

شبیه سازی جوش نقطه ای مقاومتی به روش MLPG جهت تعیین تنش های حرارتی - مکانیکی و تنش های پسماند

روح اله وحدتی^{۱*}، مهرداد عضو امینیان^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
واژگان کلیدی: RSW تمرکز تنش، روش های بدون شبکه، روش MLPG، روش FEM	در طی سالیان اخیر، تلاش هایی برای حذف شبکه از فرآیندهای حل عددی صورت گرفته که نتیجه ای این تلاش ها ایجاد گروهی از روش های محاسباتی به نام روش های بدون شبکه بوده است. در بین روش های بدون شبکه، روش های MLPG، یکی از روش های مؤثر و موفق در حل مسایل مختلف به شمار می آیند. در این پژوهش، الگوریتم بدون شبکه MLPG، برای شبیه سازی و مدل سازی تنش های حرارتی و مکانیکی در حین فرآیند جوش نقطه ای و همچنین تنش های پسماند پس از اتمام فرآیند جوش، استفاده شده است. در این روش از یک تابع پله ای واحد به عنوان تابع تست در فرم ضعیف شده ای ناحیه ای استفاده شده است و ناحیه ای آنالیز شده به زیر فضاهای کوچک تری با اشکال دایره ای تقسیم گردیده است. نتایج عددی حاصل از روش MLPG با نتایج حاصل از روش FEM مقایسه شده است. نتایج حاصل از روش بدون شبکه انطباق مناسبی با شبیه سازی FEM دارد.

۱- مقدمه

ابعادی و هندسی قطعات در حین جوش کاری کاسته می شود [۱].

نحوه ای اتصال دو ماده در جوش نقطه ای مقاومتی با اعمال هم زمان حرارت و فشار همراه است. فشار توسط دو الکتروود و حرارت مورد نیاز با استفاده از عبور دادن جریان الکتریکی از میان دو جسم تأمین می گردد (شکل ۱). طبیعی است که دو جسم فلزی به دلیل مقاومتی که در برابر عبور جریان دارند، تولید گرما و حرارت نموده و بدین ترتیب هسته ای جوش (Nugget) به حالت سیال تشکیل شده، دو جسم به یکدیگر پیوند می خورند.

جوش های نقطه ای مقاومتی، مهم ترین روش اتصال ورق های فلزی به یکدیگر است. حدود ۹۰ درصد جوش هایی که در مونتاژ بدنه ای خودروها به کار می رود از نوع جوش نقطه ای مقاومتی است. در یک خودروی سواری بیش از ۳۰۰۰ نقطه ای جوش مقاومتی استفاده می شود. این تعداد در خودروهای بزرگ تر هم چون مینی بوس ها و اتوبوس ها ممکن است به ۵۰۰۰ تا ۸۰۰۰ عدد برسد. از مزایای جوش نقطه ای می توان به فرآیند سریع اتصال و عدم نیاز به مواد پالایند^۱ اشاره نمود. در این نوع جوش نیز به مانند انواع دیگر جوش کاری، نیاز به حرارت بسیار بالایی برای ایجاد اتصال لازم نمی باشد و در نتیجه از میزان تغییرات

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: roooohi@gmail.com

۱. دانشجوی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان

۲. استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان

¹ Filter material

محاسبه‌ی تنش‌های پسماند وقت‌گیر و رسیدن به نتیجه‌ی صحیح در آن‌ها سخت می‌باشد. از این رو شبیه‌سازی و مدل‌سازی ریاضی منطقه‌ی جوش به‌منظور تحلیل میدان تنش در حین جوش‌کاری و بعد از آن اهمیت پیدا می‌کند [۴].

