

شبیه سازی عددی جوشکاری مقاومتی UW به کمک تحلیل

الکتریکی - حرارتی اجزاء محدود

موسی اسمعیل زاده^۱ و محسن حامدی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

چکیده

پارامترهای گوناگونی مانند جنس قطعات در حال اتصال، هندسه قطعات، میزان تداخل دو قطعه در حین عملیات جوشکاری و سیکل حرارتی ناحیه جوش، کیفیت اتصالات جوشکاری شده به روش جوشکاری مقاومتی UW را تعیین می نماید. میزان تداخل دو قطعه متأثر از نیروی اعمال شده و سیکل حرارتی ناحیه جوش ناشی از شدت جریان الکتریکی، مدت زمان برقراری جریان و سیکل خنک کاری است. مهمترین پارامترهای موثر و قابل کنترل در این روش جوشکاری سه پارامتر مقدار جریان، مدت زمان اعمال جریان و مقدار نیروی اعمال شده است. در این تحقیق، تاثیر دو پارامتر مقدار جریان و مدت زمان اعمال جریان روی توزیع حرارت در قطعات از طریق یک تحلیل کوپله الکتریکی-حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. یک مدل دو بعدی المان محدود در محیط نرم افزاری برای این کار مورد استفاده قرار گرفته است. طول ناحیه جوش در امتداد درز جوش به کمک نتایج حاصل از تحلیل الکتریکی-حرارتی تعیین شده است. تاثیر مقدار جریان و مدت زمان اعمال جریان روی دمای ناحیه تماس و همچنین طول ناحیه جوش نیز متعاقباً در نظر گرفته شده و مقادیر مناسب برای جوشکاری قطعه مورد آزمایش تعیین شده است. نتایج تحلیل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی از طریق مقایسه طول ناحیه جوش با استحکام کششی نمونه های جوشکاری شده اعتبار سنجی شده است. مشاهده گردید که با افزایش طول ناحیه جوش به دست آمده از نتایج شبیه سازی، حداکثر بار کششی متحمل توسط اتصال نیز افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: شبیه سازی عددی، جوشکاری مقاومتی UW، جریان جوشکاری، زمان اعمال جریان، تحلیل کوپله الکتریکی - حرارتی

Numerical Simulation of the Resistance Upset Welding Process, Using Finite Element Analysis

M. Esmailzadeh and M. Hamed

Department of Mech. Eng. , University of Tehran

ABSTRACT

Many parameters affect the quality of welding in the resistance upset welding (UW) process. These parameters are material and geometry of parts, welding force, thermal cycle at the weld zone, current density and welding time. The controllable parameters in this process are current density, welding time, and welding force, where current density and welding time are more significant. In this paper, the effect of welding time and current density on the temperature distribution of the welding zone is presented. For this purpose, a thermal-electrical finite element model is developed to analyze the thermal behavior of the joint produced. A transient temperature field obtained from thermal-electrical simulation of UW process is applied as nodal load on the model. The results of thermal-electrical analysis are used to predict the status of the weldment. Specifically, the quality of the weld at the seam can be evaluated. The simulation results are evaluated by performing tensile test on the welded joints. The experimental results show that by increasing in the length of the joint, the maximum tensile load applied to the joint increases.

Key Words: Numerical Simulation, Upset Welding, Welding Current, Welding Time, Thermal-Electrical Analysis

۱-کارشناس ارشد (نویسنده پاسخگو): m_esmail2@yahoo.com

۲- دانشیار

۱- مقدمه

مورد استفاده در این بررسی کاملاً یا ویژگی ویسکو پلاستیک در نظر گرفته شده است. جریان الکتریکی به کار گرفته شده از باطری های اسیدی جریان مستقیم تامین شده است. نیروی مورد نیاز توسط یک پرس هیدرولیکی اعمال شده است. درجه حرارت ایجاد شده ناشی از بار گذاری الکتریکی و همچنین تغییر شکل ناشی از بارگذاری مکانیکی بر روی سه سری از نمونه های استوانه ای شکل به روش عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل اجزاء محدود این نمونه ها با نتایج حاصل از اندازه گیری مستقیم بر روی نمونه ها مقایسه گردیده است [۹].

تحقیق دیگری توسط نید^۲ در سال ۱۹۹۳ بر روی جوشکاری مقاومتی UW صورت گرفته است. در این تحقیق به منظور درک بهتر مکانیزم جوشکاری حالت جامد، بیشتر بر روی تغییر شکل و تنشهای ایجاد شده در قطعه تمرکز شده است. او نیز همانند اگرت از یک مدل حرارتی - مکانیکی که در آن خصوصیات مواد از نوع ترمو ویسکو پلاستیک در نظر گرفته شده است استفاده نموده است. نمونه مورد بررسی این پژوهش دارای مقطع مستطیل بوده است و حرارت ایجاد شده در این قطعات ناشی از دو عامل تغییر شکل و عبور جریان الکتریکی در نظر گرفته شده است. نتایج تحقیق نید این موضوع را که در حین عملیات جوشکاری مواد و ناخالصی های موجود در سطح مشترک دو قطعه به بیرون رانده می شوند و این مواد با مواد جدید جایگزین می شوند را نقض نموده و نشان داده است که در این روش موادی که در مرکز قطعه قرار دارند به صورت عمودی در جای خود به هم فشرده می شوند و تنها موادی که از مرکز دورترند به بیرون رانده می شوند [۱۰].

