



بررسی عددی اثر قطر الکتروود بر قطر دکمه جوش و توزیع دمایی در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپر آلیاژ اینکونل 625

حمیدرضا رضایی آشتیانی^{1*}، روزبه زراندوز²، مجید سهرابیان³

- 1- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک
 - 2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی اراک، اراک
 - 3- کارشناسی ارشد، مهندسی هوا-فضا، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
- * اراک، صندوق پستی 38135-1177، hr_rezaei@arakut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 25 اسفند 1393
پذیرش: 15 اردیبهشت 1394
ارائه در سایت: 03 تیر 1394

کلید واژگان:

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای
قطر نوک الکتروود
روش المان محدود
اندازه دکمه جوش
سوپر آلیاژ اینکونل 625

در میان سوپر آلیاژها، سوپر آلیاژ اینکونل 625 به دلیل خواص مکانیکی خوب، قابلیت جوش‌پذیری و مقاومت به خوردگی بالا به طور گسترده در ساخت تجهیزات صنایع نیروگاهی، هوا-فضا و صنایع معدنی به کار می‌رود. یکی از روش‌های متداول جوشکاری این آلیاژ روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای می‌باشد که در تحقیق حاضر تأثیر قطر الکتروود، با توجه به اثرات متقابل آن با دیگر پارامترها، بر توزیع دمایی فرایند و شکل گیری دکمه جوش در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپر آلیاژ اینکونل 625، با استفاده از روش اجزا محدود مورد بررسی قرار گرفته است. فرایند توسط یک مدل متقارن محوری دو بعدی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس به صورت تحلیل وابسته الکتریکی-حرارتی و غیر وابسته مکانیکی شبیه‌سازی شده است. نتایج تحلیل با استفاده از نتایج آزمایش‌های تجربی از طریق مقایسه قطر دکمه جوش اعتبارسنجی شد که دقت قابل قبول و مناسبی را نشان داد. بنابراین مدل شبیه سازی ارائه شده در این مقاله می‌تواند با دقت قابل قبولی توزیع دما و ابعاد دکمه جوش را پیش بینی کند. نتایج نشان می‌دهند که کاهش قطر الکتروود در جریان‌های ثابت موجب افزایش قطر دکمه جوش می‌شود، اما بطور کلی نمی‌توان قطر الکتروود را از یک حد مشخصی کمتر انتخاب کرد.

The numerical investigation of influence of electrode diameter on nugget diameter and thermal distribution in the resistance spot welding (RSW) of Inconel 625

Hamid Reza Rezaei Ashtiani^{1*}, Roozbeh Zarandooz¹, Majid Sohrabian²

- 1- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.
 - 2- Department of Aerospace Engineering, Iran Univ. of Science and Tech., Tehran, Iran.
- * P.O.B. 38135-1177 Arak, Iran, hr_rezaei@arakut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 March 2015
Accepted 05 May 2015
Available Online 24 June 2015

Keywords:
Resistance Spot welding (RSW)
Finite Element Method (FEM)
Nugget size
Electrode Tip Diameter
Inconel 625

ABSTRACT

Inconel 625 is a nickel-based super alloy that is widely used in power plants industry, aerospace systems, and mineral industries due to its properties such as high tensile strength, high corrosion resistance and excellent fabricability. Resistance spot welding (RSW) is one of the important joining processes for assembling super alloy sheets, due to its accuracy and high production rates. In the present research, the influences of electrode tip diameter and other RSW parameters on distribution of temperature and nugget formation are investigated by the finite element method for Inconel 625 superalloy. The process is simulated with a 2D axisymmetric coupled electro-thermal and uncoupled mechanical finite element model by ABAQUS software. The diameter of computed weld nuggets is compared with experimental results and good agreement is observed. So, FE model developed in this paper provides prediction of quality and shape of the weld nuggets and temperature distributions with variation of each process parameter suitably. The results show that increasing electrode tip diameter decreases weld nugget diameter in constant welding current, but in general, the electrode tip diameter cannot be selected less than a distinct value.

1- مقدمه

از شار جریان الکتریکی است که بین الکتروودها برقرار می‌شود و از میان قطعات نیز عبور می‌کند. ضمن اینکه الکتروودها در این وضعیت با اعمال فشاری خاص، سطوح را به هم نزدیک می‌کنند. عواملی چون شدت جریان¹، زمان جوشکاری²، فشار وارد بر ورق‌ها و تعداد پالس‌های جوش بر استحکام

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای یکی از قدیمی ترین روش‌های جوشکاری می‌باشد که کاربرد وسیعی در صنایع مختلف مانند نیروگاه، خودروسازی، هوافضا و غیره دارد. جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فرایندی است که در آن سطوح فلزی با فشار روی همدیگر قرار گرفته از طریق حرارت تولید شده در یک یا چند نقطه به یکدیگر متصل می‌شوند. گرمای تولید شده در این نقاط، حاصل

- 1- Welding Current
- 2- Welding Time (Cycle)

Please cite this article using:

H. R. Rezaei Ashtiani, R. Zarandooz, M. Sohrabian, The numerical investigation of influence of electrode diameter on nugget diameter and thermal distribution in the resistance spot welding (RSW) of Inconel 625, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 116-124, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مدل المان محدود دو بعدی و تحلیل وابسته الکتریکی-حرارتی در نرم‌افزار انسیس استفاده نمودند. آنها با استفاده از این شبیه‌سازی نحوه شکل‌گیری دکمه جوش در اتصال سه ورق و تأثیر مقاومت تماسی در توزیع دمایی را مورد بررسی قرار دادند. در سال 2012 مشیدی و ستاری فر [10] با استفاده از یک مدل المان محدود دو بعدی متقارن محوری و تحلیل الکتریکی-حرارتی- مکانیکی به بررسی تأثیر جریان و مدت زمان جوشکاری بر روی اندازه دکمه جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولادهای زنگ نزن 304 پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش زمان و جریان، اندازه دکمه جوش افزایش می‌یابد اما نرخ رشد آن کاهش می‌یابد، تا جایی که بیرون زدگی رخ دهد، از آن به بعد اندازه دکمه جوش کاهش خواهد یافت. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که زمان تأثیر کمتری نسبت به جریان بر روی اندازه دکمه جوش دارد.

بررسی تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که مهمترین عوامل مؤثر در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای و تشکیل نقطه جوش، جریان عبوری، مدت زمان اعمال جریان، مقاومت الکتریکی ورق‌ها، مقاومت الکتریکی محل تماس، نیروی الکتروودها، ابعاد الکتروودها و ضخامت ورق‌ها می‌باشند. اندازه دکمه جوش و چگونگی تشکیل آن به میزان و سرعت تولید حرارت در موضع جوش بستگی دارد. از طرف دیگر رابطه بین عوامل شدت جریان، زمان، نیرو و ابعاد الکتروودها و نقش آنها در چگونگی تشکیل و رشد دکمه جوش موجب ایجاد روابط بسیار پیچیده بین این عوامل می‌شود. همچنین تحقیقات نشان داد که تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با فرایند جوشکاری مقاومتی آلیاژهای آلومینیوم [11] و فولادهای مختلف [12] و همچنین روش‌های مختلف اتصال سوپرآلیاژ اینکونل 625 از قبیل جوشکاری پلاسما [13]، لیزر [14] و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [15] صورت گرفته است. اما در بررسی‌ها مطالعه‌ای در رابطه با جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپر آلیاژ اینکونل 625 یافت نشد. به همین منظور در این تحقیق، جهت بررسی دقیق-تر فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپر آلیاژ اینکونل 625 و پیش‌بینی تأثیر عوامل مختلف بر اندازه دکمه جوش آن از روش تحلیل اجزا محدود استفاده شده است. با توجه به هزینه بالای سوپرآلیاژ اینکونل 625، با استفاده از شبیه‌سازی و بدون انجام آزمایشات تجربی زیاد، می‌توان تأثیر پارامترهای مختلف فرایندی را در این فرایند بررسی نمود که درک تأثیر پارامترهای فرایند در تنظیم بهینه فرایند و انتخاب مقادیر مناسب پارامترهای جوشکاری جهت حصول کیفیت جوش و کاهش ضایعات مؤثر است.

به طور کل می‌توان گفت در کلیه شبیه‌سازی‌هایی که تاکنون انجام گرفته، کمتر به بررسی تأثیر ابعاد الکتروود پرداخته شده است. بر همین اساس در این گزارش با استفاده از یک مدل متقارن دو بعدی، بر اساس تحلیل وابسته الکتریکی-حرارتی و غیر وابسته مکانیکی، علاوه بر بررسی تأثیر همزمان جریان و مدت زمان جوشکاری، به بررسی تأثیر قطر نوک الکتروود بر شکل‌گیری دکمه جوش در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپرآلیاژ اینکونل 625 پرداخته شده است.

2- مواد و آزمایشات تجربی

در این تحقیق، سوپر آلیاژ اینکونل 625 با ضخامت 0/7 میلی‌متر و ترکیب شیمیایی نشان داده شده در جدول 1، به عنوان فلز پایه استفاده شده است. مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش در حالت نورد شده و بدون اعمال هیچگونه عملیات حرارتی می‌باشد.

جوشکاری‌ها توسط دستگاه جوش نقطه‌ای ثابت با توان 100 کیلو ولت

کششی-برشی، سختی سطح موضع جوش و نیز سختی مرکز جوش مؤثر می‌باشند. برای مثال می‌توان از وابستگی قابل ملاحظه استحکام جوش به زمان جوشکاری یاد کرد [1].

سوپر آلیاژ اینکونل 625¹، آلیاژی است بر پایه نیکل که دارای مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون بالا می‌باشد. امروزه این آلیاژ در موارد مختلف مانند ساخت محفظه‌های احتراق و خطوط مواد شیمیایی، مبدل‌های حرارتی، کوره‌ها، تجهیزات مورد استفاده در تولید اسیدها، قسمت‌هایی از بدنه‌های هواپیما و غیره بکار گرفته می‌شود که در بسیاری از آنها از جوشکاری مقاومتی جهت ساخت تجهیزات استفاده می‌شود.

