را نشان می‌دهد.

هوایی [۲۶] استخراج شده‌اند. جریان جوشکاری ۱۲ kA و زمان ۴ cycle برای پیش گرم، با زمان خاموشی ۲ cycle پس از پیش گرم در نظر گرفته شد. نیروهای فشار اولیه^۱ و نگهداری^۲ به ترتیب به مقدار ۲ kN و ۲ kN در نظر گرفته شد. محدوده‌ی جریان و زمان جوشکاری به ترتیب برابر ۲۶-۲۲ kA و ۲-۱۰ cycle و محدوده‌ی نیروی الکترود برابر ۲/۵-۳/۲ kN فرض شد. نوع الکترود با توجه به مطالعات پیشین [۲۷] از نوع گنبدی^۳ (شکل ۴) انتخاب شد.

۲-۲-۱- تست‌های جوش پذیری

جوش‌پذیری ورق تحت جوش با توجه به دو معیار عدم وجود پاشش و ایجاد نقطه‌جوشی با قطر دکه جوش بین $3/5\sqrt{t_s}$ و $5\sqrt{t_s}$ (ضخامت ورق است). مورد بررسی قرار گرفت [۲۵، ۲۶ و ۲۸]. عمل اندازه‌گیری ابعاد دکه‌جوش در نمونه‌های جدا شده، با چند تکرار به کمک کولیس انجام و میانگین‌گیری شد. پس از یافتن نیروی الکترود مجاز، بازه جوش‌پذیری جریان، و زمان جوشکاری به دست آمد (شکل ۵) و مدل المان محدود مورد استفاده اعتبارسنجی شد.

۲-۲-۲- طراحی آزمایش

محدوده مستطیلی پارامترهای زمان و جریان جوشکاری بر اساس محدوده‌ی جوش‌پذیری به دست آمده (شکل ۵)، پارامتر فاصله‌ی جوشکاری بر اساس مطالعات قبلی [۳] تعیین شد (جدول ۵). تصادفی بودن ترتیب آزمایش‌ها جهت حذف اثر تنظیم متغیرهای مختلف و لحاظ نمودن دو تکرار برای هر تیمار در طرح آزمایشی جهت افزایش اطمینان از نتایج حاصل در نظر گرفته شده است؛ بنابراین جدول ۶ به عنوان ماتریس آزمایش‌ها طرح سه عاملی به دست آمد.

جهت تعیین میزان اهمیت هر فاکتور، نمودار پارتو و نتایج تحلیل واریانس آن برای نتایج آزمایش‌های عملی به دست آمده است. شکل ۶ نمودار پارتوی نمایش‌دهنده‌ی اثرات پارامترها و اثرات ترکیبی آن‌ها و جدول ۷ نتایج تحلیل واریانس را برای آزمایش‌های عملی جدول ۶ برای قطر دکه جوش نشان می‌دهد.

جدول ۵: محدوده‌ی جریان و زمان جوشکاری برای فاز طراحی آزمایش

Table 5. Range of parameters for design of experiment

پارامتر	حد پائین	حد بالا
جریان جوشکاری (kA)	۲۲/۵	۲۶/۷
زمان جوشکاری (cycle)	۲	۶
فاصله جوشکاری (mm)	۵	۲۰

- 1 Squeeze
- 2 Holding
- 3 Dome

جدول ۷: تحلیل واریانس داده‌ها برای نتایج جدول ۶ (با توجه به راهنمای شکل ۶)

Table 7. Analysis of variance for data in table 6 (according to legend in Fig. 6)

DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	P	منبع
۳	۶/۶۱۸۸	۶/۶۱۸۸	۲/۲۰۶۲	۰	اثر اصلی
۱	۴/۱۲۰۹	۴/۱۲۰۹	۴/۱۲۰۹	۰	A
۱	۱/۲۲۱	۱/۲۲۱	۱/۲۲۱۰	۰	B
۱	۱/۲۷۶۹	۱/۲۷۶۹	۱/۲۷۶۹	۰	C
۱	۰/۱۱۹	۰/۱۱۹	۰/۱۱۹۰	۰/۱۱۶	A*B
۱	۰/۲۷۰۴	۰/۲۷۰۴	۰/۲۷۰۴	۰/۰۲۹	A*C
۱	۰/۲۵۵	۰/۲۵۵	۰/۲۵۵۰	۰/۰۳۲	B*C
۱	۰/۲۸۶۲	۰/۲۸۶۲	۰/۲۸۶۲	۰/۰۲۶	A*B*C
۸	۰/۳۰۵۸	۰/۳۰۵۸	۰/۰۳۸۲		خطای باقیمانده
۸	۰/۳۰۵۸	۰/۳۰۵۸	۰/۰۳۸۲		خطای مطلق
۱۵	۷/۸۵۵۳				مجموع

جدول ۸: سطوح جدید انتخابی برای پارامترهای آزمایشی جهت یافتن سطوح بهینه

Table 8. Preferred levels of factors to find optimized levels

فاصله (mm)	زمان (Cycle)	جریان (kA)
۲۰, ۱۶/۲۵, ۱۲/۵, ۸/۷۵, ۵	۶, ۴, ۲	۲۶/۷, ۲۵/۳, ۲۳/۹, ۲۲/۵

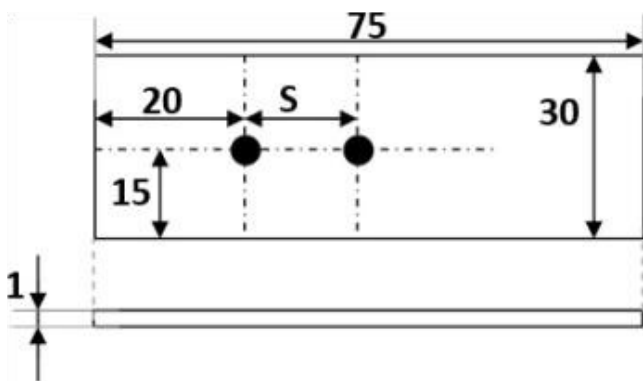


Fig. 7. Dimensions of samples and welding layout for design of experiment (Dimensions in mm)

شکل ۷: ابعاد نمونه و چیدمان نقطه جوش‌های مورد نظر برای فاز طراحی آزمایش (ابعاد برحسب میلی‌متر است).

جوشکاری، پارامتر زمان جوشکاری در بخش نتایج به صورت ثابت در نظر گرفته شد؛ ضمن اینکه نتایج به دست آمده در محدوده‌ی انتخاب شده برای پارامتر زمان فاقد ارزش تحلیلی بودند.

جدول ۶: ترتیب تصادفی آزمایش‌های بخش طراحی آزمایش

Table 6. Randomized order of experiments

ترتیب استاندارد	فاصله (mm)	زمان (Cycle)	جریان (kA)	ترتیب اجرا
۱۴	۲۰	۲۶/۷	۲	۱
۳	۵	۲۲/۵	۶	۲
۲	۲۰	۲۲/۵	۲	۳
۱	۵	۲۲/۵	۲	۴
۱۶	۲۰	۲۶/۷	۶	۵
۱۱	۵	۲۲/۵	۶	۶
۷	۵	۲۶/۷	۶	۷
۶	۲۰	۲۶/۷	۲	۸
۸	۲۰	۲۶/۷	۶	۹
۵	۵	۲۶/۷	۲	۱۰
۹	۵	۲۲/۵	۲	۱۱
۱۲	۲۰	۲۲/۵	۶	۱۲
۱۰	۲۰	۲۲/۵	۲	۱۳
۱۵	۵	۲۶/۷	۶	۱۴
۱۳	۵	۲۶/۷	۲	۱۵
۴	۲۰	۲۲/۵	۶	۱۶