همچنین تحقیق دیگری توسط مورااکاوا^۳ در سال ۲۰۰۱ بر روی جوشکاری مقاومتی درز جوش صورت گرفت. در این تحقیق فرایند جوشکاری مقاومتی درز جوش به روش اجزاء محدود شبیه سازی شده است و تاثیر شدت جریان، سرعت جوشکاری، شکل جریان بر روی شکل دکمه جوش، مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق با استفاده از المانهای تماسی، تماس الکترو- ورق، ورق-

در جوشکاری مقاومتی UW که در فاز جامد انجام می شود دو فلز همجنس و یا ناهمجنس، بدون رسیدن به دمای ذوب به یکدیگر متصل می شوند. در این روش با عبور جریان الکتریکی و اعمال نیرو جهت ایجاد تماس در منطقه اتصال، دو فلز با مقاومت در برابر عبور جریان تا حد خمیری شدن گرم شده و سپس با افزایش نیروی اعمالی نفوذ اتمی صورت می گیرد که اتصال را شکل می دهد. نیروی اعمال شده باعث تغییر شکل و ایجاد پیوستگی سطوح تماس می شود. یکی از مزیت های مهم این روش جوشکاری نسبت به روشهای ذوبی در این است که ترکیب شیمیایی و خواص متالورژیکی فلزات جوش داده شده در مقایسه با روشهای ذوبی تغییر چندانی نکرده و در نتیجه خواص مکانیکی اتصال افزایش می یابد [۴-۱].

این ویژگی جوشکاری UW باعث شده تا این روش کاربردهای فراوانی پیدا کند. از جمله این کاربردها می توان به استفاده از این روش جوشکاری برای بستن درب مخازن فولادی حاوی زباله های اتمی، جوشکاری اجزاء تشکیل دهنده بدنه خودرو، جوشکاری موادی از قبیل فولادهای زنگ نزن، سوپر آلیاژها و آلیاژهای آلومینیوم اشاره نمود [۷-۵].

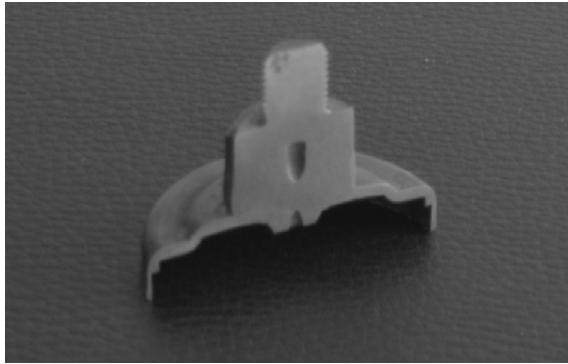
از آنجاکه در مطالعه مسائل جوش، بررسی حرارت جوش بسیار مهم است ابتدا با تحلیل الکتریکی- حرارتی دمای ناحیه جوش بررسی می شود. سپس به کمک این نتایج اندازه طول ناحیه جوش به دست می آید. در این تحلیل اثر انتقال حرارت از طریق جابجایی و تشعشع از اهمیت کمتری برخوردار است و تنها انتقال حرارت از طریق هدایت تاثیر گذار عمده است [۸].

از مجموعه پژوهشهای صورت گرفته در زمینه بررسی عددی جوشکاری مقاومتی که به عنوان منبع و الگوی تحقیق استفاده شده است می توان به تحقیق صورت گرفته توسط اگرت^۱ در سال ۱۹۸۵ بر روی جوشکاری مقاومتی UW اشاره نمود. در این تحقیق یک مدل مکانیکی گذرا از فرایند شکل دهی گرم ارائه شده است. از یک مدل حرارتی - مکانیکی برای این منظور استفاده شده است که به کمک روش المان محدود حل شده است. مواد

^۲- Nied

^۳-Murakawa

^۱- Eggert



شکل ۳: نمونه ی مورد آزمایش در حالت برش خورده.



شکل ۴: تصویر نشان دهنده مرز اتصال با بزرگنمایی ۲۰۰.

۱- تئوری تحقیق

۱-۱- معادلات حاکم

از آنجایی که قطعه در سیستم مختصات استوانه ای دارای تقارن محوری حول محور Z است مدل دو بعدی قطعه ساخته شده و تنها یک دوم هندسه قطعه مورد تحلیل قرار می گیرد. بنابر این معادله دیفرانسیل هدایت حرارتی برای حالت تقارن محوری در مختصات استوانه ای به وسیله معادله (۱) داده می شود [۱۳-۱۲].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(rk \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = sc \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

شرایط مرزی به کار رفته در تحلیل حرارتی عبارتند از:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (2)$$

در امتداد محور تقارن قطعه در راستای محور داریم:

$$kr \frac{\partial T}{\partial r} \cdot L_r + kr \frac{\partial T}{\partial z} \cdot L_z + rh(T - T_{\infty}) = 0 \quad (3)$$

شرط مرزی جابجایی روی سطوح خارجی قطعات در این معادلات:

ورق، عبور جریان الکتریکی و نیروی مکانیکی امکان یافته است [۱۱].