شبیه‌سازی فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای توسط محققین زیادی صورت گرفته است. نید با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انسیس مدلی به صورت متقارن محوری جهت حل معادلات حاکم بر فرایند جوشکاری مقاومتی ایجاد نمود و نتایج حاصل از آن را با نتایج آزمایشگاهی جوشکاری فولاد ضد زنگ 316 مقایسه نمود [2]. در سال 1992، ولگار و شپارد با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مقاومت تماسی فصل مشترک دو قطعه در دما و نیروهای زیاد را اندازه‌گیری نمودند و همچنین با استفاده از مدل المان محدود وابسته الکتریکی-حرارتی تأثیر این پارامتر مهم را در جوشکاری بررسی کردند [3]. دارویش و همکارانش [1]، یک مدل آماری را برای فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های آلومینیوم پیشنهاد کردند. آنها تأثیر پارامترهای جریان، زمان، نیروی الکتروود و ضخامت ورق را بر استحکام جوش بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تا حد امکان نیروی الکتروود کم‌تر انتخاب شود تا در مصرف توان صرفه جویی شود. همچنین نشان دادند که در زمان‌های جوشکاری پایین‌تر، بهترین کیفیت جوش تحت اثر کمترین نیروی الکتروود و بیشترین جریان حاصل می‌شود. سان و دنگ یک مدل حرارتی-مکانیکی را جهت تحلیل تغییر شکل‌های ناشی از جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای توسعه داده و نشان دادند که سطوح تماس نقش بسیار مهمی را در جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم ایفا می‌کنند [4]. مارتین و همکارانش به بررسی اثر پارامترهای جوش نقطه‌ای بر خصوصیات فیزیکی جوش با استفاده از شبکه‌های عصبی پرداختند [5]. در سال 2007 کیم و همکارانش [6] با استفاده از یک مدل المان محدود دو بعدی متقارن محوری و با استفاده از تحلیل ترمو-الاستیک-پلاستیک به بررسی رفتار مکانیکی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای پرداختند. آنها در تحقیق خود توزیع تنش، کرنش و تغییر شکل‌های ناشی از جوشکاری و جابجایی الکتروود در طول جوشکاری را مورد بررسی قرار دادند. سراج زاده و همکارانش [7] در سال 2008 از یک مدل المان محدود الکتریکی-حرارتی-مکانیکی جهت بررسی تأثیرات حرارت و ورودی و مدت زمان جوشکاری بر توزیع تنش پسماند ناشی از جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای استفاده نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که حداکثر تنش پسماند کششی در مرکز جوش ایجاد شده و با دور شدن از مرکز جوش مقدار این تنش کاهش می‌یابد. در سال 2010 عیسی زاده و همکارانش یک مدل المان محدود، برای مطالعه پارامتری اندازه دکمه جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ارائه و با استفاده از نتایج تجربی مدل خود را بازبینی نمودند. آنها تأثیر مقاومت تماسی و نیروی الکتروود بر اندازه و شکل دکمه جوش را بررسی کردند و متوجه شدند که با افزایش نیروی الکتروود، اندازه دکمه جوش به علت کاهش مقاومت تماسی کاهش خواهد یافت [8]. لی و همکارانش [9] در سال 2011 جهت شبیه‌سازی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سه ورق فولادی از یک

که در آن $\sigma^E(\theta, f^E)$ ماتریس رسانایی الکتریکی می‌باشد. $\theta = \theta(x, y, z, t)$ متغیر دما است که تابع زمان و مختصات می‌باشد. $J = -J \cdot n$ چگالی جریان اعمالی به سطح مقطع S می‌باشد که متناظر است با $\sigma^E \cdot \partial \phi / \partial x$ و f^E شامل تمام حالات مختلف در نظر گرفته شده برای شرایط اولیه می‌باشد.

به طور کل مسأله‌های وابسته حرارتی الکتریکی توسط معادله ماتریسی (4) حل می‌شوند [16]:

$$\begin{bmatrix} [C^t] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{T} \\ \dot{V} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K^t] & [0] \\ [0] & [K^v] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T \\ V \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q \\ I \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$[C]$ ماتریس گرمای ویژه، $[K]$ ماتریس رسانایی حرارتی، $[K^v]$ ماتریس ضریب الکتریکی، $\{T\}$ بردار دما، $\{V\}$ بردار پتانسیل الکتریکی، $\{Q\}$ بردار جریان حرارتی و $\{I\}$ بردار جریان است.

3-1- انتقال حرارت در جوشکاری

بررسی‌ها نشان می‌دهد، به دلیل اینکه در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، دمای سطح ورق‌ها خیلی بالا نمی‌باشد، انتقال حرارت جابجایی و تشعشع نقش قابل ملاحظه‌ای در انتقال حرارت ندارند و در مقایسه با انتقال حرارت هدایتی قابل چشم پوشی می‌باشند [7]. انتقال حرارت هدایت نیز بر اساس خصوصیات فیزیکی ماده تعیین می‌شود که در این تحقیق ضریب هدایت حرارتی مواد بر اساس دما تعریف شده است.

در سطوح خارجی قطعات که انتقال حرارت جابجایی و تشعشع وجود دارد، شرایط مرزی نیز متناسب با شرایط جوشکاری، به صورت ترکیبی از اتلافات حرارتی تشعشعی و جابجایی تعیین می‌شود. ضریب انتقال حرارت همرفتی تابع پارامترهای زیادی از قبیل جریان و کیفیت سطح می‌باشد، اما می‌توان از رابطه پیشنهادی دنگ [17] به منظور اعمال شرایط مرزی حرارتی که ترکیبی از انتقال حرارت جابجایی و تشعشعی کلیه سطوح با محیط اطراف است استفاده کرد.

در این رابطه ضریب انتقال حرارت ترکیبی به صورت روابط (5.6) بیان می‌شود:

$$h_{total} = \begin{cases} 0.0668T & \left(\frac{W}{m^2}\right) & 0 < T < 500^\circ C \\ 0.231T - 82.1 & \left(\frac{W}{m^2}\right) & T > 500^\circ C \end{cases} \quad (5)$$

$$q = h_{total}(T_s - T_{sur}) \quad (6)$$

که در آن T_s و T_{sur} به ترتیب دمای سطح و دمای محیط اطراف و h_{total} ضریب انتقال حرارت کل می‌باشد.

3-2- مقاومت الکتریکی سطح تماس

مقاومت تماسی یکی از مهمترین عوامل مؤثر در تحلیل حرارتی ژول می‌باشد و به پارامترهای متعددی از قبیل دما، فشار، سختی، استحکام، صافی سطح و غیره وابسته می‌باشند. در این تحقیق تنها به بررسی تأثیر دما بر مقاومت تماسی پرداخته شده است و با توجه به اینکه مقاومت تماسی بین الکتروود و قطعه کار در مقایسه با مقاومت تماسی بین قطعه کار با قطعه کار بسیار کوچک می‌باشد، از آن صرف نظر شده است.

مقاومت الکتریکی تماسی σ_g را می‌توان با رابطه‌ای که توسط سان و همکارش [4] معرفی شده است، به دست آورد:

$$\sigma_g = \frac{1}{\rho h} = \frac{1}{R_c A_c} = \frac{I}{2\sqrt{L(T_s^2 - T_0^2)}\pi r_c^2} \quad (7)$$

در این فرمول L ثابت لورنتز می‌باشد که برای بیشتر فلزات در حدود

آمپر ساخت شرکت پارس پایا و مدل MST-100 بر روی ورق‌هایی با ابعاد 30×30 انجام شده است. این دستگاه قابلیت تنظیم دیجیتالی تمامی متغیرهای جوشکاری نقطه‌ای را دارا می‌باشد که محدوده پارامترهای مورد استفاده در این مقاله در جدول 2 نشان داده شده است. همچنین برای جوش دادن نمونه‌ها از الکتروود گروه آ، مطابق کلاس 2 دسته بندی RWMA استفاده شد. جنس این الکتروود از آلیاژ مس-کروم-زیرکونیوم با قطر نوک $4/7$ میلی-متر می‌باشد.

برای بررسی مشخصه‌های هندسی جوش و مقایسه آن با نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های جوش داده شده در پارامترهای مختلف برش خورده و پس از مانع شدن، توسط محلولی حاوی یکصد میلی لیتر اسید کلریدریک، یکصد میلی لیتر آب مقطر و چهل میلی لیتر پراکسید هیدروژن 30% اچ شده و مورد بررسی درشت‌ساختاری قرار گرفته‌اند.

3- تئوری تحلیل

حرارت لازم برای جوشکاری مقاومتی به واسطه مقاومت الکتریکی موجود در مسیر عبور جریان از قطعه کار و دقیقاً مشابه دیگر اجزا الکتریکی ایجاد می‌شود و چون به دلیل رسانایی بالای الکتروودها و ضخامت کم ورق‌ها مقاومت عبور جریان در جوش‌های مقاومتی پایین است، لذا برای تأمین گرمای جوشکاری نیازمند استفاده از جریان‌های بالای جوشکاری می‌باشد.

در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در هنگام انتقال جریان به قطعه و گرم شدن و تشکیل دکمه جوش، مقداری از گرما تلف می‌شود. این اتلاف گرما از طریق الکتروودهایی که برای جلوگیری از ذوب شدن آنها با آب خنک می‌شوند و سطوح آزاد ورق‌ها که با هوا در تماس می‌باشند صورت می‌گیرد. با استفاده از قانون فوریه و اصل بقای انرژی می‌توان معادله دیفرانسیل انتقال حرارت متقارن محوری برای شبیه‌سازی فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای را به صورت رابطه (1) نشان داد [16].