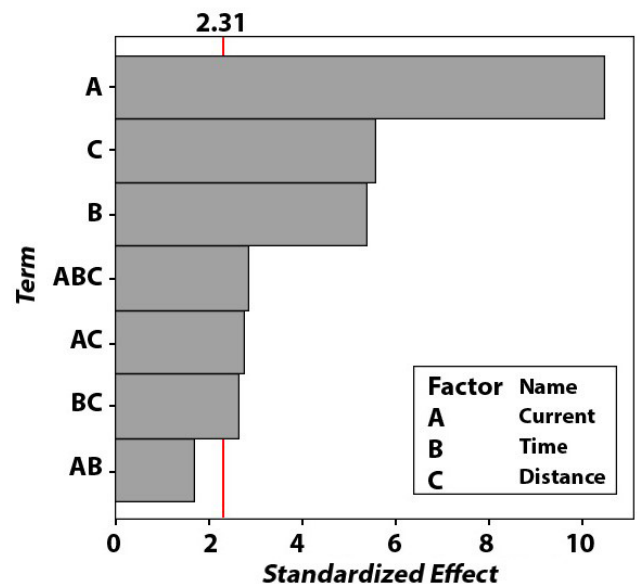


Fig. 6. Welding nugget diameter Pareto diagram, according to Table 6

شکل ۶: نمودار پارتوی قطر دکمه جوش برای داده‌های جدول ۶

نقطه جوش S_1 برای تمام نمونه‌ها با به کارگیری نیروی الکتروود ۲/۹ kN، جریان جوشکاری ۲۴ kA و زمان جوشکاری ۴ cycle جوشکاری شده است. لازم به ذکر است که جهت تمرکز بر پارامترهای جریان و به ویژه فاصله

۲-۳- بررسی متالوگرافی نمونه‌ها

نمونه‌ها پس از انجام جوشکاری، جهت بررسی‌های متالورژیکی و هندسی برش داده شدند. ابعاد دکمه جوش پس از برش میانی مقطع آن، روی نمونه‌های مانده و به کمک میکروسکوپ نوری اندازه‌گیری شدند. ماشین جوشکاری مورد استفاده از نوع PFP 231 بوده است.

۳- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا مقایسه‌ای بین نتایج تجربی و عددی از لحاظ تأثیر پارامترهای جریان و فاصله جوشکاری بر ابعاد دکمه جوش انجام می‌شود. سپس نتایج پیش‌بینی شده و تجربی به دست آمده در زمینه تغییرات ابعاد دکمه جوش و منطقه متأثر از حرارت به کمک نتایج تجربی و شبیه‌سازی مورد مقایسه و اعتبارسنجی قرار می‌گیرند. در پایان نیز اثر شار الکتریکی فرعی بر ریزساختار، به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی تحلیل می‌شود. لازم به ذکر است که در این قسمت تمامی نتایج ارائه شده با پارامترهای جریان و زمان جوشکاری به ترتیب برابر ۲۵/۳ kA و ۶ cycle به دست آمده‌اند، مگر آنکه خلاف آن ذکر شده باشد.

۳-۱- تأثیر جریان و فاصله جوشکاری بر ابعاد دکمه جوش

شکل ۸ تأثیر فاصله جوشکاری را با دو جریان مختلف جوشکاری برای نتایج تجربی و شبیه‌سازی شده نمایش می‌دهد. تأثیر فاصله جوشکاری بر قطر دکمه جوش به‌طور آشکار برای هر دو مقدار جریان جوشکاری آشکار است. افزایش فاصله جوشکاری باعث کاهش شار الکتریکی فرعی و در نتیجه افزایش قطر دکمه جوش شده است. دلیل اصلی این امر این است که با افزایش فاصله، پدیده شار الکتریکی فرعی از دو جهت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. افزایش فاصله از یک‌سو باعث افزایش طول مسیر شار الکتریکی فرعی و از سوی دیگر باعث جدایش بیشتر ورق‌ها از یکدیگر می‌شود. این دو عامل روی هم‌رفته به کاهش جریان فرعی ایجاد شده در مسیر الکتریکی ثانویه (فرعی) کمک می‌نماید؛ زیرا افزایش طول (هرچند اندک) باعث افزایش مقاومت مسیر و جدایش ورق‌ها در بین دو نقطه جوش شده، باعث کاهش سطح تماس دو ورق می‌شود. البته باید به این نکته توجه نمود که تمام این موارد تنها با ثبات نیروی الکتروود صادق است. مطلب قابل‌ذکر دیگر در شکل ۸ در مورد تأثیر متقابل فاصله و جریان جوشکاری است. افزایش جریان جوشکاری تأثیر فاصله بر قطر دکمه جوش را کاهش داده است. محتمل‌ترین دلیل این امر این است که افزایش جریان جوشکاری باعث تأمین انرژی مورد نیاز جهت دستیابی به قطر دکمه جوش حداکثر دکمه جوش شده، در این شرایط افزایش فاصله جوشکاری تأثیر کمی بر کاهش اثر شار فرعی خواهد داشت.

شکل ۹ اثر تغییرات فاصله جوشکاری را بر عمق نفوذ جوش و در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی شده، با دو جریان مختلف نشان می‌دهد. در اینجا نیز افزایش فاصله جوشکاری باعث افزایش میزان نفوذ جوش شده است.

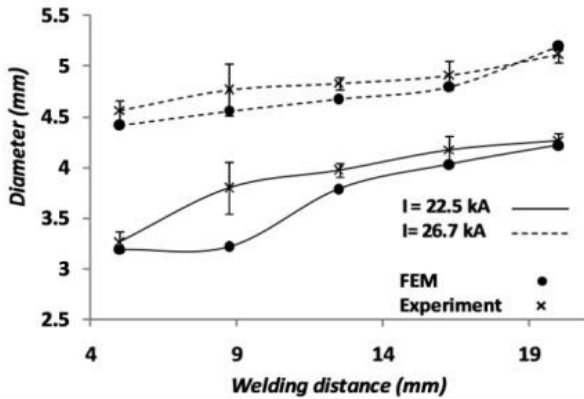


Fig. 8. Distance-Diameter diagram for experimental and numerical results (welding time is 4 cycles)

شکل ۸: نمودار فاصله-قطر برای نتایج تجربی و عددی با زمان جوشکاری ۴ cycles

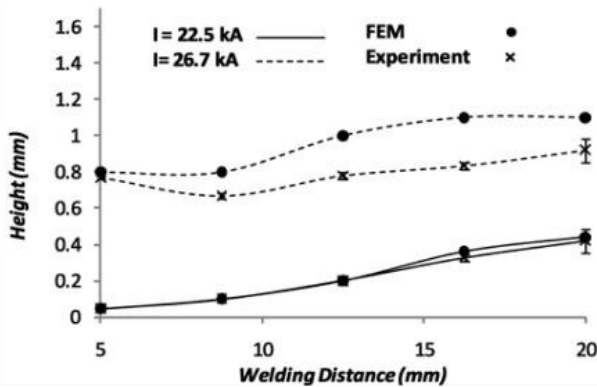


Fig. 9. Distance-Height diagram for experimental and numerical results (welding time is 4 cycles)

شکل ۹: نمودار فاصله-عمق نفوذ تجربی و عددی با زمان جوشکاری ۴ cycles [۲۹]

مسلم است که علت این پدیده مجدداً به کاهش اثر شار الکتریکی فرعی با افزایش فاصله جوشکاری مربوط می‌شود. طبق مطالب مذکور در قسمت قبل، افزایش فاصله جوشکاری، با کاهش جریان الکتریکی فرعی، انرژی بیشتری را در محل جوشکاری تأمین نموده، ابعاد دکمه جوش را در جهت ضخامت ورق افزایش داده است.

با توجه به شکل ۸ و ۹ افزایش جریان جوشکاری از حداقل به حداکثر باعث افزایش ابعاد دکمه جوش شده است که این مسئله برای همه فواصل جوشکاری صادق است. اما باید به این مسئله توجه نمود که افزایش جریان جوشکاری همواره راه‌حل مناسبی جهت جبران شار الکتریکی فرعی و افزایش ابعاد دکمه جوش نمی‌باشد. چراکه از یک‌سو باعث افزایش مصرف انرژی شده، از سوی دیگر احتمال بروز پاشش مذاب را در سطح داخلی و خارجی افزایش می‌دهد. لذا در این مقاله سعی شده تا با تمرکز بر پارامتر فاصله جوشکاری و بررسی عمیق‌تر آن میزان اثر آن بر جنبه‌های مختلف کیفیت دکمه جوش به دست آید.