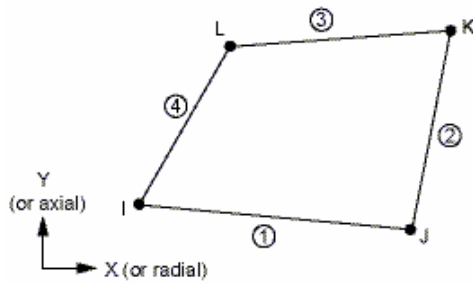
در کار پژوهشی مورد بررسی در این مقاله تاثیر مقدار جریان الکتریکی و مدت زمان اعمال جریان بر روی طول ناحیه جوش به روش عددی مورد بررسی قرار می گیرد. این روش برای افزایش استحکام کششی کارهای آزمایشگاهی بر روی دو قطعه ساخته شده از فولاد کم کربن در یک حسگر فشار روغن که از دو بخش آداپتور و تشتک تشکیل شده است انجام شده است. قطعات مورد بررسی در شکل های ۱ و ۲ و ۳ نشان داده شده است. تصویر کریستالوگرافی تهیه شده از مقطع جوش نیز در شکل ۴ نشان داده شده است که عرض جوش را بسیار کوچکتر از اندازه دانه ها نشان می دهد. نتایج آزمایشگاهی برای اعتبار سنجی مدل شبیه سازی شده نیز مورد بحث قرار می گیرد.



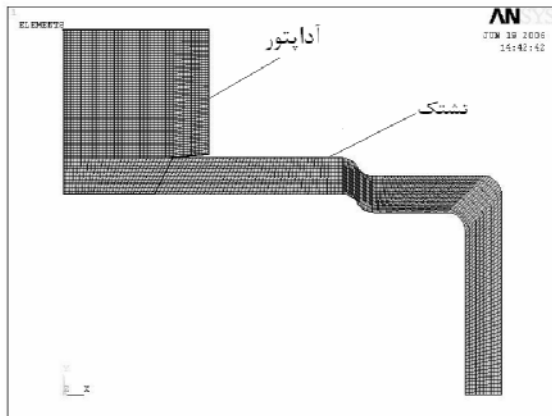
شکل ۱: قطعات با اتصال شکل گرفته.



شکل ۲: اجزاء تشکیل دهنده قطعه ی مورد بررسی.



شکل ۶: المان چهار وجهی به کار گرفته شده.



شکل ۷: مدل اجزاء محدود دو بعدی تقارن محوری اتصال.

$$\phi(r, z) = N_i \phi_i + N_j \phi_j + N_k \phi_k + N_l \phi_l, \quad (4)$$

که در آن، N متغیرهای شکل المان است و داریم:

$$N_i + N_j + N_k + N_l = 1, \quad (5)$$

و ماتریس نهایی معادله ای که باید در معادله (۱) حل شود به صورت زیر بدست می آید:

$$\left(\frac{2}{3}[H] + \frac{l}{\Delta t}[S] \right) \{T\}_{n+1} + \left(\frac{1}{3}[H] - \frac{l}{\Delta t}[S] \right) \{T\}_n + \frac{2}{\Delta t^2} \int_0^{\Delta t} \{f\} \cdot t \cdot dt = 0, \quad (6)$$

و المانهای ماتریس های $[H]$, $[S]$, $[f]$ به صورت زیر به دست می آید:

$$h_{ij}^e = \iint \left(k \cdot \frac{\partial N_i}{\partial r} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial r} + k \cdot \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) 2\pi r dr dz, \quad (7)$$

$$S_{ij}^e = \iint N_i s c N_j 2\pi r dr dz \quad (8)$$

$$\{f^e\} = -\iint \left(\dot{Q} - s c \frac{\partial T}{\partial t} \right) N_i 2\pi r dr dz \quad (9)$$

Q : حرارت تولید شده واحد حجم در اثر مقاومت داخلی

r : محور شعاعی

z : محور عمودی

\dot{n} : بردار عمود سطح

S : دانسیته

C : ظرفیت گرمایی ویژه

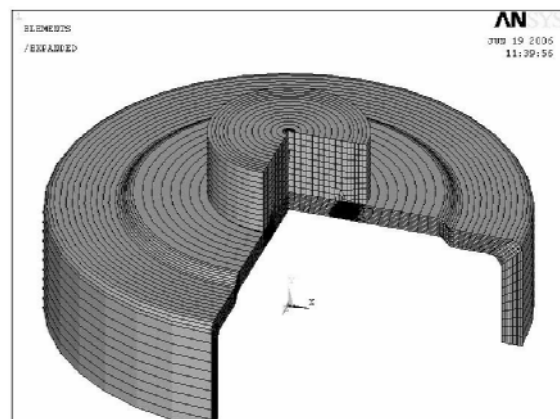
K : ضریب انتقال حرارت

T : درجه حرارت

L_r و L_z : کسینوسهای هادی بردار عمودی (n)

نوع المان انتخاب شده برای تحلیل الکتریکی-حرارتی المان دو بعدی پلین ۶۷^۱ است. این المان دارای قابلیت حرارتی، الکتریکی، الکتریکی-حرارتی است. این المان چهار وجهی و دارای چهار گره در هر گوشه با سه درجه آزادی در هر گره است. شکل ۵ قطعه را در حالت تقارن محوری در حالت سه چهارم مدل نشان می دهد.