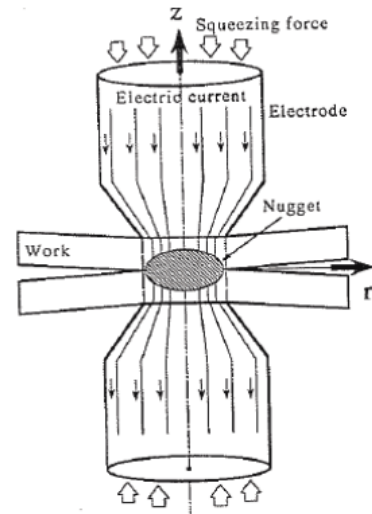
بررسی در مقالات، بیان‌گر وجود چند مدل مختلف در مدل‌سازی فرآیند جوش نقطه‌ای می‌باشد. از جمله اولین تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده است می‌توان به لیند و توکر در سال ۱۹۶۷ اشاره نمود [۵]. در کاری که توسط نید در ۱۹۸۴ انجام شد، با استفاده از نرم‌افزار تجاری ANSYS که نرم‌افزاری بر پایه‌ی المان محدود می‌باشد، به حل معادلات حاکم بر فرآیند جوش پرداخته شد و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی فلز ضد زنگ^۶ AISI316 مقایسه شد [۶].

طی تحقیق وی و هُو در سال ۱۹۹۰، مدلی سه‌بعدی برای تحلیل انتقال حرارت گذرا به‌منظور تخمین نحوه‌ی توزیع دما در حین فرآیند جوش نقطه‌ای مقاومتی ارائه گردید [۷].

انستاتشر و همکارانش (۱۹۹۰) توزیع تنش‌های پسماند و تغییرات ایجاد شده ناشی از آن‌ها در ریزساختار^۷ یک صفحه‌ی فولاد را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها همچنین رابطه‌ی میان پارامترهای جوش و رفتار خستگی ماده را تحلیل نمودند [۸].

بعضی از محققین هم‌چون سای و همکارانش ۱۹۹۲ تنها بخش حرارتی فرآیند جوش را تحلیل نموده‌اند. ایشان فرآیند حرارتی در حین جوش را مدل‌سازی کرده و تأثیر ضخامت‌های مختلف و مواد غیریکسان را بر نحوه‌ی توزیع دما و شکل ناگت مورد بررسی قرار دادند [۹]. مورفی و همکارانش (۱۹۹۹) علاوه بر بررسی نحوه‌ی توزیع دما در مواد جوش داده شده، چگونگی توزیع دما در الکترودهای جوش‌کاری را نیز مورد تحلیل قرار دادند [۱۰].

طی تحقیقی سان و داوون در ۲۰۰۰، مدلی ترمومکانیکی ارائه نمودند تا به‌وسیله آن تغییر شکل ورق را در حین



شکل ۱- نمایش شماتیک فرآیند جوش مقاومتی [۲]

حرارت تولید شده بر اثر عبور جریان الکتریکی را می‌توان بر اساس قانون ژول به‌صورت زیر بیان نمود [۲]:

$$Q = RI^2t \quad (۱)$$

که منظور از Q ، R ، I و t در آن به‌ترتیب جریان الکتریکی، مقاومت، حرارت تولید شده و زمان عمل جوش می‌باشد. بعد از پایان عملیات جوش، به‌دلیل توزیع نامنظم دما در محدوده‌ی جوش، تشکیل تنش‌های پسماند^۱ در فلز، ناگزیر می‌باشد که این تنش‌ها البته در حالت خودتعادلی^۲ هستند.

بررسی‌ها نشان داده است که وجود تنش‌های پسماند در جسم می‌تواند منجر به شکست ترد، انتشار ترک، کاهش عمر خستگی و ترک‌خوردگی‌های ناشی از خوردگی^۳ شود [۳]. بنابراین بررسی و تحلیل پدیده‌ی شکست ناشی از خستگی در اتصالات جوش نقطه‌ای، نیازمند بررسی تنش‌های پسماند و نحوه‌ی توزیع آن در محدوده‌ی محل جوش می‌باشد.