۳-۲- تأثیر فاصله بر ابعاد دکمه جوش و منطقه متأثر از حرارت

۳-۲-۱- بررسی تجربی

شکل ۱۰ تا ۱۲ سطح مقطع دکمه جوش ایجادشده را برای فواصل جوشکاری ۵ mm، ۱۲/۵ mm و ۲۰ mm، به همراه محدوده تقریبی منطقه متأثر از حرارت ایجادشده نشان می‌دهند. با مقایسه‌ی ساختار نمایش داده شده می‌توان به افزایش ابعاد دکمه جوش در ضمن کاهش تمایل رشد منطقه متأثر از حرارت به سمت بین دو نقطه جوش پی برد. نقطه جوش شکل ۱۳ به صورت منفرد ایجاد شده است لذا علاوه بر ابعاد بزرگ‌تر دکمه جوش، منطقه متأثر از حرارت در آن به صورت متقارن و با حجم کم‌تری در اطراف سطح مقطع دکمه جوش رشد کرده است. مسلماً دلیل این امر شار الکتریکی فرعی بوده است؛ درواقع وجود شار الکتریکی فرعی در نقطه جوش‌های متأثر از شار الکتریکی فرعی (شکل ۱۰ تا ۱۲) باعث شده است تا بخش بزرگی از انرژی الکتریکی صرف تولید منطقه متأثر از حرارت شود؛ به عبارت دیگر افزایش فاصله جوشکاری باعث کاهش شار الکتریکی فرعی، افزایش جریان الکتریکی جوشکاری و به تبع آن افزایش انرژی حرارتی ژولی شده است. در نتیجه انرژی کافی برای تولید دکمه جوشی با ابعاد بزرگ‌تر تولید شده، پراکندگی آن کاهش می‌یابد؛ بنابراین محدوده منطقه متأثر از حرارت نیز کاهش یافته است.

لازم به ذکر است که خطچین خارجی نمایش داده شده در شکل ۱۰ تا ۱۲ به کمک تصاویر میکروسکوپی با بزرگ‌نمایی بالا (۵۰۰ برابر) و مقایسه آن‌ها با تصاویر کنونی به دست آمده است. بدین صورت که نقاط انتهایی محدوده متأثر از حرارت در حداقل شش نقطه با بزرگ‌نمایی ۵۰۰ برابر در اطراف دکمه جوش تعیین شده، این نقاط به یکدیگر متصل شدند تا محدوده نشان داده شده‌ی فعلی به دست آید.

۳-۲-۲- بررسی عددی

گرایش منطقه متأثر از حرارت به سمت منطقه مابین دو جوش، در مدل

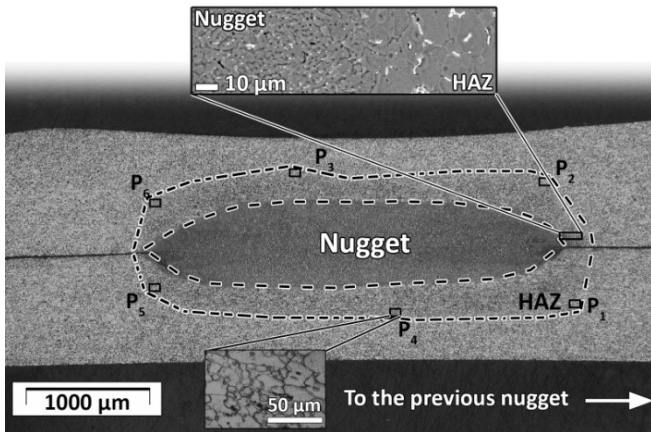


Fig. 11. Cross-section of welding nugget, distance=12.5mm (Dashed-curve demonstrates the approximate heat affected zone)

شکل ۱۱: سطح مقطع دکمه جوش تولیدشده با فاصله جوشکاری ۱۲/۵ mm (خطچین خارجی نمایش دهنده مرز تقریبی منطقه متأثر از حرارت است)

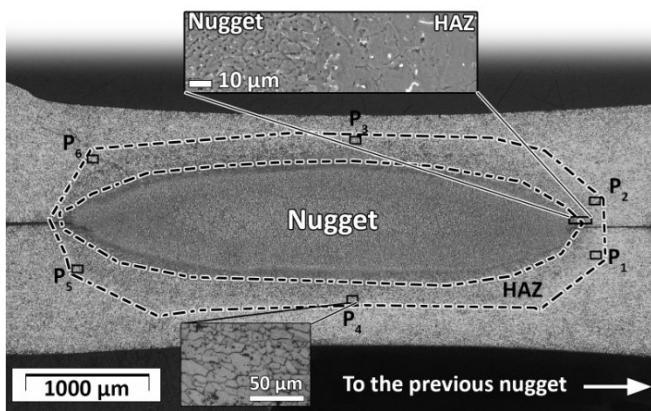


Fig. 12. Cross-section of welding nugget, distance=20mm (Dashed-curve demonstrates the approximate heat affected zone)

شکل ۱۲: سطح مقطع دکمه جوش تولیدشده با فاصله جوشکاری ۲۰ mm (خطچین خارجی نمایش دهنده مرز تقریبی منطقه متأثر از حرارت است)

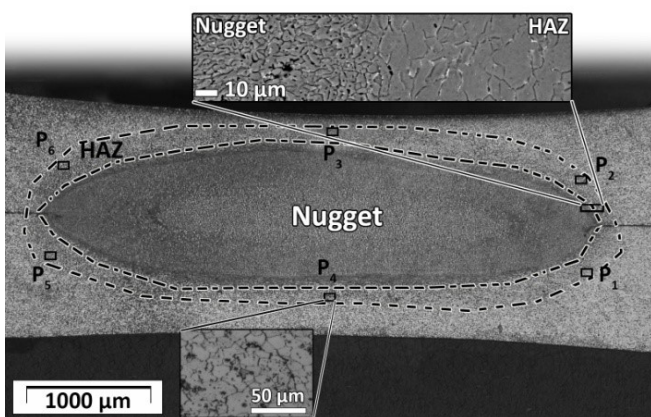


Fig. 13. Cross-section of single welding nugget (Dashed-curve demonstrates the approximate heat affected zone)

شکل ۱۳: سطح مقطع دکمه جوش منفرد (خطچین خارجی نمایش دهنده مرز تقریبی منطقه متأثر از حرارت است)

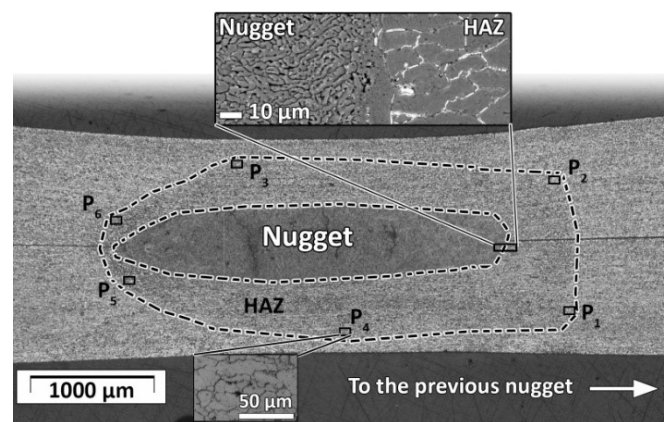


Fig. 10. Cross-section of welding nugget, distance=5mm (Dashed-curve demonstrates the approximate heat affected zone)

شکل ۱۰: سطح مقطع دکمه جوش تولیدشده با فاصله جوشکاری ۵ mm (خطچین خارجی نمایش دهنده مرز تقریبی منطقه متأثر از حرارت است)