شکل ۶ این المان را در حالت چهار وجهی نشان می دهد و شکل ۷ قطعات مورد بررسی را همراه با المانهای به کار رفته در آن در حالت دو بعدی تقارن محوری نشان می دهد. با توجه به اینکه المان مورد استفاده برای تحلیل اجزاء محدود یک المان چهار وجهی با چهار گره در گوشه ها است تابع شکل المان به صورت زیر تعریف می شود:



شکل ۵: مدل سه بعدی اجزاء محدود قطعه مورد بررسی.

^۱- PLANE67

در این معادلات:

ρ : مقاومت مخصوص
 $[H]$: ماتریس هدایت الکتریکی

t: زمان

Δt : تغییر (افزایش) زمان در هر مرحله

$\{T\}_{n+1}$: دمای گره ها در مرحله n+1

$\{T\}_n$: دمای گره ها در مرحله n

درایه های ماتریس $[H]$ از رابطه زیر به دست می آیند:

$$h_{ij}^e = \iint \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) 2\pi r dr dz \quad (17)$$

معادلات (۱۶) و (۱۲) و (۱۳) و (۶) به ترتیب با افزایش زمان در هر مرحله به میزان ۰/۰۰۰۱ ثانیه حل می شود.

گرمای نهان ذوب و انجماد در این مدل سازی با استفاده از پارامتر آنتالپی در نظر گرفته شده است. آنتالپی با h نمایش داده شده و تغییر آن به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} h &= h_0 \dots \dots \dots T = 0, \\ h &= h_1 \dots \dots \dots T \leq T_s, \\ h &= h_2 \dots \dots \dots T_s \leq T \leq T_l, \\ h &= h_3 \dots \dots \dots T \geq T_l. \end{aligned} \quad (10)$$

T_s : درجه حرارت شروع انجماد در سرد کردن

T_l : درجه حرارت شروع ذوب در حرارت دادن

۲-۱- رسانایی الکتریکی سطح تماس

حرارت تولید شده بر اثر بار گذاری الکتریکی روی سطوح تماس بر اساس قانون ژول به صورت زیر مشخص می شود [۱۰]:

$$Q = J \cdot (V_T - V_C), \quad (18)$$

$$J = Ecc \cdot (V_t - V_c). \quad (19)$$

در این رابطه:

Q: حرارت تولید شده بر روی المانهای تماسی

J: جریان الکتریکی

V_C, V_T ولتاژ بر روی هریک از دو طرف المان تماسی و ECC هدایت الکتریکی سطح تماس است. از این پارامتر به منظور برقراری جریان الکتریکی بین سطوح تماس استفاده می شود. این پارامتر به صورت عکس مقاومت الکتریکی سطح به صورت زیر تعریف می شود:

$$ECC = \frac{1}{Rc} \cdot \frac{1}{Ac} \quad (20)$$

در این رابطه:

Ac: مساحت سطح تماس

Rc: مقاومت تماسی

مقاومت سطوح تماس یکی از عوامل تاثیر گذار در این روش جوشکاری است. این پارامتر متاثر از پارامترهای متعددی از قبیل جنس اجزاء، درجه حرارت اجزاء، کیفیت سطح سطوح تماس و فشار وارده بر سطوح است. شکل ۸ رابطه بین مقاومت سطح تماس با فشار و درجه حرارت بر اساس مطالعات انجام شده توسط سانگ را نشان می دهد. بیشترین مقدار مقاومت سطح تماس برای فولاد معمولی در فشار حدود ۵۰ Mpa و دمای ۵۰ درجه سانتیگراد برابر با $300 \mu\Omega$ است. کمترین این مقدار برابر با $10 \mu\Omega$ و در

معادله دیفرانسیل آنالیز الکتریکی به صورت زیر بیان می شود که در آن ϕ پتانسیل الکتریکی است:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (11)$$

$$j = -\frac{1}{\rho} \nabla \phi \quad (12)$$

$$q = \frac{1}{\rho} (\nabla \phi \cdot \nabla \phi) \quad (13)$$

شرایط مرزی به کار رفته در تحلیل الکتریکی عبارتند از:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \quad (14)$$

و شرط مرزی روی سطوح خارجی قطعات:

$$\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial \phi}{\partial n} ds = I. \quad (15)$$

شرط مرزی روی سطح بالایی آداپتور و پایینی تشتک (ترمینال ورودی و خروجی جریان) و ماتریس نهایی معادله ای که باید در معادله (۱۱) حل شود به صورت زیر به دست می آید:

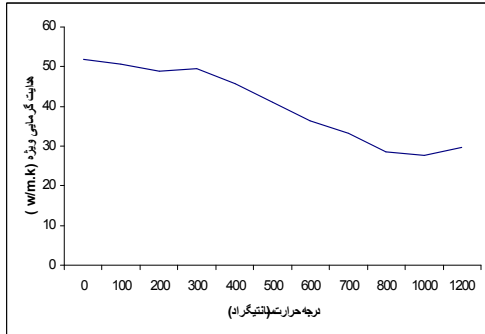
$$[H] \{\phi\} = 0. \quad (16)$$

در این معادلات

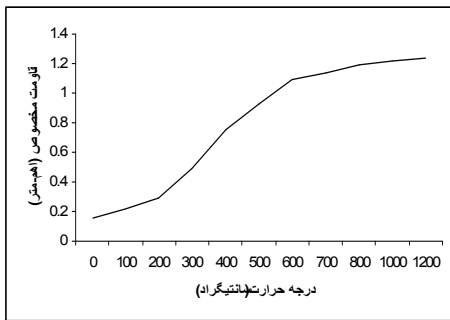
ϕ : پتانسیل الکتریکی

J: جریان الکتریکی

تغییرات ضریب هدایت گرمایی و مقاومت مخصوص با تغییر دما از دمای محیط تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد در شکلهای ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹: تغییر ضریب هدایت گرمایی فولاد با درجه حرارت.