انکسار اشعه ایکس^۴ و مته‌زنی^۵ دو روش از روش‌های عملی مهم برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در ناحیه‌ی جوش‌خورده می‌باشد. روش‌های آزمایشگاهی و عملی در

^۱ Residual stress

^۲ Self-equilibrium

^۳ corrosion

^۴ X-ray diffraction

^۵ Hole-drilling

^۶ Stainless steel

^۷ microstructure

پیش‌بینی تغییرات در ساختار شبکه‌ی خود بودند که در موارد متعددی انجام آن‌ها به‌سادگی امکان‌پذیر نبود. برای رفع این مشکلات گروه جدیدی از روش‌های حل معادلات دیفرانسیلی ارایه گردیدند، که در این‌گونه روش‌ها، نیازی به شبکه‌بندی متعارف مانند آنچه در روش‌های المان محدود نیاز بود، وجود نداشت. در این روش‌ها تقریب‌های عددی حل معادله دیفرانسیلی، نه بر مبنای المان‌ها و روابط پیوستگی بین آن‌ها، بلکه بر مبنای مجموعه‌ای از نقاط انجام می‌پذیرد و هیچ‌گونه المان‌بندی و یا مشخصات و ویژگی‌هایی برای پیوستگی نقاط مشترک برای ساخت معادلات گسسته‌سازی نیاز نیست. لذا به این‌گونه روش‌ها به اصطلاح روش‌های تحلیل بدون المان یا بدون شبکه گفته می‌شود.

روش $MLPG^1$ یکی از روش‌های عددی نسبتاً نوین، بدون المان و کاراً، برای حل مسایل غیرخطی می‌باشد. روش مذکور و به‌طور کلی دیگر روش‌های بدون المان، اخیراً برای غلبه بر نقاط ضعف روش المان محدود مورد توجه قرار گرفته‌اند. در بین این روش‌ها، روش محلی بدون المان پتروف گالرکین (MLPG) به دلیل این که مطلقاً از هیچ نوع المانی چه به‌صورت آشکار و چه به‌صورت پنهان استفاده نمی‌نماید، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است.

برخلاف روش المان محدود که در آن از شبکه‌ی المان‌های به‌هم پیوسته استفاده می‌شود، در روش MLPG از شبکه‌ای از گره‌ها استفاده می‌گردد؛ هر گره دارای یک محدوده‌ی عملکرد است که البته این محدوده‌ها می‌توانند دارای هم‌پوشانی نیز باشند. لازم به‌ذکر است شبکه در نظر گرفته شده برای گره‌ها الزامی به منظم بودن ندارد، که البته فاصله و چگالی قرارگیری این گره‌ها در نقاط مختلف شکل، رابطه‌ی مستقیم با دقت حل مسأله خواهد داشت. دامنه‌ی انتگرال‌گیری که برای هر گره در نظر گرفته می‌شود، باید در نهایت به نحوی باشد که تمام قسمت‌های مختلف آن جسم را تحت پوشش قرار دهد. شکل ۲ نمونه‌ای از یک نوع شبکه‌بندی گره‌ها را در روش MLPG نشان می‌دهد.

فرآیند جوش‌کاری تحلیل نمایند. در این تحقیق نشان داده شد که ناحیه‌ی تماس، نقش مهمی در جوش‌کاری فلزات آلومینیومی دارد.

براساس تحقیقی که توسط هوژیانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ انجام شد، موضوع نحوه‌ی تغییرات دما و تنش‌های الاستیک و پلاستیک در ناحیه‌ی جوش و هم‌چنین نحوه‌ی توزیع فشار در سطح تماس مورد بررسی قرار گرفت [۱۱]. اگرچه تحقیقات و کارهای مختلفی در خصوص مدل‌سازی فرآیند جوش نقطه‌ای انجام و منتشر شده‌اند، اما هنوز جا دارد تا تحقیقات عمیق‌تری برای فهم بهتر رفتار ترمومکانیکی مواد در حین جوش‌کاری انجام گردد؛ گذشته از آن که کارهای انجام شده بیشتر به تحلیل انتقال حرارت و تخمین توزیع گستره‌ی دمایی در مواد تحت جوش یا الکترودها در حین فرآیند جوش‌کاری اختصاص داشته است.