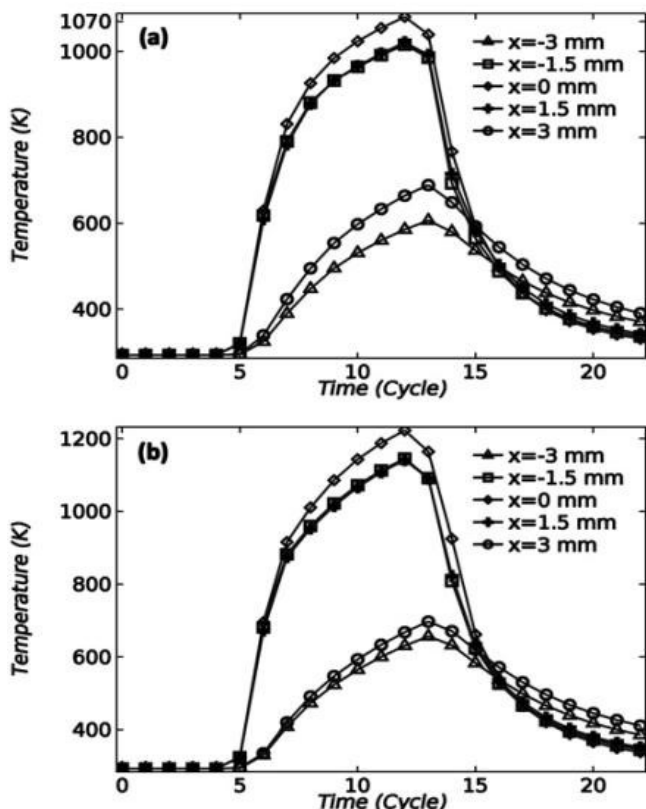


Fig. 15. Temperature variation in welding zone in finite element model; (a) distance = 5 mm, (b) distance = 20 mm (negative x lies between spots)

شکل ۱۵: روند تغییرات دما در مرکز و اطراف نقطه جوش با فاصله جوشکاری (الف) ۵ mm و (ب) ۲۰ mm، در مدل المان محدود (x منفی بین دو جوش قرار می گیرد).

مطلب است که منطقه مابین دو نقطه جوش تحت تأثیر شدید حرارت قرار داشته، این امر با کاهش فاصله جوشکاری تشدید شده است. لازم به ذکر است که افزایش دمای بیشینه با افزایش فاصله جوشکاری لزوماً به معنای افزایش حجم منطقه متأثر از حرارت نمی باشد، همان طور که در شکل ۱۰ تا ۱۲ نیز این مطلب دیده شده است. جهت توجیه این امر بایستی به توزیع دمایی به دست آمده در شکل های ۱۶ و ۱۷ توجه نمود. این تصاویر نشان می دهند که افزایش فاصله جوشکاری علاوه بر افزایش دمای بیشینه در مرکز، باعث افزایش تمرکز آن نیز شده است. این بدان معناست که محدوده ذوب به واسطه افزایش تمرکز انرژی حرارتی افزایش پیدا کرده، محدوده منطقه تحت تأثیر حرارت به همان نسبت کاهش یافته است. در حالی که با کاهش فاصله جوشکاری علاوه بر کاهش دمای بیشینه در مرکز دکمه جوش، تمرکز انرژی روی آن کاهش یافته، محدوده دمایی لازم جهت ایجاد منطقه تحت تأثیر حرارت گسترش یافته، به سمت نقطه جوش قبلی سوق پیدا کرده است.

نکته مهم دیگری که در شکل های ۱۰ تا ۱۳ دیده می شود تأثیر شدید شار الکتریکی فرعی بر کاهش عمق نفوذ جوش بوده است. این قضیه با بررسی نتایج تحلیل المان محدود به دست آمده در شکل های ۱۸ (a) و

شبه سازی و با توجه به تغییرات دمای ایجاد شده در دکمه جوش و اطراف آن نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

با مقایسه تغییرات دما برای پنج نقطه روی خط مرکزی نقطه جوش در شکل های ۱۴ و ۱۵ عدم تقارن نرخ تغییرات دما در نقطه جوش مجاور دیده می شود (شکل ۱۵). این عدم تقارن با افزایش فاصله جوشکاری کاهش یافته است (شکل ۱۵ (a) و (b)); بنابراین افزایش فاصله باعث افزایش تقارن نرخ کاهش و افزایش دما در منطقه متأثر از حرارت شده است.

مقایسه ی شکل ۱۵ (a) و (b) نشان می دهد که افزایش فاصله جوشکاری از ۵ mm به ۲۰ mm باعث افزایش اختلاف دمای نقطه ی مرکزی ($x = 0$) از حدود ۵۰۰ K به ۶۰۰ K شده است. دلیل اصلی این امر کاهش اثر شار الکتریکی فرعی در فواصل بلند جوشکاری است که باعث افزایش تولید حرارت ژولی در سطح تماس دو ورق و کاهش تولید حرارت در منطقه متأثر از حرارت می شود.

شکل ۱۶ و ۱۷ توزیع دمای پیش بینی شده را به ترتیب به کمک خطوط هم دما و پروفیل دمایی ایجاد شده روی خط عبور کننده از سطح تماس دو ورق در زمان گرمایش و کاهش دما نشان می دهد. با مقایسه ی توزیع دمای به دست آمده در این دو شکل می توان به عدم تقارن توزیع دما در جوش نهایی پی برد. البته این عدم تقارن در هنگام کاهش دما بیشتر قابل رؤیت است. همان طور که دیده می شود در فواصل کمتر، مناطق بین دو جوش در دمای بالاتری قرار دارند؛ بنابراین می توان گفت که اثر شار الکتریکی فرعی در ایجاد منطقه ی متأثر از دما در فاصله جوشی کمتر، بیش از اثر آن در فاصله ی بلندتر است.

بررسی تمام نتایج پیش بینی شده توسط مدل المان محدود در این قسمت در زمینه توزیع و نرخ دمای ایجاد شده در اطراف نقطه جوش های منفرد و متوالی رشد نامتقارن منطقه تحت تأثیر حرارت را به سمت نقطه جوش قبلی اثبات می نماید. در واقع توزیع دمای بالایی که در نقطه جوش های متوالی نسبت به نقطه جوش منفرد بین دو نقطه جوش ایجاد شده است بیانگر این

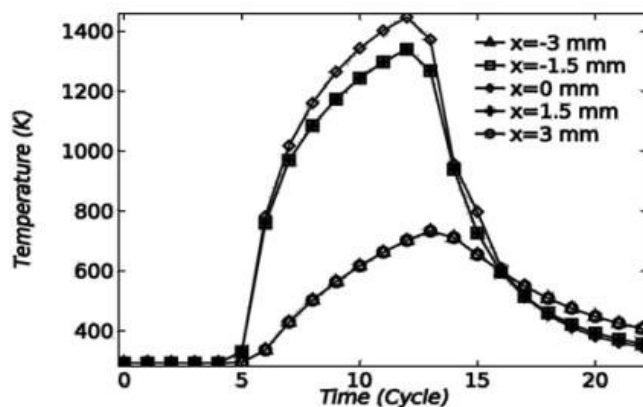


Fig. 14. Temperature variation in welding zone in finite element model
شکل ۱۴: روند تغییرات دما در مرکز و اطراف نقطه جوش منفرد در مدل المان محدود