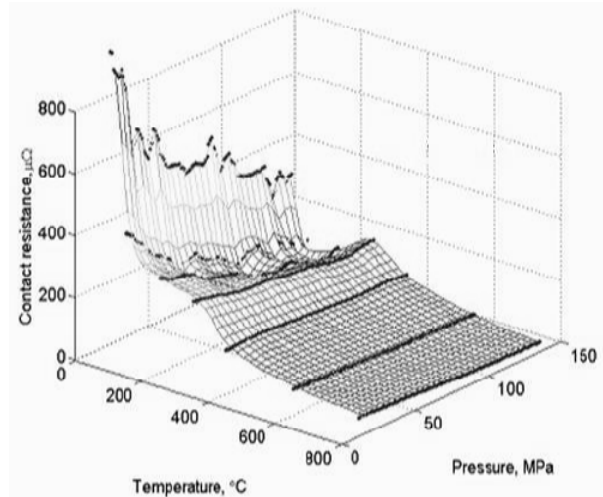
شکل ۱۰: تغییر مقاومت مخصوص فولاد با درجه حرارت.

۲- نتایج

۲-۱- درجه حرارت ناحیه تماس

نتیجه گرفته شده از یک تحلیل الکتریکی - حرارتی تعیین درجه حرارت ایجاد شده در ناحیه تماس دو قطعه است. شکل ۱۱ درجه حرارت ایجاد شده در ناحیه تماس دو قطعه را به ازای بارگذاری الکتریکی به میزان 2500 A را برای مدت زمان ۰/۱۸ ثانیه را نشان می دهد و شکل ۱۲ این درجه حرارت را به ازای بارگذاری الکتریکی به میزان 1300 A برای مدت زمان ۰/۳ ثانیه را نشان می دهد.

فشار تقریبی ۴۰۰ Mpa و دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد است. مقدار این مقاومت به صورت تابعی از دما و فشار بر روی مدل قابل اعمال است. اما از آنجایی که در این تحقیق پارامتر فشار در نظر گرفته نشده است مقدار این مقاومت تنها به صورت تابعی از دما در نظر گرفته می شود.



شکل ۸: رابطه مقاومت سطوح تماس با فشار و درجه حرارت سطوح برای فولاد کم کربن.

۳-۱- رسانایی حرارتی سطح تماس

رسانایی حرارتی سطح تماس عامل هدایت حرارت از یک طرف اتصال به طرف دیگر است این پارامتر تابعی از دما و فشار ناحیه ی تماس است و معادله کلی آن به صورت زیر تعریف شده و مقدار آن به صورت زیر است:

$$q'' = TCC(T_t - T_c), \quad (21)$$

$$TCC = 15 - 25 \times 10^{-5} \frac{j}{(s.m^2.k)}$$

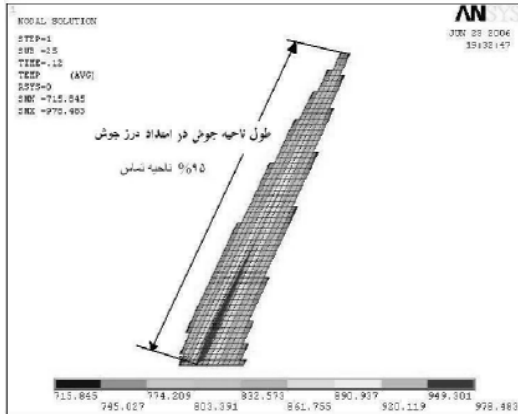
که در این رابطه:

q'' : شار حرارتی عبوری و

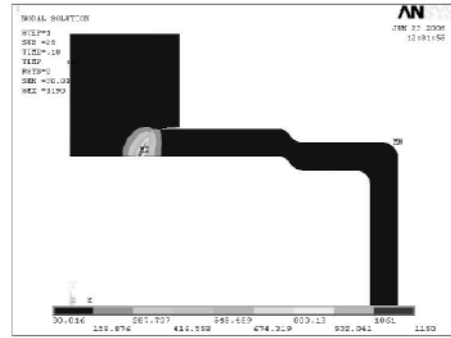
Tc و Tt : دمای طرفین سطح تماس است.