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v \quad (1)$$

ρ چگالی مواد، C ظرفیت گرمایی ویژه، T دما، t زمان، k رسانایی حرارتی و q_v نرخ حرارت درونی تولید شده می‌باشند. در صورتی که هیچ منبع تولید جریان درونی در نظر گرفته نشود، معادله دیفرانسیلی پتانسیل الکتریکی به صورت رابطه (2) خواهد بود [16]:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(C_e \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{C_e}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(C_e \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

C_e رسانایی الکتریکی و ϕ پتانسیل الکتریکی است. بر اساس قانون اهم، صورت‌های مختلف معادله (2) به صورت رابطه (3) می‌باشد [4]:

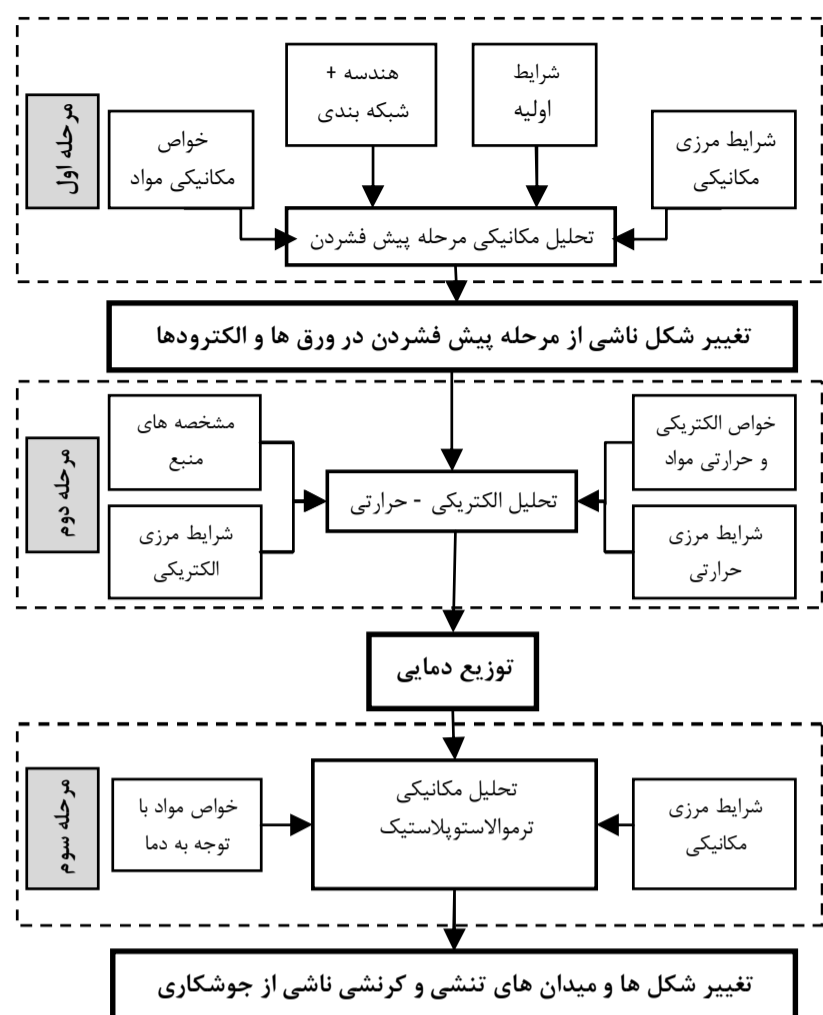
$$\int_V \frac{\partial \delta \phi}{\partial x} \cdot \sigma^E \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} dV = \int_S \delta \phi J dS \quad (3)$$

جدول 1 عناصر اصلی تشکیل دهنده سوپر آلیاژ اینکونل 625

عناصر تشکیل دهنده اصلی	نیکل	کروم	مولیبدن	آهن	نیوبیم	تیتانیوم
درصد هر عنصر (%)	59/28	21/67	8/61	4/4	2/87	0/2

جدول 2 محدوده پارامترهای مورد استفاده در انجام آزمایشات تجربی

جریان جوشکاری (کیلوآمپر)	زمان جوشکاری (سیکل)	نیروی الکتروود (نیوتون)
6 الی 7/3	6 الی 12	3400



شکل 2 مراحل روش غیر وابسته در شبیه‌سازی فرایند جوشکاری مقاومتی

مراحل کلی فرایند نشان داده شده است. در اینجا از یک مدل متقارن محوری دو بعدی ایجاد شده در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس برای مدل سازی و انجام تحلیل‌های الکتریکی، حرارتی و مکانیکی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپر آلیاژ اینکونل 625 با ضخامت 0/7 میلی‌متر استفاده شده است. لازم به ذکر است که مدل‌های مورد استفاده برای تحلیل‌های الکتریکی، حرارتی و مکانیکی دارای توپولوژی یکسان است؛ یعنی از نظر شکل، تعداد المان‌های به کار رفته نظیر به نظیر یکسان بوده ولی نوع المان‌های به کار رفته در هر تحلیل متفاوت است که در تحلیل‌های مکانیکی از المان CAX8R و در تحلیل‌های الکتریکی-حرارتی از المان DCAX8E استفاده شده است.

به علت وجود گرادیان دما و تنش در منطقه متأثر از حرارت، در این ناحیه چگالی المان‌ها افزایش یافته است. برای افزایش سرعت همگرایی تحلیل و کاهش زمان حل، شبکه المان در نواحی دور از دکمه جوش با ابعاد بزرگتری اختیار شده است که به طور کل دارای 7762 المان متقارن چهار وجهی هشت گره با مجموع 24226 گره می‌باشد.

در این شبیه‌سازی ابتدا مرحله پیش فشردن که در آن نیروی الکتروودها اعمال می‌گردد، توسط یک تحلیل مکانیکی و با در نظر گرفتن تماس بین سطوح ورق-الکتروود و ورق-ورق مدل شده است. نتیجه این مرحله که شامل تغییر شکل‌ها (الکتروود و قطعه کار)، فشار تماسی، شعاع تماس، مقدار باز شدن ریشه و غیره می‌باشد در مرحله بعد اعمال شده است. شعاع تماسی محاسبه شده در این مرحله تحلیل، برای محاسبه جریان عبوری و رسانایی الکتریکی سطح تماس در مرحله تحلیل الکتریکی-حرارتی به کار می‌رود. در مرحله دوم که یک تحلیل وابسته الکتریکی-حرارتی می‌باشد، پس از اعمال شرایط مرزی حرارتی و الکتریکی، حل با استفاده از محاسبه حرارت ژول تولید شده در سطوح ورق-ورق و ورق-الکتروود و سطوح آزاد و مواد پایه انجام خواهد گرفت. در نتیجه توزیع دمایی در گره‌ها بدست می‌آید و با توجه به اینکه تحلیل مکانیکی جوشکاری به صورت غیر مستقیم صورت می‌گیرد، در تحلیل مکانیکی تاریخچه حرارتی به دست آمده از آنالیز حرارتی به عنوان

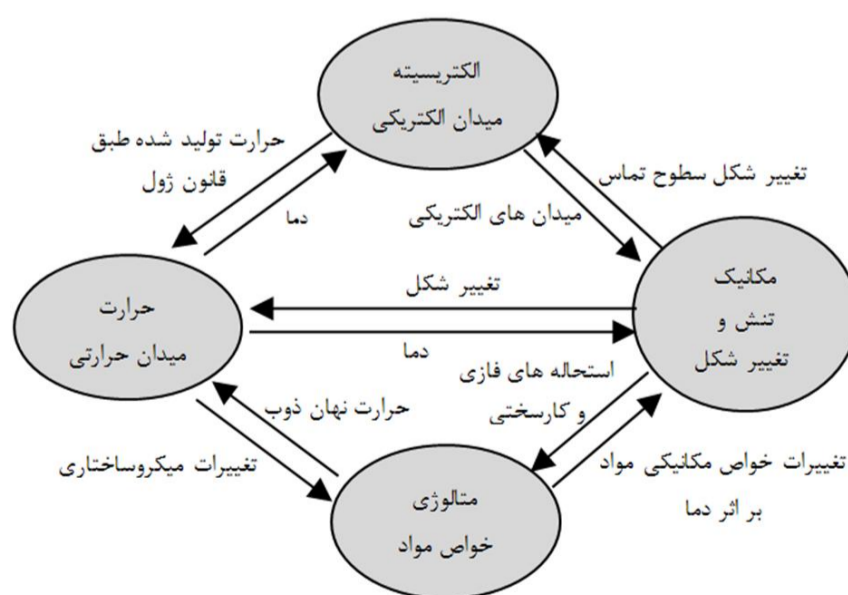
$2.4 \times 10^{-8} (V/R)^2$ است. T_0 و T_s به ترتیب دمای انجماد بین دو سطح و دمای سطح تماس (بر حسب کلین) می‌باشند. شعاع تماسی بین دو سطح است که مقدار آن پس از شبیه‌سازی مرحله پیش فشردن و با بررسی نتایج آن حاصل می‌گردد.

4- شبیه‌سازی فرایند

در مدلسازی فرایند جوشکاری مقاومتی، چهار حوزه‌ی الکتریسیته، حرارت، متالورژی و مکانیک در ارتباط با یکدیگر هستند. با انتخاب روش تحلیل برای آنالیز جوشکاری، چگونگی ارتباط این چهار حوزه تعیین می‌شود. ارتباط این چهار حوزه بیانگر آن است که در شبیه‌سازی فرایند، لازم است سه دسته معادله‌ی دیفرانسیل الکتریکی، حرارتی و مکانیکی به صورت همبسته حل گردند. از این رو در روش اجزای محدود از دو راهبرد کلی و مجزا برای تحلیل این فرایند استفاده می‌شود.