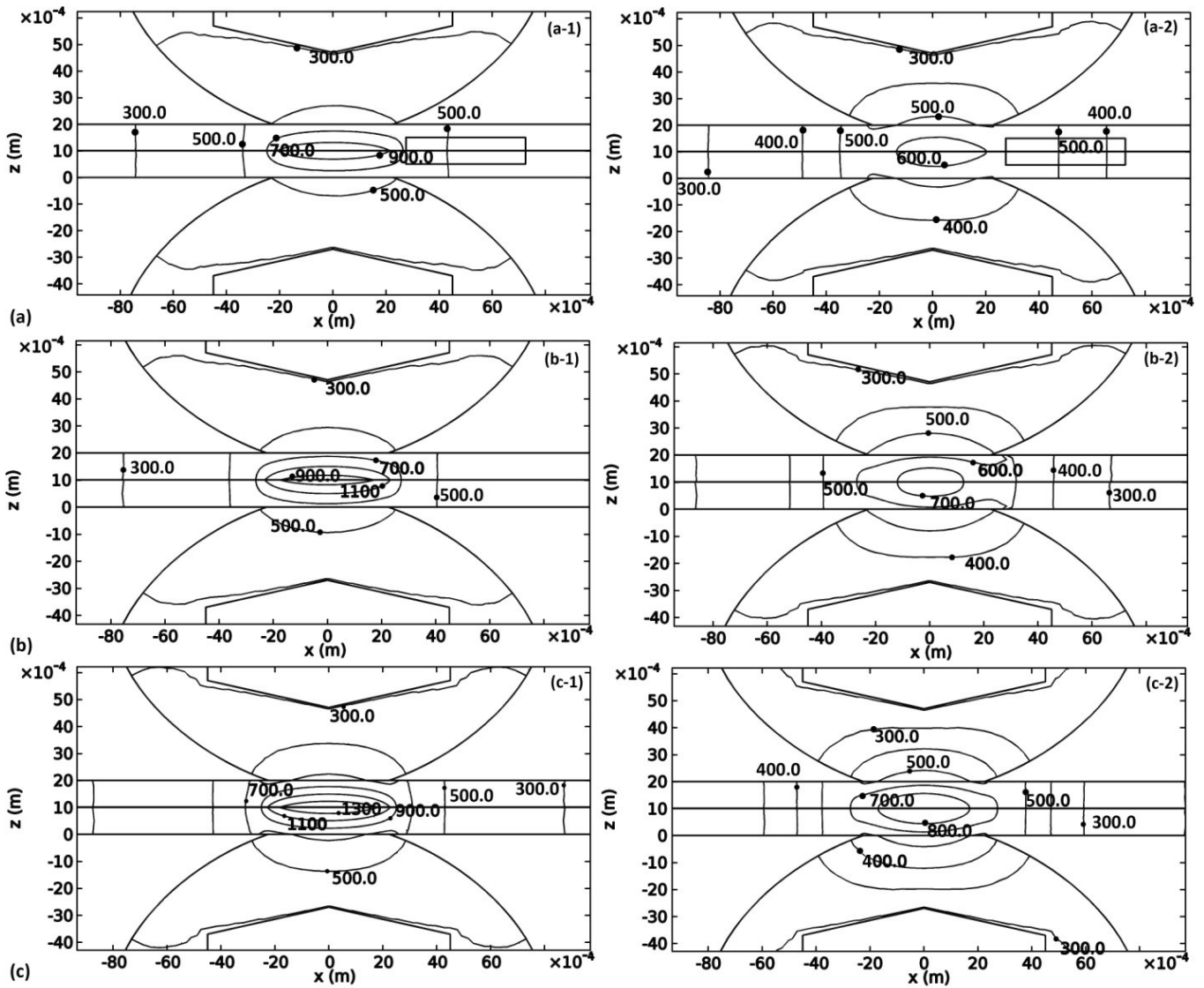


Fig. 16. Temperature distribution during (1) heating phase (0.02 s before switching off the welding current), (2) cooling phase (0.02 s after switching off the welding current) for (a) distance = 5 mm, (b) distance = 20 mm, (c) single spot, using isothermal curves in K

شکل ۱۶: توزیع دمای پیش‌بینی شده در حین (۱) گرمایش (۲ ثانیه قبل از قطع جریان جوشکاری)، (۲) کاهش دما (۲ ثانیه پس از قطع جریان جوشکاری)، برای فاصله جوشکاری (الف) ۵ mm و (ب) ۲۰ mm و (ج) نقطه جوش منفرد به صورت خطوط هم‌دما بر حسب کلین

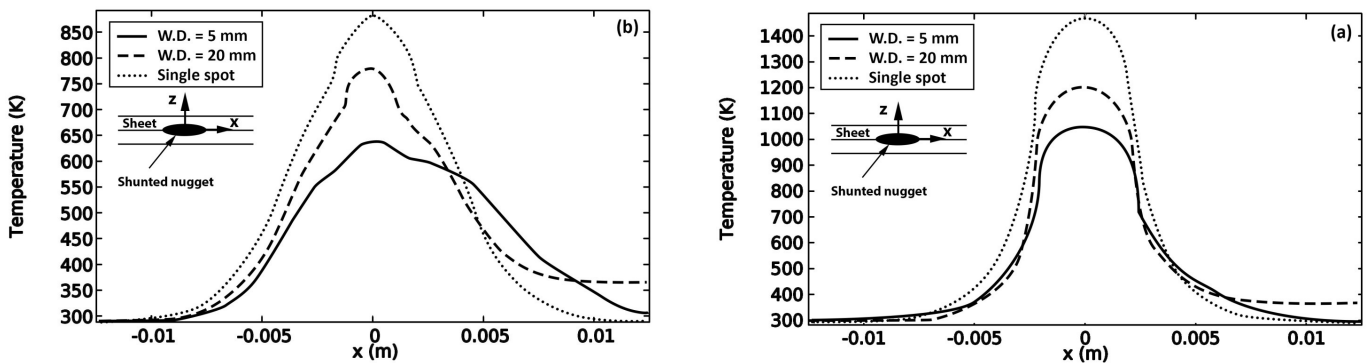


Fig. 17. Predicted temperature distribution during (a) heating phase, (b) cooling phase, for different distances using temperature profiles obtained on x axis

شکل ۱۷: توزیع دمای پیش‌بینی شده در حین (الف) گرمایش و (ب) کاهش دما برای فواصل جوشکاری مختلف به صورت پروفیل دمایی به دست آمده در سطح تماس، روی محور x

۳-۳- تأثیر فاصله جوشکاری بر ریزساختار دکمه جوش و منطقه متأثر از حرارت

یکی از مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده پس از بررسی ریزساختار مقطع دکمه جوش به‌دست‌آمده، افزایش تمرکز عناصر آلیاژی در مرز دانه‌های منطقه‌ی متأثر از دما بوده است که با کاهش فاصله جوشکاری افزایش یافته است (شکل ۱۹). همین قضیه در شکل‌های ۲۰ تا ۲۲ به صورت نمودار توزیع عناصر آلومینیوم و مس بر روی مرز دانه‌های منطقه متأثر از حرارت نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در این تصاویر نیز توزیع عنصر مس در مرز دانه‌ها بیش از عنصر آلومینیوم است. لازم به ذکر است که منحنی‌های مربوط به توزیع سایر عناصر موجود در این آلیاژ به منظور تأکید بر عنصر مس حذف شده، منحنی‌های موجود مجدداً با کیفیت بالاتری رسم شده‌اند. شکل ۲۳ این قضیه را برای عنصر مس نشان می‌دهد. در این دو شکل (شکل‌های ۱۹ و ۲۳) وضعیت جوشکاری با فاصله (الف) ۵ mm، (ب) ۲۰ mm و پیش از جوشکاری (ج) برای آلیاژ موردنظر نمایش داده شده‌اند و به‌سادگی قابل مقایسه هستند. نقاط روشن نمایش‌دهنده‌ی وجود عنصر مس می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که افزایش شار الکتریکی فرعی باعث کاهش یکنواختی در ریزساختار جوش حاصل، به‌ویژه در منطقه متأثر از حرارت شده است. دلیل اصلی این پدیده را می‌توان با کاهش دمای جهت‌دار منطقه متأثر