۴-۱- خواص فیزیکی مواد

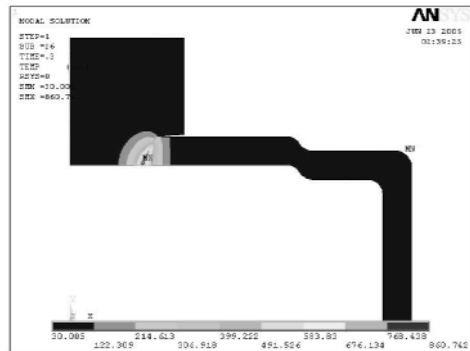
خواص فیزیکی مواد با تغییر درجه حرارت تغییر می نماید. از جمله این خواص می توان به ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه، مقاومت مخصوص و ضریب انبساط طولی اشاره نمود [۱۵].



شکل ۱۳: طول ناحیه جوش برای بارگذاری الکتریکی A
۲۵۰۰ پس از مدت زمان ۰/۱۲ ثانیه.



شکل ۱۱: ماکزیمم درجه حرارت حاصل از جریان الکتریکی ۲۵۰۰ A به مدت ۰/۱۸ ثانیه.



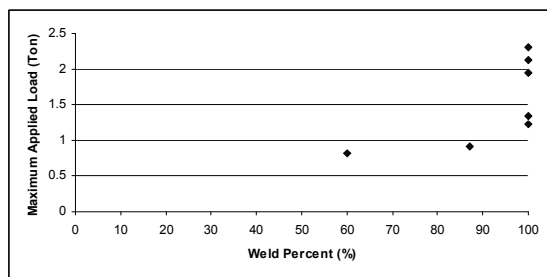
شکل ۱۲: ماکزیمم درجه حرارت حاصل از جریان الکتریکی ۱۳۰۰ آمپر به مدت ۰/۳ ثانیه.

۳- نتایج آزمون کشش

نتایج آزمون کشش چند نمونه از این قطعات به همراه طول ناحیه ی جوش حاصل از تحلیل در این بخش مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج آزمون کشش حاصل از تغییرات تعداد سیکل برای نمونه های جوشکاری شده با ۱۷۰۰ آمپر در جدول ۱ و شکل ۱۴ نشان می دهد که با

جدول ۱: نتایج ثبت شده حاصل از تغییرات تعداد سیکل برای نمونه جوشکاری شده با A ۱۷۰۰.

ردیف	تعداد	طول جوش	حداکثر نیروی تحمل
۱	۶	٪۶۰	۰/۸۱۵
۲	۱۲	٪۸۷	۰/۹۱۱
۳	۱۸	٪۱۰۰	۱/۳۳۷
۴	۲۴	٪۱۰۰	۱/۲۳۲
۵	۳۰	٪۱۰۰	۲/۰۰۳
۶	۳۶	٪۱۰۰	۱/۹۵۲
۷	۴۲	٪۱۰۰	۲/۱۱۷



شکل ۱۴: میزان تغییرات حداکثر استحکام کششی اتصال بر حسب درصد جوش در ناحیه اتصال با A ۱۷۰۰.

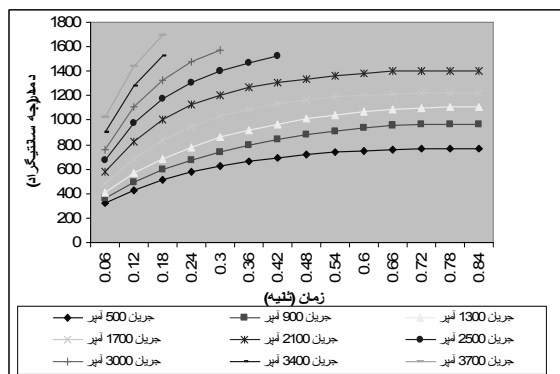
۲-۲- میزان طول ناحیه جوش در اتصال

با انتخاب گره هایی که دمای آنها به بالا تر از ۷۶۵ درجه سانتیگراد (یک دوم دمای ذوب فولاد) رسیده اند، می توان ناحیه جوش را شناسایی نمود. با اندازه گیری طول المانهای متصل به این گره ها در راستای درز جوش می توان تعیین نمود که چه مقدار از این درز به دمای مورد نیاز برای ایجاد اتصال رسیده است. لازم به ذکر است که هر چه المانهای انتخاب شده برای مش بندی سطح ریزتر باشند دقت تعیین ناحیه جوش بیشتر خواهد بود. شکل ۱۳ طول این ناحیه را برای بارگذاری الکتریکی ۲۵۰۰ A پس از مدت زمان ۰/۱۲ ثانیه نشان می دهد. در این حالت ۹۵٪ از ناحیه تماس دو قطعه جوش خورده است.

جدول ۲: نتایج ثبت شده حاصل از تغییرات تعداد سیکل برای نمونه جوشکاری شده با A ۳۷۰۰.