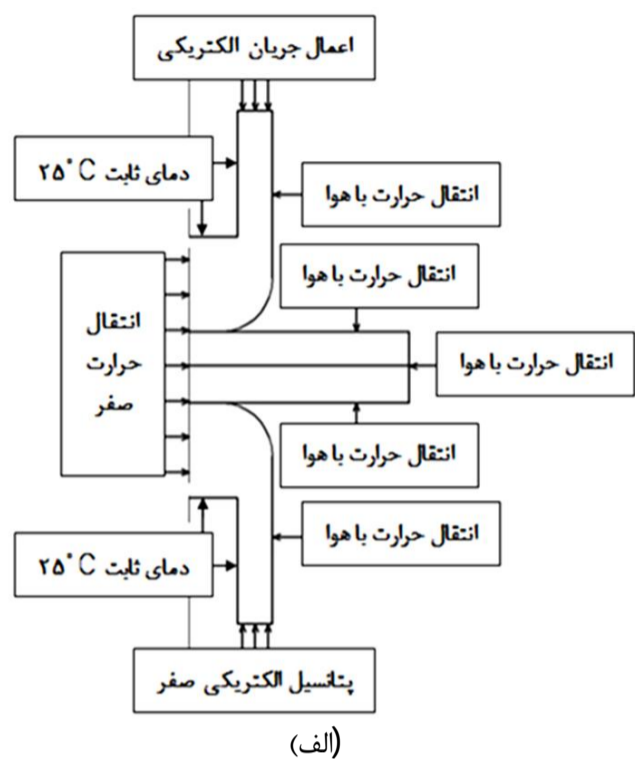
راهبرد اول شامل تحلیل فرایند با در نظر گرفتن همزمان دو یا چند حوزه است که به نام آنالیز وابسته شناخته می‌شود. راهبرد دوم، تحلیل فرایند با در نظر گرفتن حوزه‌ها به صورت مجزا است که تحت عنوان آنالیز غیر وابسته شناخته می‌شود. در فرایند جوشکاری، حرارت باعث تغییرات متالورژیکی در ماده می‌شود که آن هم به نوبه‌ی خود بر روی حوزه‌های الکتریکی، حرارتی و مکانیکی تأثیرگذار خواهد بود. همچنین حوزه‌های الکتریکی-حرارتی و حرارتی-مکانیکی نیز بر روی یکدیگر تأثیرگذار هستند که این امر وابستگی معادلات الکتریکی، مکانیکی و حرارتی در جسم را به دنبال دارد [10]. شکل 1 رابطه این چهار حوزه و چگونگی تأثیر آنها بر یکدیگر را در فرایند جوشکاری مقاومتی نشان می‌دهد.

در این تحقیق با توجه به وابستگی زیاد تحلیل‌های الکتریکی و حرارتی به یکدیگر از تحلیل وابسته استفاده شده است اما از آنجا که در جوشکاری، گرمای حاصل از کرنش پلاستیک ناچیز بوده و می‌توان از اثر کرنش‌های سطحی بر ضریب انتقال حرارت سطوح صرف نظر کرد، معادلات مکانیکی و حرارتی را می‌توان به صورت مستقل حل نمود و از حل غیر وابسته سود برد. روش غیر وابسته، از دو مرحله اساسی تشکیل شده است؛ در مرحله اول که تحلیل الکتریکی-حرارتی است با استفاده از مدل‌سازی وابسته الکتریکی-حرارتی، یک تحلیل گذرای حرارتی انجام می‌شود. نتایج این تحلیل که تاریخچه حرارتی نقاط مختلف سازه است، در تحلیل مکانیکی به عنوان ورودی مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت با انجام یک تحلیل الاستیک-پلاستیک میدان تنش‌های پسماند به دست می‌آید. در شکل 2

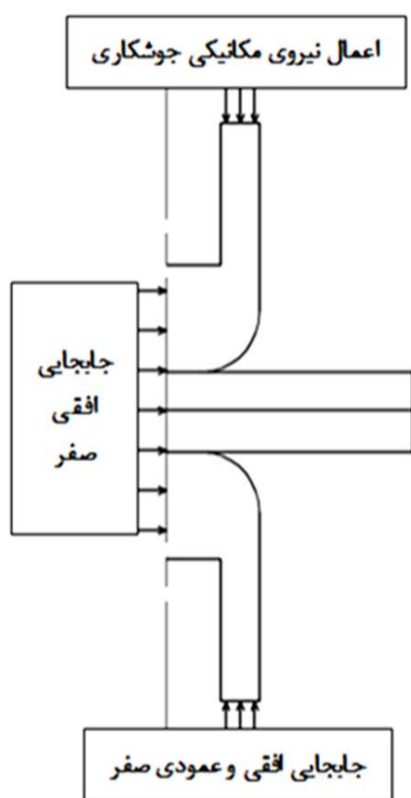


شکل 1 تأثیر حوزه‌های مختلف بر یکدیگر در فرایند جوشکاری مقاومتی

آمد. اکنون پس از اطمینان از صحت نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی به تحلیل فرایند و بررسی تأثیر پارامترهای این فرایند پرداخته می‌شود.

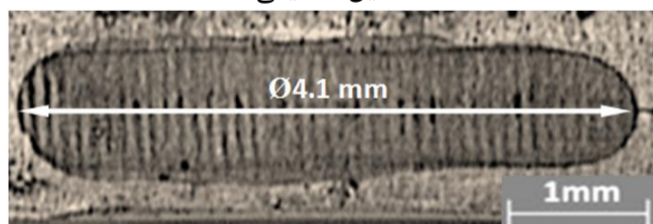


(الف)

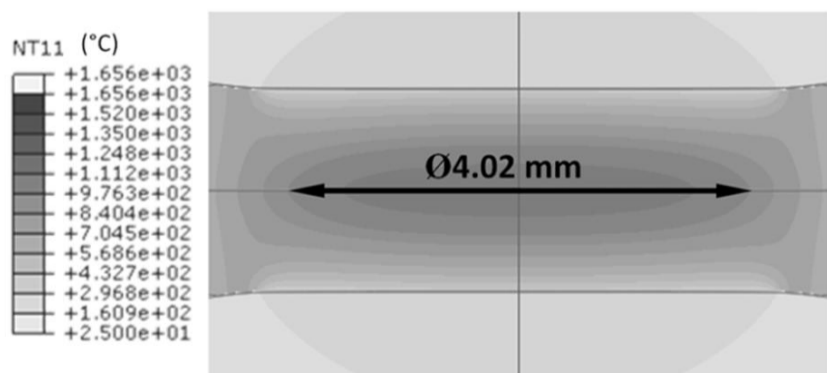


(ب)

شکل 3 شرایط مرزی استفاده شده در فرایند تحلیل (الف) حرارتی-الکتریکی و (ب) تحلیل مکانیکی



(الف)



(ب)

شکل 4 مقایسه نتایج بدست آمده از (الف) آزمایش‌های تجربی و (ب) شبیه‌سازی حرارتی برای جریان 6/5 کیلو آمپر و مدت زمان جوشکاری 10 سیکل

یک بار حرارتی به سازه اعمال می‌گردد، سپس تنش و کرنش‌های حاصله در هر بازه زمانی با استفاده از یک تحلیل الاستیک-پلاستیک محاسبه می‌شود. این عملیات تا سرد شدن قطعه تا دمای محیط ادامه می‌یابد. مقادیر محاسبه شده در مرحله نهایی، نشان دهنده تنش‌ها و کرنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری هستند.

در مدل حرارتی، تغییر حالت جامد به مایع (ذوب) و بر عکس با اعمال گرمای نهان ذوب تعریف می‌گردد. به منظور معرفی ماده مذاب، برای خواص مکانیکی (پلاستیک) ماده، دمایی به عنوان دمای ذوب و انجماد تعریف می‌شود. این دما در واقع جهت مدل نمودن تأثیرات ذوب شدن ماده، همچنین انجماد مجدد آن به کار می‌رود. با تعریف دمای مذاب برای ماده در صورتی که هنگام حل، دما به این مقدار یا بالاتر از آن برسد، تأثیر کارسختی قبلی ماده با صفر کردن کرنش پلاستیک معادل از بین می‌رود؛ یعنی رفتار ماده، پلاستیک کامل فرض می‌شود. به علاوه برای مدل کار سختی سینماتیک، تانسور تنش برگشتی نیز معادل صفر قرار می‌گیرد. اگر دمای ماده به کمتر از دمای مذاب برسد، ماده دوباره سخت شوندگی خود را باز می‌یابد.

4-1- شرایط مرزی

با توجه به اینکه برای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای معمولاً از جریان متناوب استفاده می‌شود، زمان جوشکاری نیز معمولاً بر حسب سیکل بیان می‌گردد که مدت زمان هر سیکل برابر با عکس فرکانس خواهد بود. در این حالت جریان نیز به صورت رابطه (8) اعمال می‌گردد:

$$I = I_m \sin(2\pi ft) \quad (8)$$

I_m میزان بیشینه جریان جوشکاری و f فرکانس جریان متناوب می‌باشد که در این پژوهش 50Hz می‌باشد. پتانسیل الکتریکی انتهای الکتروود پایینی نیز صفر در نظر گرفته شده است.

انتقال حرارت در سطوح خارجی طبق رابطه پیشنهادی دنگ [17] که در قسمت‌های قبل بیان شد (روابط (5) و (6))، در نظر گرفته شده است و ضریب انتقال حرارت هدایت مواد بر اساس دمای وارد شده می‌باشد. دمای اولیه قطعات و مسیر آب نیز به صورت ثابت 25°C در نظر گرفته شده است. به طور کلی شرایط مرزی در نظر گرفته شده در تحلیل‌های مکانیکی و الکتریکی-حرارتی در شکل 3 مشخص گردیده است.