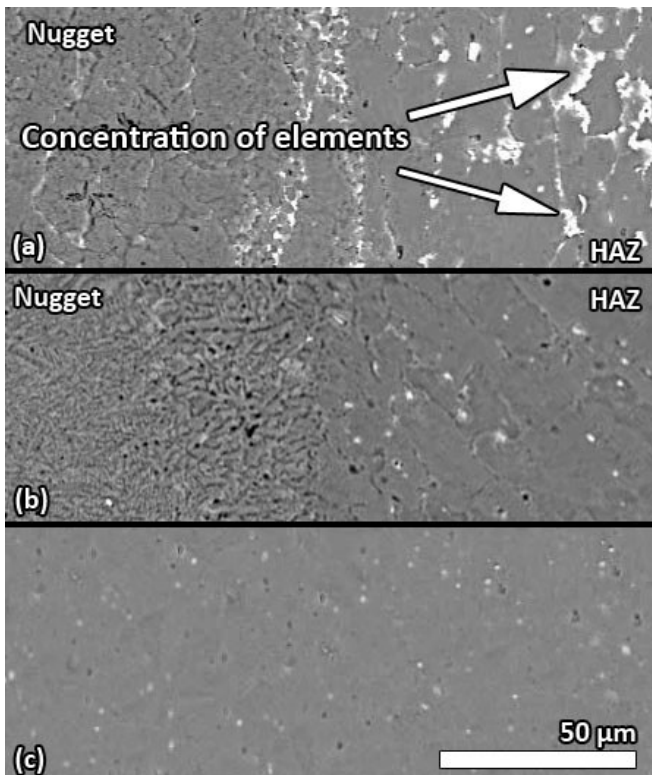


Fig. 19. Scanning electron microscope images of nugget section for (a) distance = 5 mm, (b) distance = 20 mm, (c) raw sheet

شکل ۱۹: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع دکمه جوش، با فاصله جوشکاری (الف) ۵ mm و (ب) ۲۰ mm و (ج) تصویر SEM ورق قبل از جوشکاری.

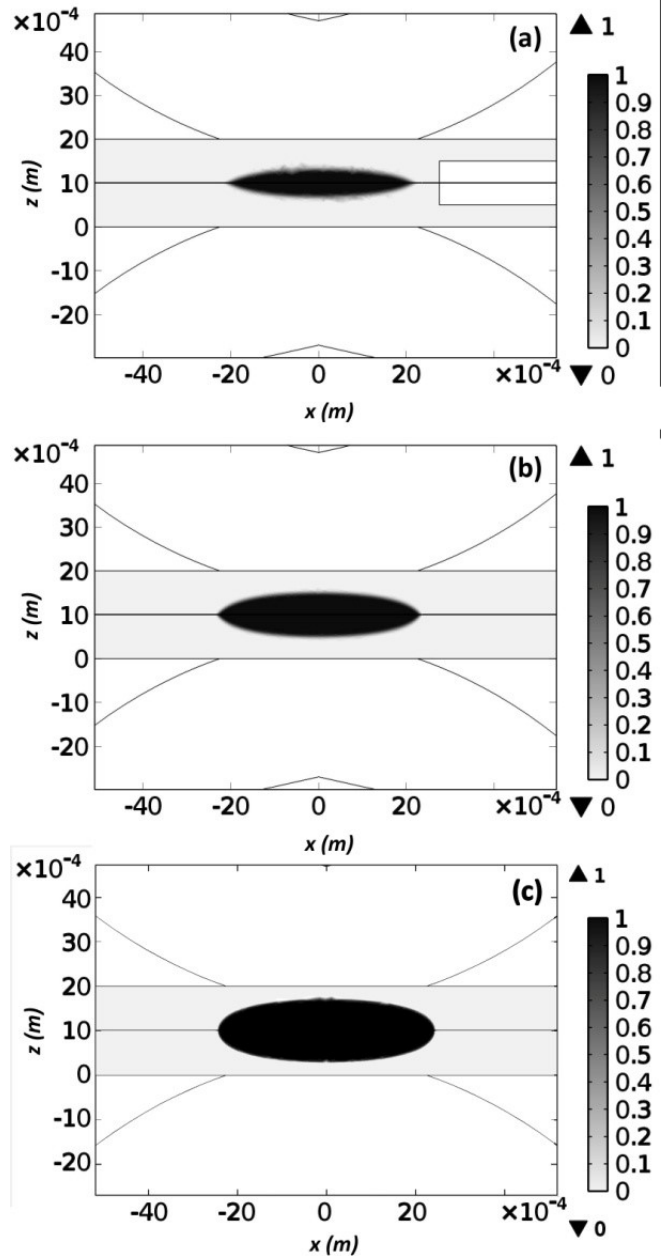


Fig. 18. Maximum ratio of liquid phase before switching off the welding current, for (a) distance = 5 mm, (b) distance = 20 mm, and (c) single spot; welding current = 25.3 kA, welding time = 6 cycles (Dimensions in mm)

شکل ۱۸: نسبت فاز مایع بر کل، در زمان ذوب حداکثر، پیش از قطع جریان الکتریکی، برای فاصله جوشکاری (الف) ۵ mm و (ب) ۲۰ mm و (ج) نقطه جوش منفرد با جریان جوشکاری ۲۵/۳ kA و زمان جوشکاری ۶ cycles (ابعاد بر حسب mm)

(b) در زمینه ابعاد دکمه جوش تحت اثر شار الکتریکی فرعی برای فواصل مختلف جوشکاری به‌وضوح قابل مشاهده است. در واقع نتایج پیش‌بینی‌شده نیز بیان‌کننده این مطلب هستند که افزایش فاصله‌ی جوشکاری باعث افزایش قابل توجه عمق نفوذ جوش می‌شود.

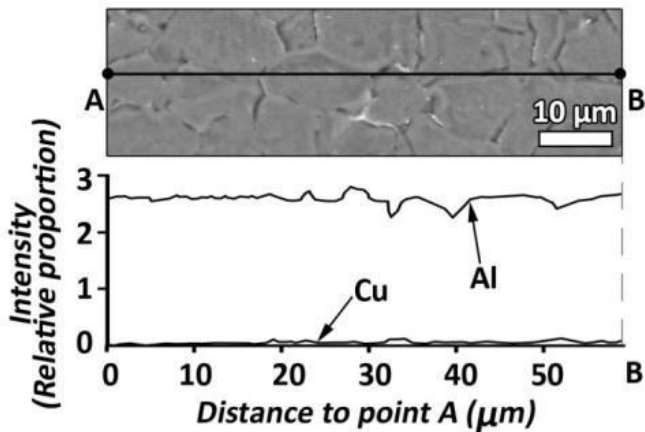


Fig. 22. Al and Cu distribution along A-B line, overlaid on Scanning electron microscope image of heat affected zone of single welding nugget
 شکل ۲۲: توزیع عناصر آلومینیوم و مس روی خط A-B، در تصویر SEM منطقه متأثر از حرارت دکمه جوشی منفرد [۳۰]

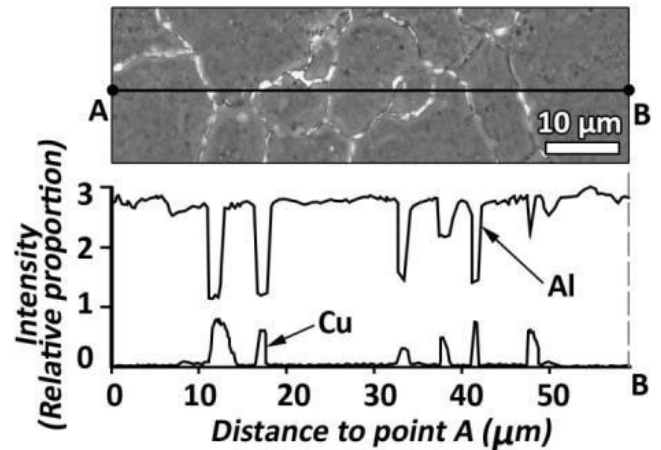


Fig. 20. Al and Cu distribution along A-B line, overlaid on Scanning electron microscope image of heat affected zone of welding nugget for welding distance of 5 mm

شکل ۲۰: توزیع عناصر آلومینیوم و مس روی خط A-B، در تصویر SEM منطقه متأثر از حرارت دکمه جوشی ایجادشده با فاصله جوشکاری ۵ میلی‌متر [۳۰]