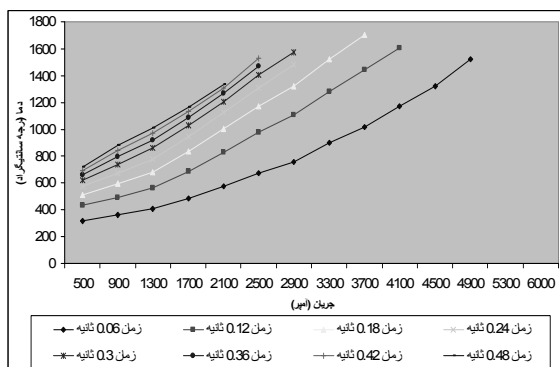
ردیف	زمان	طول جوش	حداکثر نیروی تحمل
۱	۶	٪۱۰۰	۲/۱۸
۲	۱۲	٪۱۰۰	۲/۰۴۴
۳	۱۸	ذوب شده	۱/۵۴
۴	۲۴	ذوب شده	۱/۷۰۹
۵	۳۰	ذوب شده	۱/۷۵۱
۶	۳۶	ذوب شده	۱/۶۳۵
۷	۴۲	ذوب شده	۱/۷۲۹

اما برای جریانهای بیشتر از ۲۰۰۰ آمپر با کمترین تغییر در زمان اعمال جریان دمای ناحیه تماس تغییرات زیادی می کند. این تغییرات به گونه ای است که به عنوان مثال برای جریان ۳۰۰۰ آمپر بعد از گذشت زمان ۰/۳ ثانیه ناحیه تماس دو قطعه دچار ذوب موضعی می شود. شکل ۱۳ تغییر دمای ناحیه ی تماس با تغییر زمان اعمال جریان را برای کلیه ی جریانها نشان می دهد.



شکل ۱۳: دیاگرام تغییر دمای ناحیه تماس با تغییر زمان اعمال جریان برای جریانهای مختلف

نمودار شکل ۱۶ رابطه بین تغییرات جریان اعمال شده و دمای ناحیه تماس برای زمانهای مشخص را نشان می دهد. این نمودار بیانگر آن است که برای یک زمان اعمال جریان مشخص با تغییر جریان اعمال شده دما ابتدا با شیب ملایمی افزایش می یابد اما در جریانهای بالا تر به این شیب افزوده می شود. می توان این منحنی تغییرات را یک منحنی درجه دوم با شیب ملایم تر در نظر گرفت.



شکل ۱۶: دیاگرام تغییر دمای ناحیه تماس با تغییر مقدار جریان اعمال شده برای زمانهای مختلف

نتایج مربوط به اندازه گیری طول ناحیه ی جوش در شکل ۱۷ زیر نشان داده شده است. ابتدا تعریفی از جوش

افزایش طول ناحیه جوش در منطقه اتصال به استحکام مکانیکی اتصال نیز افزوده می شود و حداکثر بار محتمله افزایش می یابد. در جدول ۲ نیز که مربوط به عبور جریان ۳۷۰۰ آمپر است نتایج قابل توجهی دیده می شود. حداکثر بار تحمل شده مربوط به شرایطی است که طول جوش ۱۰۰٪ است. با افزایش زمان عبور جریان اتصال دچار ذوب موضعی می شود که این امر باعث کاهش استحکام آن می شود که در نتایج آزمون کشش کاملاً مشخص است.

به این ترتیب نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه های جوشکاری شده با نشان دادن اینکه افزایش طول ناحیه جوش به دست آمده از شبیه سازی بالارفتن استحکام کششی اتصال را به همراه دارد صحت مدلسازی را نشان می دهد.

۴- بحث و بررسی نتایج

پس از تحلیل های مختلف انجام شده با تغییر جریان از A ۵۰۰ تا A ۶۰۰۰ در ۱۴ مرحله و تغییر زمان جوشکاری از ۰/۰۶ تا ۰/۸۴ ثانیه در ۱۴ مرحله برای کلیه مقادیر جریانها و زمانها نتایج به دست آمده بحث می شود.

شکل ۱۵ نشان می دهد که برای جریانهای کوچک (زیر ۲۰۰۰ آمپر) با افزایش زمان اعمال جریان، درجه حرارت ناحیه تماس با شیب کمی افزایش می یابد. این افزایش تا زمان ۰/۶ ثانیه ادامه دارد اما بعد از این زمان تقریباً دما ثابت می ماند و یا اینکه افزایش بسیار جزئی است. این تغییرات به گونه ای است که حتی بعد از ۰/۸۴ ثانیه هم به نقطه ذوب نمی رسد.

قطعات از فاز جامد شده و در نتیجه باعث کاهش استحکام مکانیکی می شود.

جوشکاری با جریان پایین و تعداد سیکل بالا مطلوبتر از استفاده از جریان بالا و تعداد سیکل پایین است. این انتخاب علاوه بر کاهش مصرف انرژی مزیت مهم یکنواختی کیفیت محصولات تولید شده است. این نتایج همگی تقریباً در یک محدوده قابل قبول هستند و دارای کیفیت جوش یکنواختی هستند. نتایج به دست آمده از این مقاله به خصوص تکنیک به دست آمده برای پیش بینی طول ناحیه تماس در بهینه سازی فرآیند جوشکاری UW قابل کاربرد است. به خصوص در قطعات بزرگ که هزینه تجهیزات و آزمایشها بسیار بالا است، استفاده از روش وضع شده در این شبیه سازی به کاهش هزینه کمک می نماید.

۶- تشکر و قدردانی

بخشی از منابع مالی مورد نیاز برای انجام این تحقیق با استفاده از اعتبار طرح پژوهشی شماره ی ۸۱۵۱۲۹۹/۱/۰۱ دانشگاه تهران تامین شده است که موجب قدردانی است.