5- نتایج و بحث

5-1- صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی

با توجه به اینکه قطر دکمه جوش¹ یکی از مهمترین پارامترهای مورد بررسی در شبیه‌سازی است، برای بررسی صحت شبیه‌سازی، ابتدا قطر دکمه جوش در جریان‌های مختلف از نرم‌افزار استخراج و با نتایج آزمایشات تجربی مقایسه شده است، که یک نمونه مقایسه‌ی بین قطر دکمه جوش بدست آمده از آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی انجام گرفته برای جریان جوشکاری 6/5 کیلو آمپر و مدت زمان جوشکاری 10 سیکل در شکل 4 نشان داده شده است. همچنین مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشات تجربی در جریان‌های مختلف جوشکاری در شکل 5 آورده شده است. این شکل تطابق خوبی را بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشات تجربی نشان می‌دهد، به این ترتیب که حداکثر اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشات تجربی قبل از جریان 7/3 کیلوآمپر در قطر دکمه جوش 3% و در ضخامت دکمه جوش 7% بدست

1- Nugget Diameter

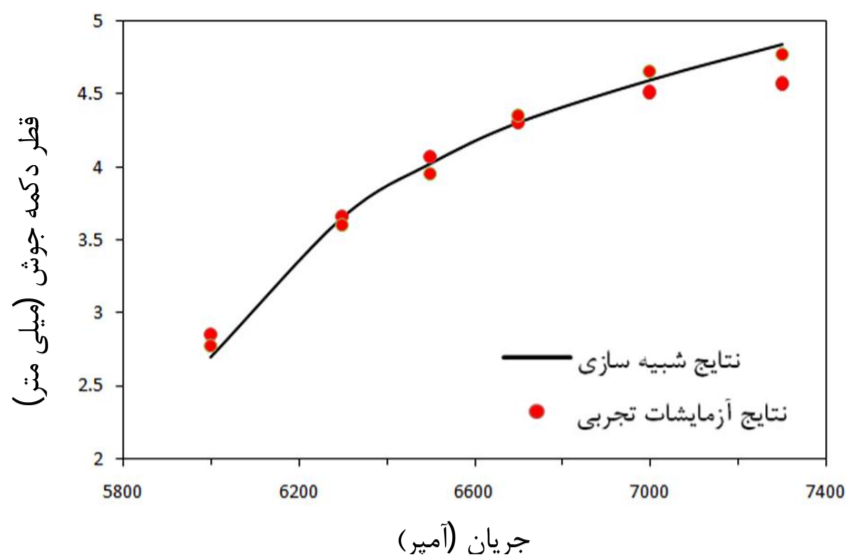
و زمان جوشکاری نقش بسزایی را در اندازه دکمه جوش ایفا می‌کنند. بر همین اساس و با توجه به نتیجه‌ای که عیسی‌زاده و همکارانش [8] بدست آوردند مشاهده می‌شود که با افزایش جریان و زمان جوشکاری قطر دکمه جوش افزایش می‌یابد، اما باید توجه کرد که اثر این دو پارامتر می‌بایست به صورت همزمان و متقابل در نظر گرفته شود. به این ترتیب که جریان اثر بیشتری بر روی رشد دکمه جوش دارد و اگر جریان افزایش یابد، نمی‌توان زمان جوشکاری را از حدی بیشتر افزایش داد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که دکمه جوش برای سیکل‌های بالاتر در جریان‌های پایین‌تری شکل می‌گیرد و با افزایش جریان و زمان جوشکاری سرعت رشد قطر دکمه جوش کاهش می‌یابد. یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کاهش سرعت افزایش قطر دکمه جوش، کاهش چگالی جریان عبوری بر اثر افزایش قطر دکمه جوش و در نتیجه افزایش سطوح تماسی بین دو ورق می‌باشد. یکی دیگر از عواملی که موجب کاهش سرعت افزایش قطر دکمه جوش با افزایش مدت زمان جوشکاری می‌شود، انرژی هدر رفت می‌باشد که با افزایش مدت زمان جوشکاری، انرژی بیشتری در محدوده جوشکاری توسط روش‌های هدایت و همرفت از دست می‌رود. اما این پدیده تنها در افزایش زمان جوشکاری صورت می‌گیرد. همچنین با توجه به معادله (7) می‌توان گفت که با افزایش دما بر اثر افزایش جریان یا زمان جوشکاری، مقاومت تماسی کاهش می‌یابد و در نتیجه سرعت رشد قطر دکمه جوش نیز کاهش می‌یابد. یکی دیگر از عوامل کاهش قطر و ضخامت دکمه جوش، پدیده بیرون زدگی¹ در جریان‌ها و زمان‌های بالای جوشکاری است. بررسی‌های تجربی نشان می‌دهند، زمانیکه بیرون زدگی صورت می‌گیرد، به علت پاشش مذاب از حوضچه جوش، قطر و ضخامت جوش بصورت ناگهانی کاهش می‌یابد اما تأثیر پاشش مذاب را نمی‌توان در تحلیل‌های اجزاء محدود مشاهده نمود [10].

5-4- اثر قطر نوک الکتروود بر اندازه دکمه جوش

هنگام جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای توجه به قطر سطح تماس الکتروود یا قطر نوک الکتروود² دارای اهمیت زیادی می‌باشد. این عامل می‌تواند بر چگالی جریان و لذا شکل و اندازه دکمه جوش و همچنین عمر الکتروود اثرگذار باشد. این پارامتر تأثیر زیادی بر هندسه دکمه جوش و توزیع دما در فصل مشترک دارد. به‌گونه‌ای که با کاهش میزان آن به مقدار 1 میلی‌متر، در زمان بسیار کوتاهی دما به سرعت افزایش می‌یابد و با افزایش قطر نوک الکتروود به همین میزان، با اعمال جریان مشابه زمان زیادی لازم است تا دما در فصل مشترک ورق‌ها به دمای ذوب برسد و تشکیل دکمه جوش آغاز شود که در این مورد نمی‌توان با افزایش زمان به اندازه مناسبی برای دکمه جوش دست یافت و جهت نیل به این هدف باید بر شدت جریان اعمالی افزود. تأثیر جریان جوشکاری و قطر نوک الکتروود را بر قطر دکمه جوش تشکیل شده نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد با افزایش قطر نوک الکتروود، در جریان ثابت دکمه جوش کوچکتری ایجاد می‌شود درحالی که در مقادیر بالاتر جریان کاهش قطر دکمه جوش کمتر می‌شود.

این مطلب از دو جنبه قابل بحث است. از یک طرف کاهش اندازه نوک الکتروود باعث کاهش سطح تماس در فصل مشترک الکتروود- ورق و همچنین فصل مشترک ورق- ورق شده و افزایش دانسیته جریان در این مناطق را در پی خواهد داشت. از سوی دیگر کاهش اندازه این پارامتر تحت تأثیر نیروی



شکل 5 مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی برای مدت زمان جوشکاری 10 سیکل

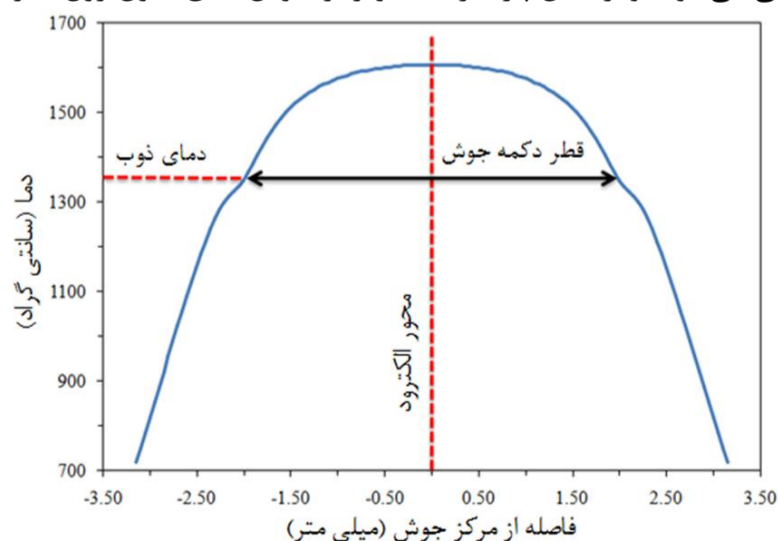
5-2- توزیع دما

در جوش مقاومتی نقطه‌ای تاریخچه حرارتی، رفتار فیزیکی و متالورژیکی اتصال جوش شامل قطر دکمه جوش و منطقه متأثر از حرارت و میکروساختار جوش را مشخص می‌کند و در نتیجه می‌تواند بر کیفیت جوش را مؤثر باشد. برای توصیف دکمه جوش در مدل دو بعدی، منحنی‌های توزیع دما در زمانی که دمای فرایند جوشکاری به حداکثر خود می‌رسد (در پایان آخرین سیکل جوشکاری) یا اندکی پس از آن که ابعاد حوضچه‌ی مذاب به حداکثر مقدار خود رسیده است، در راستای طول ورق ترسیم می‌گردد. این منحنی‌های توزیع دما در واقع بیانگر مرز ناحیه‌ی مذاب و همچنین ناحیه‌ی تحت تأثیر حرارت با فلز پایه، هستند که در بررسی‌های میکروساختاری نیز جهت درک بهتر تغییرات میکروساختاری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در شکل 6 در توزیع درجه حرارت بین دو ورق و در امتداد طولی در پایان مرحله جوشکاری برای جریان 6/5 کیلو آمپر و مدت زمان 10 سیکل نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است می‌توان اندازه نواحی مختلف جوش به خصوص قطر دکمه جوش را بدست آورد. به این ترتیب که محور افقی فاصله از مرکز دکمه جوش بوده و با توجه به دمای ذوب 1350°C برای اینکونل 625 [18]، اولین نقطه از منحنی که به این دما می‌رسد متناظر با شروع دکمه جوش بوده که امتداد آن در محور افقی شعاع دکمه جوش را نشان می‌دهد. ضخامت دکمه جوش را نیز می‌توان به همین ترتیب محاسبه نمود.