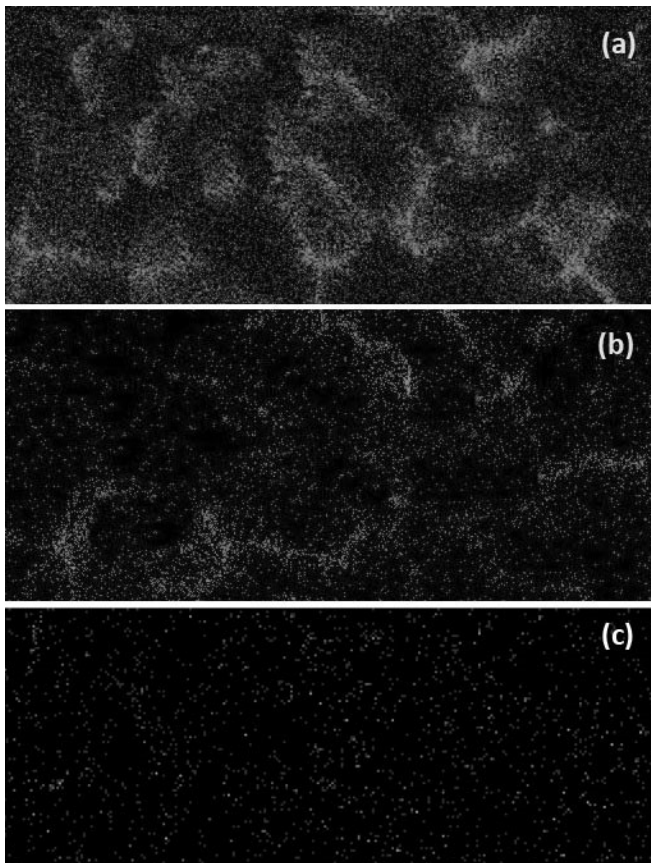


Fig. 23. Concentration of Cu in heat affected zone for (a) distance = 5 mm, (b) distance = 20 mm, (c) distance = 20 mm, and (d) raw sheet (White particles represent Cu)

شکل ۲۳: میزان تمرکز عنصر آلیاژی مس در منطقه متأثر از حرارت، برای فاصله جوشکاری (الف) ۵ mm و (ب) ۲۰ mm با بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰ برابر. (ج) توزیع مس در ورق، قبل از جوشکاری (نقاط روشن نمایش‌دهنده‌ی عنصر آلیاژی مس هستند)

پایین‌تر (شکل ۱۹ (a) و شکل ۲۰) این امر آشکارتر است. این امر اثر منفی شار الکتریکی فرعی را بر کیفیت جوش حاصل اثبات می‌نماید.

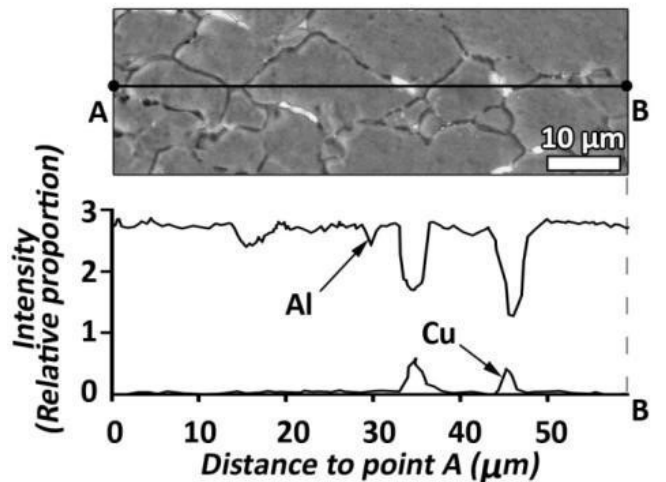


Fig. 21. Al and Cu distribution along A-B line, overlaid on Scanning electron microscope image of heat affected zone of welding nugget for welding distance of 20 mm

شکل ۲۱: توزیع عناصر آلومینیوم و مس روی خط A-B، در تصویر SEM منطقه متأثر از حرارت دکمه جوشی ایجادشده با فاصله جوشکاری ۲۰ میلی‌متر [۳۰]

از حرارت در نقطه‌جوش‌های تحت تأثیر شار الکتریکی فرعی مرتبط دانست. یکی از دلایل جدایش یا تمرکز عناصر آلیاژی کاهش دمای جهت‌دار آلیاژ به‌ویژه در زمان انجماد است [۳۱]. گرچه در منطقه متأثر از حرارت ذوب رخ نمی‌دهد اما با توجه به شیب دمایی به‌دست‌آمده و پایین‌تر بودن دمای ذوب آلومینیوم نسبت به مس، عنصر مس توانایی جابجایی و قرار گرفتن در مرز دانه‌های منطقه متأثر از حرارت را پیدا نموده، جهت دستیابی به شرایط پایدارتر روی این مناطق قرار می‌گیرد. مسلماً هرچه دمای منطقه متأثر از حرارت بالاتر باشد، عنصر مس نیز آزادی عمل بیشتری پیدا کرده (ضریب نفوذ آلومینیوم بالاتر رفته)، این قضیه تشدید می‌شود. لذا در فاصله جوشکاری

۴- جمع بندی

به طور کلی می‌توان گفت که شار الکتریکی فرعی از دو جهت تأثیر مهمی بر کیفیت نهایی دکمه جوش دارد. اول اینکه وجود شار الکتریکی فرعی باعث کاهش انرژی لازم جهت تولید دکمه جوش شده، ابعاد آن را نسبت به حالت نقطه جوش منفرد کاهش می‌دهد. دوم اینکه تأثیر آن در عدم تقارن در توزیع پتانسیل الکتریکی و به تبع آن توزیع دما، علاوه بر عدم تقارن رشد منطقه متأثر از دما باعث تمرکز عناصر آلیاژی در مرز این منطقه شده است. این دو مقوله کیفیت مکانیکی و متالورژیکی دکمه جوش را تحت تأثیر قرار داده، علاوه بر کاهش استحکام مکانیکی باعث بر هم زدن یکنواختی ساختار متالورژیکی آن می‌شود. لذا دکمه جوشی که تحت شار الکتریکی فرعی قرار دارد دارای عملکرد مکانیکی و متالورژیکی ضعیف‌تری نسبت به نقطه جوش منفرد خواهد بود. این عملکرد شامل نوع شکست، تردی و استحکام مورد نیاز در محصول می‌شود. لازم به ذکر است که جهت دستیابی به یک قانون کلی در زمینه تأثیر شار الکتریکی فرعی نیاز به بررسی مواد و آلیاژهای دیگر نیز می‌باشد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله اثر شار الکتریکی فرعی جوش نقطه‌ای مقاومتی ورق‌های AA2219 با ضخامت ۱ mm به صورت تجربی و عددی مورد تحلیل قرار گرفت. فاصله به همراه جریان و زمان جوشکاری به عنوان سه عامل طراحی آزمایش گزینش شدند. وابستگی دمایی خواص جنس در مدل المان محدود رعایت شد. به عنوان نتیجه کلی اثر منفی شار الکتریکی فرعی بر تضعیف مکانیکی (کاهش ابعاد) و تخریب کیفیت متالورژیکی (عدم تقارن منطقه متأثر از حرارت و عدم یکنواختی در توزیع عناصر آلیاژی) به صورت نتایج عددی و تجربی اثبات گردید. همچنین جهت کشف فاصله جوشکاری بهینه برای جلوگیری از آثار منفی شار الکتریکی منفی، پارامتر فاصله مورد بررسی گسترده‌تری قرار گرفت. موارد زیر به عنوان نتایج به دست آمده از این پژوهش قابل ذکر است:

- نتایج عددی و تجربی تطابق قابل قبولی با یکدیگر دارند، گرچه پراکندگی‌های جزئی ناشی از تفاوت مقادیر واقعی و تعریف شده‌ی خواص تماسی و دکمه جوش قبلی در برخی نتایج دیده می‌شود.
- بررسی عددی و تجربی سطح مقطع دکمه جوش اثر عمده‌ی شار الکتریکی فرعی را بر عمق نفوذ ثابت نمود. همچنین گرایش منطقه متأثر از حرارت به سمت منطقه مابین دو جوش در تصاویر تجربی مشاهده شده، در نتایج عددی به صورت عدم تقارن در توزیع دما و تغییرات آن اثبات شده است.
- با توجه به فواصل جوشکاری مورد بررسی، برتری فاصله ۲۰ میلی‌متر بر ۵ میلی‌متر از نظر ارتقای کیفیت متالورژیکی و مکانیکی برای این آلیاژ و ضخامت ورق دیده می‌شود.
- تصاویر میکروسکوپ الکترونی اثر شار الکتریکی فرعی را بر تمرکز

عناصر آلیاژی در مرز دانه‌های منطقه متأثر از حرارت اثبات نمود.