منابع

1. Kanne, W.R. Jr., "Solid-state Resistance Welding of Cylinders and Spheres", Welding J., Vol. 65, No. 5., pp. 33-38, 1986.
2. Kenne, W.R. Jr., "Upset Welded 304L and 316L Vassels for Storage Tests", WSRC-TR-0087 Report, 1996.
3. Kanne, W.R. Jr., "Development of a Solid-state Resistance Weld for Dual-burst Disk Assemblies", Report No. WSRC-TR-98-00109, 1998.
4. Kanne, W.R. Jr., "Solid-state Resistance Upset Welding: A Process with Unique Advantages for Advanced Materials", The 2nd Advanced Joining Technologies for New Materials", Cocoa Beach, FL, 1994.
5. Cannell, G.R., Gee, J.T., and Heise R.B., "Upset Welding Assures a Leak-tight Structurally Sound Seal", Welding J., Vol. 78, No. 9, pp. 41-44, 1999.
6. Miyazaki, Y., Saito, T., and Ichikawa, M., "Upset Weldability of Niobium-bearing High Strength 600 MPa Steel for Wheel Rims and Mechanism of Upset Welding", Welding World, Vol. 31, No. 5, pp. 348-357, 1993.
7. Kang, S.S., "A Study on Resistance Welding in Steel Sheets, Using a Tailor-Wlded Blank, I. Evaluation of Upset Weldability and

مطلوب بیان می شود: جوش مطلوب جوشی است که صد در صد طول ناحیه ی جوش شرایط مناسب برای برقراری پیوند متالورژیکی را پیدا کرده باشد و در ضمن هیچ نقطه از ناحیه ی جوش نیز وارد فاز مذاب نشده باشد شکل ۱۵ نشان می دهد که به ازای چه مقدار جریان و زمان برقراری جریان جوش مطلوب به دست می آید. به عنوان مثال با جریان ۲۱۰۰ آمپر از ۰/۱۸ ثانیه به بعد جوش مطلوب حاصل می شود و پایین تر از این زمان جوش ناقص خواهد بود. برای جریان ۳۷۰۰ آمپر تنها تا ۰/۱۸ ثانیه جوش حالت مطلوب داشته و از این پس ناحیه تماس جوش وارد فاز مذاب می شود. در ۵۳۰۰ آمپر تنها با زمان ۰/۱۸ ثانیه می توان جوشکاری مطلوب داشت.

جریان A	500	900	1300	1700	2100	2500	3000	3400	3700	4100	4500	4900	5300	5700
زمان														
0.06					60	95	100	100	100	100	100	100	100	100
0.12					60	95	100	100	100	100	100	100	100	100
0.18					60	95	100	100	100	100	100	100	100	100
0.24			50	87	130	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.3			47	95	130	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.42			42	80	130	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.48			40	88	130	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.54			70	94	130	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.6			78	97	130	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.66			82	100	130	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.72			82	100	130	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.78			86	100	130	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.78			88	100	130	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.84			89	100	130	100	100	100	100	100	100	100	100	100

عدم جوش یا جوش ناقص

جوش کامل و مناسب

جوشهای ذوب شده

شکل ۱۷: وضعیت جوشها و میزان ناحیه جوشکاری شده

در مقایسه با کل طول درز جوش بر حسب

زمان و جریان

۵- نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل الکتریکی- حرارتی و همچنین آزمون کشش نتایج زیر به دست آمد: افزایش تعداد سیکلهای کاری با تاثیر بر دمای ناحیه تماس باعث افزایش طول ناحیه جوش می شود. افزایش جریان نیز با تاثیر بر دما باعث افزایش طول ناحیه جوش می شود. با این تفاوت که جوشکاری با تعداد سیکلهای کاری بالا باعث بالاتر رفتن ناحیه متاثر از جوش می شود. در حالی که در جوشکاری با جریان بالا این ناحیه باریکتر است.

در مقدار جریان پایین افزایش تعداد سیکلها باعث بالا رفتن استحکام مکانیکی می شود. در حالی که در جریانهای بالا افزایش تعداد سیکل کاری باعث خارج شدن

11. Murakawa, H., "Finite Element Simulation of Seam Welding Process", Trans. JWRI, Vol. 30, pp. 111-117, 2001.
۱۲. مجذوبی، غ. "روش اجزاء محدود در مهندسی"، انتشارات دانشگاه بوعلی همدان، ۱۳۶۷.
13. ANSYS Release 9.0 Documentation.
14. Song, Q., "An Experimental Study Determines the Electrical Contact Resistance in Resistance Welding", Welding J., pp. 73s-76s, 2005.
15. David, L.O., Editor, "ASM Handbook", Vol. 6, pp. 249-253.
- Formability", J. Materials Processing Technology (Netherlands), Vol. 101, No. 1-3, pp. 186-192, 2000.
8. Yeung, K.S., "Transient Thermal Analysis of Spot Welding Electrodes", Welding J., Vol. 2., No. 1, pp 1s-6s, 1999.
9. Eggert, G.M. and Dawson, P.R., "Assessment of a Thermoviscoplastic Model of Upset Welding by Comparison to Experiment", Int. J. Mechanical Science, Vol. 28, pp 563-589, 1986.
10. Nied, H.A., "Finite Element Simulation of the Upset Welding Process", Welding J., Vol. 63, No. 4, pp. 123-132, 1984 .