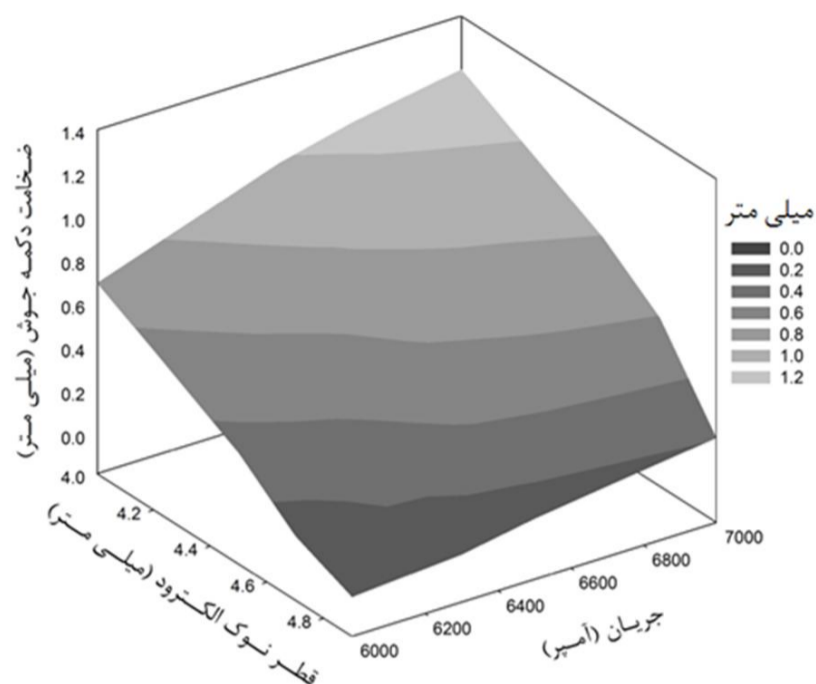
5-3- اثر جریان و زمان جوشکاری بر قطر دکمه جوش

کیفیت جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای معمولاً با اندازه دکمه جوش سنجیده و بررسی می‌شوند و از میان پارامترهای مؤثر بر جوش طبق قانون ژول، جریان



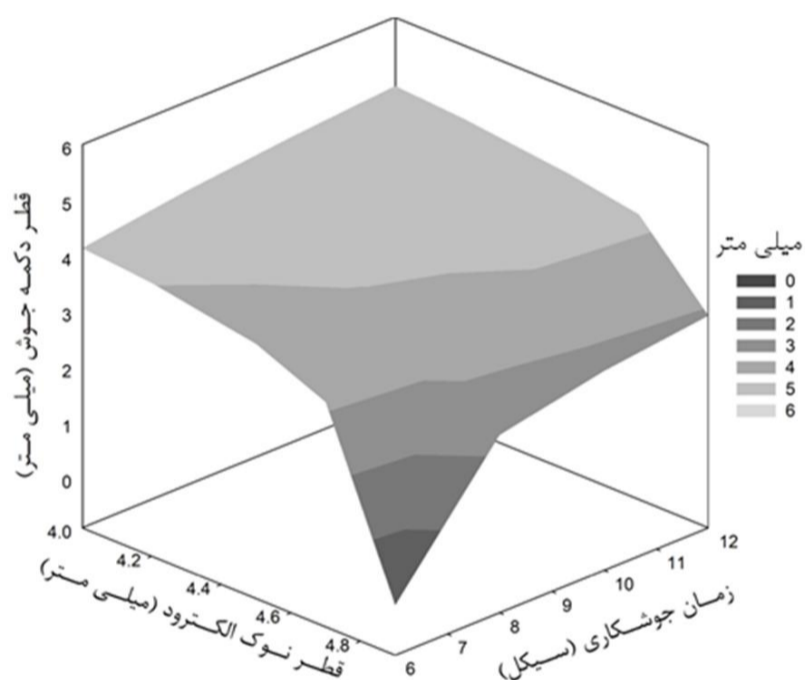
شکل 6 منحنی تغییرات دما در طول ورق با فاصله از مرکز دکمه جوش در جریان 6/5 کیلو آمپر و مدت زمان 10 سیکل

1- Explusen
2- Electrode Tip Diameter

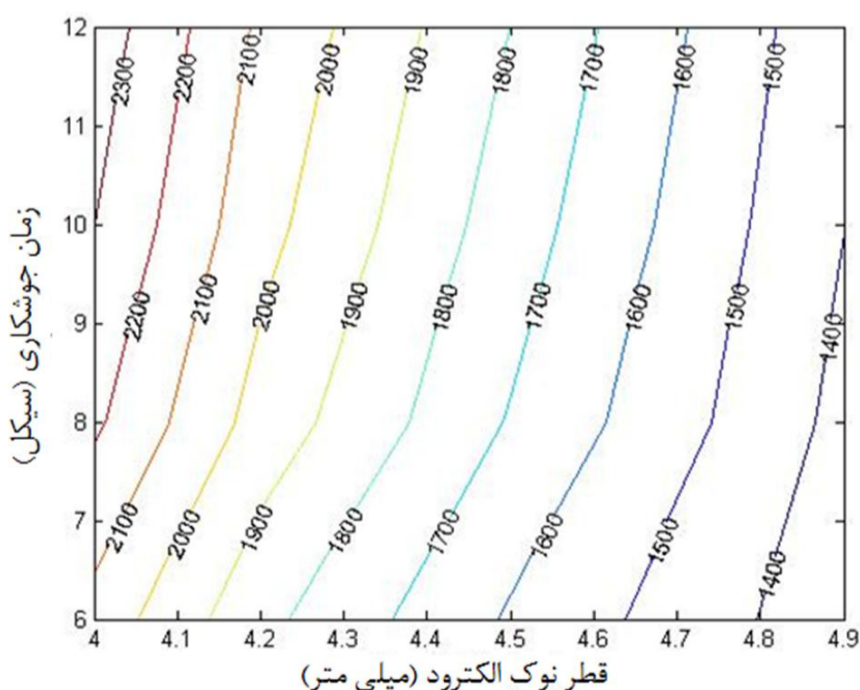


شکل 9 تأثیر متقابل جریان جوشکاری و قطر نوک الکتروتود بر ضخامت دکمه جوش

شکل‌های 10، 11 و 12 به ترتیب تأثیر زمان جوشکاری و قطر نوک الکتروتود را بر قطر دکمه جوش، حداکثر دمایی دکمه جوش و ضخامت دکمه جوش نشان می‌دهند.



شکل 10 تأثیر متقابل زمان جوشکاری و قطر نوک الکتروتود بر قطر دکمه جوش

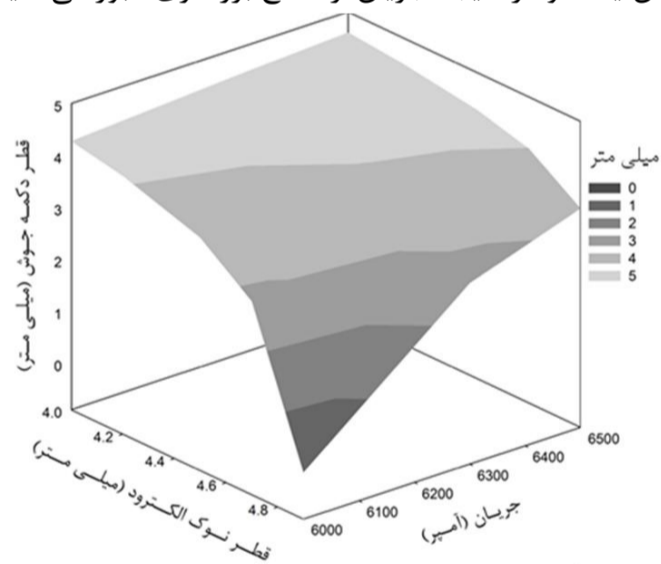


شکل 11 تأثیر جریان جوشکاری و قطر نوک الکتروتود بر حداکثر دمایی دکمه جوش بر حسب درجه سانتی‌گراد

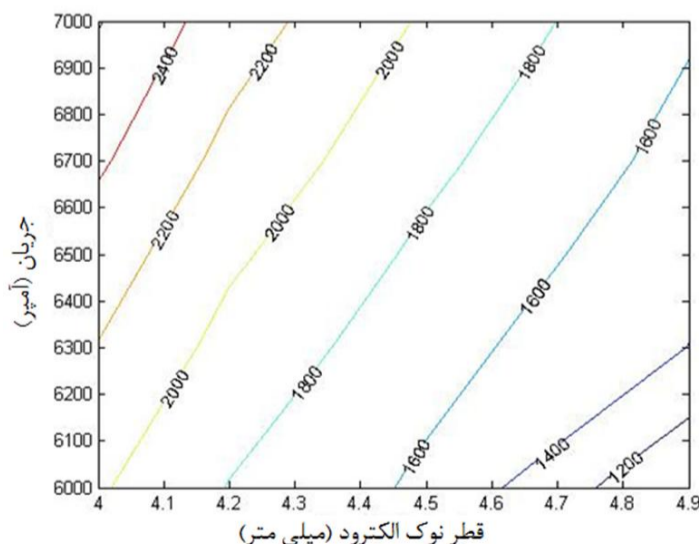
ثابت از سوی الکتروتودها باعث افزایش فشار اعمالی و در نتیجه کاهش مقاومت الکتریکی تماسی در فصل مشترک ورق‌ها می‌شود. اما طبق رابطه ژول، جریان اثر بیشتری نسبت به مقاومت دارد و لذا افزایش دانسیته جریان به علت کاهش اندازه سطح تماس تأثیر کاهش مقاومت را تحت الشعاع قرار داده و همانگونه که در شکل 8 نشان داده شده است، افزایش قابل ملاحظه دما در منطقه مذکور را موجب می‌گردد.