- تأثیر فاصله جوشکاری بر افزایش ابعاد دکمه جوش، افزایش تقارن منطقه متأثر از حرارت و کاهش تمرکز عناصر آلیاژی در مرز دانه‌های متأثر از حرارت در نتایج تجربی و عددی به وضوح مشاهده شد.

فهرست علائم

A	سطح تماس، سطح تماس ظاهری، m^2
a	شتاب، m/s^2
b	شتاب گرانش، m/s^2
C	الاستیک-پلاستیک-ضریب
c	ظرفیت گرمایی ویژه، $J/(kg^\circ C)$
D	چگالی جرمی، kg/m^3
d	تفاضل
E	مدول الاستیسیته، GPa
F	نیرو
H	حرارت نهان
h	ضریب جابجایی حرارتی
I	جریان الکتریکی، A
k	ضریب رسانش حرارتی، $W/(m^\circ C)$
L	ضخامت مشخصه، m
\vec{n}	بردار یکه عمود بر سطح
R	مقاومت الکتریکی، Ω
T	دما، $^\circ C$
t	زمان، s
x	مختصه مکان در جهت محور x ، m
y	مختصه مکان در جهت محور y ، m
z	مختصه مکان در جهت محور z ، m

علامت یونانی

α	ضریب انبساط حرارتی خطی، $1/K$
Δ	تفاضل نسبی
ϵ	کرنش
ρ	مقاومت الکتریکی توده‌ای، $\Omega.m$
σ	تنش، Pa
∂	عملگر دیفرانسیل جزئی
ϕ	پتانسیل الکتریکی، V

resistance spot welding processes by a 3-D finite element method, *Journal of Materials Processing Technology*, 63(1) (1997) 672-677.

عملگر گرادیان	∇
زیر نویس	
آب	W
هوا	A
متوسط	ave
تماس	C
مابین الکتروود و ورق	ES
الکتروود، حد الاستیک	e
لیکوئیدوس	l
ذوب	m
حداکثر	p
سالیدوس	s
دکمه جوش قبلی	Sh
مابین دو ورق	SS
حرارتی	T

- [10] N. Ma, H. Murakawa, 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(14) (2010) 2045-2052.
- [11] C.L. Tsai, W.L. Dai, D.W. Dickinson, Analysis and development of a real-time control methodology in resistance spot welding, *SAE transactions*, (1991) 158-176.
- [12] T. Loulou, P.L. Masson, P. Rogeon, Thermal characterization of resistance spot welding, Numerical Heat Transfer, *Part B: Fundamentals*, 49(6) (2006) 559-584.
- [13] J. Shen, Y. Zhang, X. Lai, P. Wang, Modeling of resistance spot welding of multiple stacks of steel sheets, *Materials & Design*, 32(2) (2011) 550-560.
- [14] H. Nied, The finite element modeling of the resistance spot welding process, *Weld. J.*, 63(4) (1984) 123.
- [15] W. Zhang, Design and implementation of software for resistance welding process simulations, 0148-7191, *SAE Technical Paper*, 2003.
- [16] J.H. Kim, Y. Cho, Y.H. Jang, Estimation of the weldability of single-sided resistance spot welding, *Journal of Manufacturing Systems*, 32(3) (2013) 505-512.
- [17] M. Hamed, H. Eisazadeh, M. Esmailzadeh, Numerical simulation of tensile strength of upset welded joints with experimental verification, *Materials & Design* (1980-2015), 31(5) (2010) 2296-2304.
- [18] X. Sun, P. Dong, Analysis of aluminum resistance spot welding processes using coupled finite element procedures, *WELDING JOURNAL-NEW YORK-*, 79(8) (2000) 215-S.
- [19] Z. Hou, I.-S. Kim, Y. Wang, C. Li, C. Chen, Finite element analysis for the mechanical features of resistance spot welding process, *Journal of Materials Processing Technology*, 185(1-3) (2007) 160-165.
- [20] J. Sessler, V. Weiss, *Materials data handbook-aluminum alloy 2219*, (1966).
- [21] J. Bray, Properties and selection: Nonferrous alloys and special purpose materials, *ASM Metals handbook*, 92 (1990).
- [22] MIL-HDBK-, 5J: *Metallic materials and elements for aerospace vehicle structures*, in, Department of Defense Washington, DC, 2003.
- [23] M. Vogler, S. Sheppard, Electrical contact resistance

منابع

- [1] A. Hard, „Preliminary test of spot weld shunting in 24ST Alclad”, *Welding Journal*, 27(6) (1948) 491-495.
- [2] H. Chang, H. Cho, A study on the shunt effect in resistance spot welding, *Welding Journal*, 69(8) (1990) 308-316.
- [3] P. Howe, Spot weld spacing effect on weld button size, in: Sheet Metal Welding Conference VI, *Paper C*, 1994.
- [4] B. Wang, M. Lou, Q. Shen, Y. Li, H. Zhang, „Shunting effect in resistance spot welding steels—part 1: experimental study”, *Welding Journal*, 92(6) (2013) 182s-189s.
- [5] J. Senkara, H. Zhang, Cracking in spot welding aluminum alloy AA5754, *WELDING JOURNAL-NEW YORK-*, 79(7) (2000) 194-s.
- [6] H. Zhang, J. Senkara, X. Wu, Suppressing cracking in resistance welding AA5754 by mechanical means, *Journal of manufacturing science and engineering*, 124(1) (2002) 79-85.
- [7] Y. Li, B. Wang, Q. Shen, M. Lou, H. Zhang, „Shunting effect in resistance spot welding steels—part 2: theoretical analysis”, *Welding Journal*, 92(8) (2013) 231s-238s.
- [8] M. Jafari Vardanjani, A. Araee, J. Senkara, J. Jakubowski, J. Godek, Theoretical analysis of shunting effect in resistance spot welding (RSW) of AA2219, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 39(8) (2016) 907-918.
- [9] H. Huh, W.J. Kang, Electrothermal analysis of electric

- Technology*, 2012.
- [28] Document No. III-1005-93, Section 6, Procedure for spot welding of uncoated and coated low carbon and high strength steels, *International Institute of Welding*.
- [29] M.J. Vardanjani, A. Araee, J. Senkara, J. Jakubowski, J. Godek, Experimental and numerical analysis of shunting effect in resistance spot welding of Al2219 sheets, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 64(2) (2016) 425-434.
- [30] M.J. Vardanjani, A. Araee, J. Senkara, J. Jakubowski, J. Godek, *Experimental and numerical analysis of shunting effect in resistance spot welding of Al2219 sheets*, 64(2) (2016) 425.
- [31] F.C. Campbell, *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*, ASM International, 2008.
- under high loads and elevated temperatures, *surfaces*, 9(10) (1993) 11.
- [24] M.J. Vardanjani, M. Ghayour, R.M. Homami, Analysis of the vibrational stress relief for reducing the residual stresses caused by machining, *Experimental Techniques*, 40(2) (2016) 705-713.
- [25] W.H. Kearns, *Welding handbook*, Vol. 4, Metals and their weldability, *American Welding Society*, 1982, (1982) 582.
- [26] M. Specification, MIL-W-6858D, “*Welding, Resistance: Spot and Seam*, (1978).
- [27] J. Saleem, A. Majid, K. Bertilsson, T. Carlberg, M. Nazar Ul Islam, Nugget formation during resistance spot welding using finite element model, in: World Academy of Science, *Engineering and Technology: An International Journal of Science, Engineering and*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Jafari Vardanjani, A. Araee, Shunting Effect in Resistance Spot Welded Joints of Aluminum Alloys, *Amirkabir J.*

Mech. Eng., 50(3) (2018) 561-576.

DOI: 10.22060/mej.2017.11619.5163