شکل 8 نشان می‌دهد که نرخ افزایش دما با کم شدن قطر نوک الکتروتودها بسیار زیاد می‌باشد که این افزایش دما در جریان‌های بالاتر شدیدتر است. در حقیقت جریان و قطر الکتروتود در تولید دمایی دکمه جوش رابطه عکس با یکدیگر دارند. این مطلب به این معناست که افزایش جریان موجب افزایش دمایی دکمه جوش و افزایش قطر نوک الکتروتود موجب کاهش آن می‌شود.

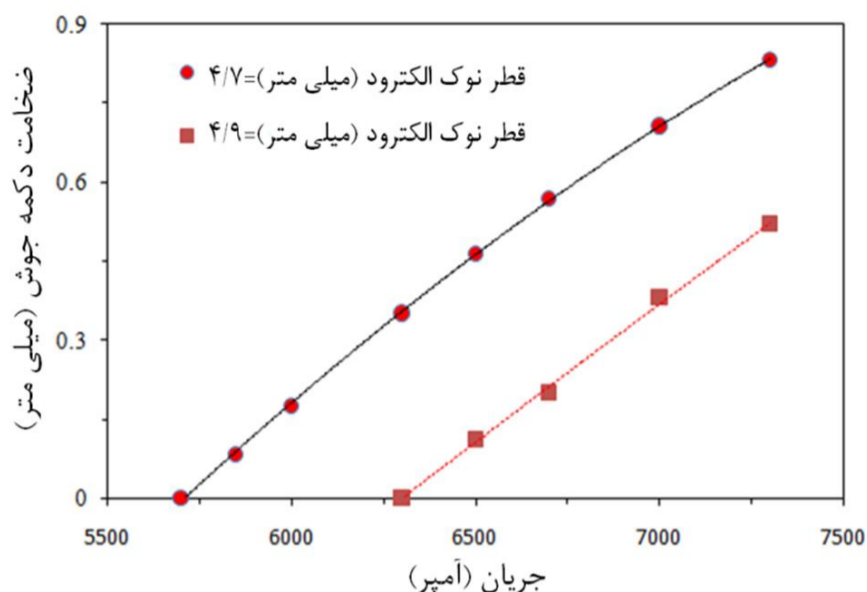
شکل 9 تأثیر جریان جوشکاری و قطر نوک الکتروتود بر ضخامت دکمه جوش را نشان می‌دهد. با مشاهده شکل‌های 7 و 9 تغییرات در رشد شعاعی و محوری دکمه جوش به چشم می‌خورد که به علت تغییرات اندازه سطح تماس در فصل مشترک ورق‌ها و ورق-الکتروتود می‌باشد. با مقایسه شکل‌های 7 و 9 می‌توان گفت که با کاهش قطر نوک الکتروتود، نرخ افزایش ضخامت دکمه جوش نسبت به قطر دکمه جوش شدیدتر می‌باشد که با افزایش جریان نیز این نرخ تقریباً ثابت مانده است. در حالی که با افزایش جریان نرخ کاهش قطر دکمه جوش بسیار کم شده است. بر همین اساس می‌توان گفت، با افزایش اندازه نوک الکتروتود، دکمه جوش در جهت شعاعی رشد نموده و بالعکس با کاهش این اندازه دکمه جوش تمایل بیشتری به رشد در جهت محوری خواهد داشت. زیرا با افزایش قطر نوک الکتروتود، سطح تماس بین دو ورق افزایش یافته و در نتیجه جریان از سطح بزرگتری عبور می‌نماید.



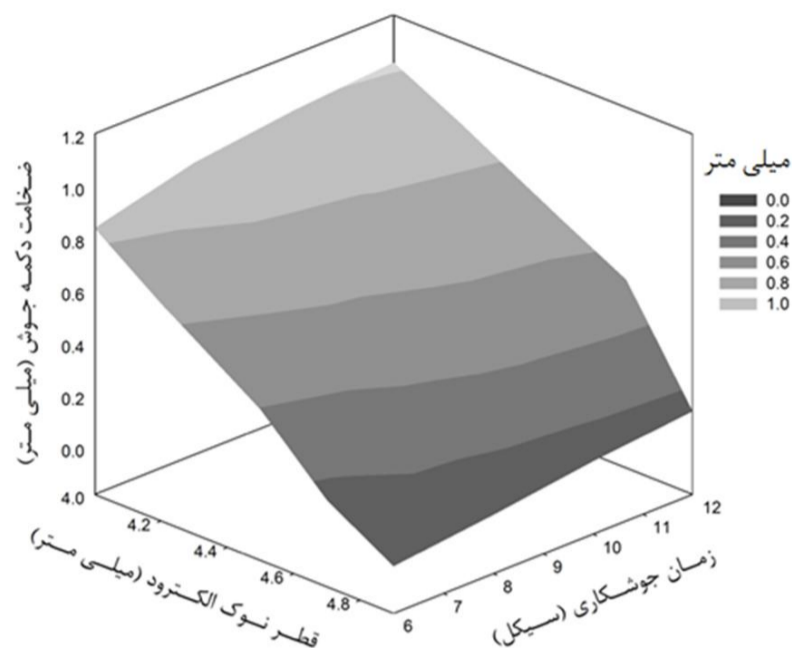
شکل 7 تأثیر همزمان جریان جوشکاری و قطر نوک الکتروتود بر قطر دکمه جوش



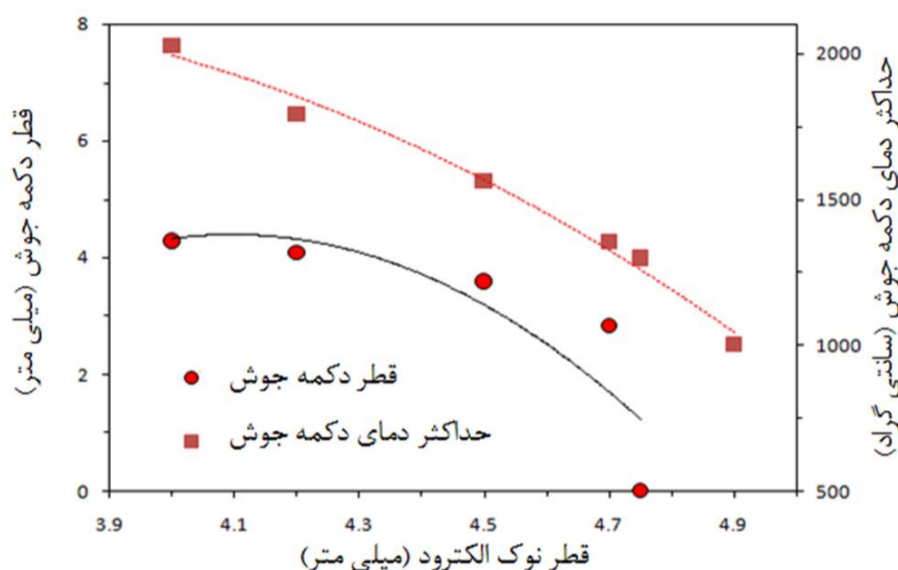
شکل 8 تأثیر متقابل جریان جوشکاری و قطر نوک الکتروتود بر حداکثر دمایی دکمه جوش بر حسب درجه سانتی‌گراد



شکل 14 تأثیر جریان جوشکاری و قطر نوک الکتروود بر ضخامت دکمه جوش



شکل 12 تأثیر زمان جوشکاری و قطر نوک الکتروود بر ضخامت دکمه جوش



شکل 15 تأثیر قطر نوک الکتروود بر قطر دکمه جوش تشکیل شده و حداکثر دمای دکمه جوش در جریان 6 کیلو آمپر

نیز قابل کنترل است. در نتیجه بیرون زدگی زودتر رخ داده و حداکثر قطر دکمه جوش قابل دستیابی کوچکتر می‌شود. همچنین با کاهش قطر نوک الکتروود به دلیل افزایش فشار و دمای ایجاد شده، تغییر شکل ایجاد شده در ورق‌ها افزایش یافته و عمر الکتروود کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه اثر پاشش را نمی‌توان در شبیه‌سازی مشاهده نمود، حداکثر دمای ایجاد شده در دکمه جوش و ضخامت دکمه جوش به عنوان پارامترهای مورد بررسی در این رابطه انتخاب شده‌اند. بر همین اساس می‌توان گفت با افزایش قطر الکتروود، قابلیت دستیابی به قطر دکمه جوش بزرگتر و بدون پاشش بیشتر است، زیرا در قطر دکمه جوش بزرگتر، دمای دکمه جوش و ارتفاع آن کمتر است.

با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان گفت بهترین قطر نوک الکتروود برای جوشکاری سوپر آلیاژ اینکونل 625 با ضخامت 0/7 میلیمتر در حدود 4/5 میلی‌متر است. زیرا قطر دکمه جوش بدست آمده با این ابزار نسبت به قطرهای کوچکتر تفاوت چندانی ندارد، در حالیکه حداکثر دمای تولید شده با این قطر، کمتر از قطرهای کوچکتر می‌باشد. همچنین با افزایش قطر از این مقدار، قطر دکمه جوش ایجاد شده به شدت کاهش می‌یابد.

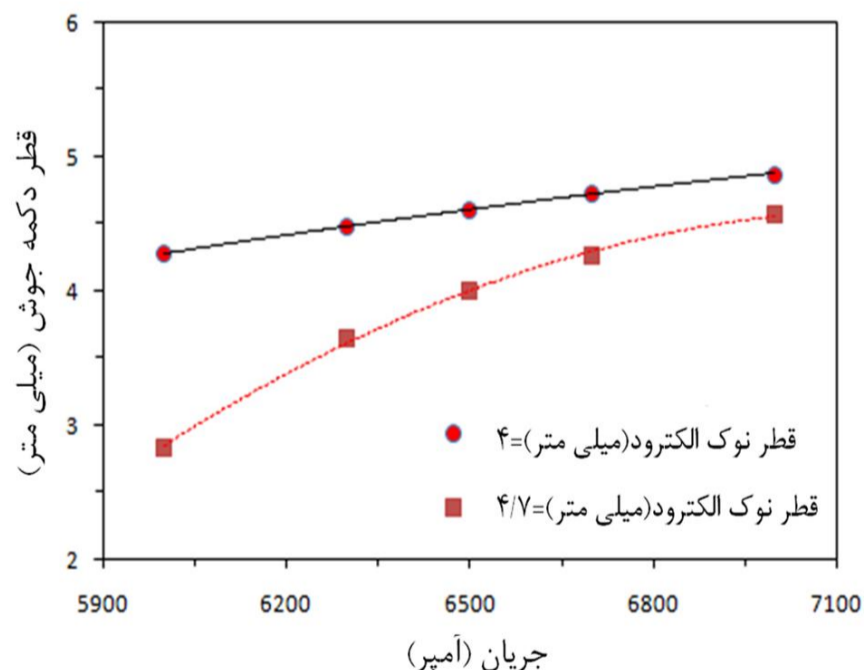
6- نتیجه گیری

در این تحقیق فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپر آلیاژ اینکونل 625 به کمک یک مدل وابسته الکتریکی-حرارتی و غیر وابسته مکانیکی شبیه سازی شده و نحوه شکل‌گیری و اندازه دکمه جوش در جریان، زمان و ابعاد مختلف الکتروود بررسی شده است که به طور کلی، نتایج را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

با مقایسه تأثیر جریان و زمان جوشکاری همزمان با قطر نوک الکتروود می‌توان گفت جریان و زمان تأثیر یکسانی بر رشد قطر دکمه جوش دارند با این تفاوت که جریان تأثیر بیشتری را دارا می‌باشد. اما می‌توان مشاهده نمود که جریان جوشکاری همزمان با قطر الکتروود تأثیر بیشتری بر روی حداکثر دمای دکمه جوش و ضخامت آن دارد. به این ترتیب که با کاهش قطر دکمه جوش و افزایش زمان جوشکاری، حداکثر دمای دکمه جوش و ضخامت آن با سرعت زیاد و یکنواختی افزایش می‌یابد. این موضوع را می‌توان در شکل‌های 13 و 14 به خوبی مشاهده نمود. در نتیجه می‌توان گفت جهت دستیابی به جوشی با کیفیت مناسب، بهتر است تا حد امکان جریان جوشکاری را افزایش داده و زمان جوشکاری را کاهش داد.

همان‌گونه که در شکل 15 نشان داده شده است، در جریان 6 کیلو آمپر با افزایش قطر نوک الکتروود از 4/7 میلی‌متر، دکمه جوش تشکیل نشده است و نرخ کاهش قطر دکمه جوش به شدت افزایش پیدا کرده است. همچنین می‌توان مشاهده نمود که با افزایش قطر دکمه جوش دمای ناحیه مذاب کاهش یافته است. این کاهش دما به دلیل کاهش چگالی جریان عبوری و افزایش انتقال حرارت توسط الکتروودها می‌باشد.

از پدیده‌های قابل توجه دیگر در انتخاب قطر الکتروودها می‌توان به بیرون زدگی، فرسایش الکتروود و تغییر شکل‌های ناشی از جوشکاری اشاره نمود. الکتروودها مانند سدی مکانیکی به دور ناحیه مذاب عمل کرده و مذاب درون دکمه جوش را حفظ می‌کنند. با کوچکتر شدن این سد، مذاب کمتری



شکل 13 تأثیر جریان جوشکاری و قطر نوک الکتروود بر قطر دکمه جوش

- [2] M. Vogler, S. Sheppard, Electrical Contact Resistance under High Loads and Elevated Temperatures, *Welding Journal*, Vol. 72, No. 6, pp. 231-s, 1993.
- [3] H.A. Nied, The finite element modeling of the resistance spot welding process, *Welding Journal*, Vol. 63, pp.132s, 1984.
- [4] X. Sun, P. Dong, Analysis of aluminum resistance spot welding using process using coupled finite element procedures, *Welding Journal*, Vol.79, pp. 215-221, 2000.
- [5] O. Martín, P.D. Tiedra, M. López, Artificial Neural Networks for Pitting Potential Prediction of Resistance Spot Welding Joints of AISI 304 Austenitic Stainless Steel, *Corrosion Science*, Vol. 52, No. 7, pp. 2397-2402, 2010.
- [6] Z. Hou, I. Kim, Y. Wang, C. Li, C.J. Chen, Finite element analysis for the mechanical features of resistance spot welding process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 180, pp. 160-165, 2007.
- [7] R. Nodeh, S. Serajzadeh, A.H. Kokabi, Simulation of Welding residual stresses in resistance spot welding, FE modeling and X-ray verification, *Journal of materials processing technology*, Vol. 205, pp. 60-69, 2008.
- [8] H. Eisazadeh, M. Hamed, A. Halvae, New Parametric Study of Nugget Size in Resistance Spot Welding Process, Using Finite Element Method, *Materials and Design*, Vol. 31, No. 1, pp. 149-157, 2010.
- [9] Z. Lei, H. Kang, Y. Liu, Finite Element Analysis for Transient Thermal Characteristics of Resistance Spot Welding Process with Three Sheets Assemblies, *Procedia Engineering*, Vol. 16, pp. 622 - 631, 2011.
- [10] H. Moshayedi, I. Sattari-Far, Numerical and Experimental study of nugget size growth in resistance spot welding of austenitic stainless steels, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, pp. 347- 354, 2012.
- [11] S. Hassanifard, Analytical and Experimental Investigation of the Effects of Spot Weld Diameter, Gap Distance and Electrode Force on the Mixed Mode of Resistance Spot Welded-Joints, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 39-48, 2011. (In Persian)
- [12] S. Hassanifard, M. M. Ettefagh, Numerical and experimental investigation of fatigue life and frequency response of the different arrangements of tensile-shear spot-welded joints, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 77-84, 2012. (In Persian)
- [13] F. Xu, Y. Lv, Y. Liu, F. Shu, P. He, B. Xu, Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Inconel 625 Alloy during Pulsed Plasma Arc Deposition Process, *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 29, No. 5, pp. 480-488, 2013.
- [14] G.P. Dindaa, A.K. Dasgupta, J. Mazumder, Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 509, pp. 98-104, 2009.
- [15] K.H. Song, K. Nakata, Mechanical Properties of Friction-Stir-Welded Inconel 625 Alloy, *Materials Transactions*, Vol. 50, No. 10, pp. 2498-2501, 2009.
- [16] H. Zhigang, W. Yuanxun, L. Chunzhi, Ch. Chuanyao, A Multi-Coupled Finite element Analysis of Resistance Spot Welding Process, *Acta Mechanica Sinica*, Vol. 19, pp. 86- 94, 2006.
- [17] D.Deng, H. Murakawa, W. Liang, Numerical Simulation of Temperature Field and Residual Stress in Multipass Welds in Stainless Steel Pipe and Comparison with Experimental Measurements, *Computational Materials Science*, Vol. 42, No. 2, pp.234-244, 2008.
- [18] M. Singh, R. Asthana, Joining and integration of ZrB₂-based ultra-high temperature ceramic composites using advanced brazing technology, *Journal of Materials Science*, Vol. 45, pp. 4308- 4320, 2010.

- مدل شبیه‌سازی ارائه شده با استفاده از نتایج تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که این مدل از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و قابلیت استفاده برای این جنس و با این روش جوشکاری را داراست.
- جریان و مدت زمان جوشکاری هر دو تأثیر مستقیم بر ابعاد دکمه جوش دارند، اما جریان جوشکاری تأثیر بیشتری بر رشد دکمه جوش دارد. به عبارت دیگر نرخ رشد قطر دکمه جوش و اندازه آن بیشتر تحت تأثیر جریان می‌باشد. این در حالی است که افزایش زمان جوشکاری موجب رشد ضخامت دکمه جوش و افزایش دمایی هدر رفته از منطقه جوش می‌شود.
- کاهش اندازه نوک الکتروود باعث افزایش شدید دما در فصل مشترک ورق-ها می‌شود و رشد دکمه جوش را افزایش می‌دهد. این رشد خصوصاً در جهت محوری با سرعت بالایی همراه است. افزایش اندازه نوک الکتروود به علت افزایش اندازه سطوح تماس، کاهش چگالی جریان و افزایش انتقال حرارت در این سطوح، سرعت افزایش دما در فصل مشترک را به شدت کاهش می‌دهد که در این صورت برای دستیابی به دکمه جوش با اندازه مطلوب باید بر میزان جریان الکتریکی افزود. اما در قطر نوک الکتروود بزرگتر به علت افزایش سطح تماس و عبور جریان از سطح بزرگتر رشد شعاعی افزایش می‌یابد.
- به طور کلی می‌توان گفت در قطر نوک الکتروود کمتر، زمان حد آستانه و جریان جوشکاری برای شکل‌گیری دکمه جوش باید کمتر باشد. اما باید توجه نمود که در قطر الکتروود کوچکتر حداکثر قطر دکمه جوش قابل دستیابی کمتر و فرسایش الکتروودها و تغییر شکل‌های ناشی از جوشکاری شدیدتر است.
- نهایتاً با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها می‌توان گفت جهت جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپر آلیاژ اینکونل 625 با ضخامت 0/7 میلی‌متر بهتر است جریان جوشکاری در محدوده 6/5 تا 7 کیلو آمپر، زمان جوشکاری در محدوده 10 تا 12 سیکل و قطر الکتروود در حدود 4/5 میلی‌متر انتخاب گردد.

7-مراجع

- [1] S.M. Darwish, S.D. Al-Dkhial, Statistical models for spot welding of commercial aluminium sheet, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 1589-1610, 1999.