آنچه در تحقیق حاضر مدنظر می‌باشد، شبیه‌سازی و مدل‌سازی تنش‌های حرارتی و مکانیکی در حین فرآیند جوش نقطه‌ای و هم‌چنین تنش‌های پسماند پس از اتمام فرآیند جوش می‌باشد و روشی که مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش بدون بعد MLPG می‌باشد. روش مذکور روشی نسبتاً نوین بوده که در بسیاری از انواع تحقیقات دیگر تاکنون مورد استفاده قرار گرفته شده است، اما طی بررسی‌هایی که انجام شد در خصوص موضوع تحقیق حاضر تا به حال از این روش استفاده نشده است.

۲- خلاصه‌ای از روش MLPG

ابداع روش‌های حل عددی و پیشرفت تکنولوژی‌های مربوط به کامپیوترهای محاسباتی باعث شد روش‌هایی که اساس آن بر شبکه‌بندی هندسه بود (از جمله المان محدود، تفاضل محدود و احجام محدود) برای آنالیز قطعات به‌کار گرفته شوند که این امر باعث گردید تا بسیاری از کمبودهای موجود در روش‌های تحلیلی مرتفع گردند. براساس این روش‌ها صدها برنامه و نرم‌افزار جامع برای آنالیز موضوعات در زمینه‌های مختلف طراحی گردید. ولی این روش‌ها نیز به نوبه‌ی خود دارای مشکلات زیادی بودند. چرا که هر کدام از این روش‌ها نیازمند در نظر گرفتن تمهیدات و تدابیر خاصی در مدل‌سازی و

¹ Meshless Local Petrov-Galerkin

انجام پذیرد، این امر زمان و هزینه‌ی بسیار زیادی را به خود اختصاص خواهد داد.

هم‌چنین در بین این مراحل باید هماهنگی بین المان‌ها و متغیرها در شبکه‌های متوالی حفظ گردد، که این مطلب نیز به تجربه، دقت و صرف زمان زیادی نیاز دارد و یا اینکه در صورت بروز تغییر شکل‌های زیاد، المان‌ها ممکن است از شکل طبیعی خود خارج گردند، به‌صورتی که اگر زاویه‌ی بین اضلاع المان از حدود ۳۰ درجه کمتر و یا از ۱۵۰ درجه بیشتر گردد در نتایج حاصله، خطاهای بسیار زیادی دیده شده و یا اینکه نتایج مسأله به‌طور کامل واگرا می‌گردد.

۳- روش تحقیق

با عنایت به فعالیت‌ها و تحقیقات انجام شده تاکنون، برای انجام یک تحلیل تنش پیرامون منطقه‌ی جوش مقاومتی و بررسی مقاومت آن در برابر انواع نیروها بایستی به نکات ذیل توجه ویژه‌ای داشت:

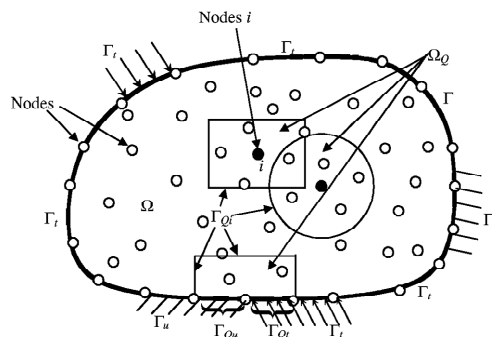
تنش‌های ایجاد شده در منطقه‌ی جوش ناشی از دو پارامتر می‌باشد:

الف) فشار بالای فیزیکی دو ورق توسط الکترودها نسبت به یکدیگر که منجر به تنش‌های مکانیکی می‌گردد.

ب) ایجاد اختلاف دمای بالا در منطقه‌ی جوش نسبت به نقاط دورتر که منجر به ایجاد تنش‌های حرارتی در جسم می‌گردد.

تنش‌های حرارتی در جسم ناشی از انبساط یا انقباض بخش‌های مختلف بر اثر اختلاف دماهای موجود در آن می‌باشد. عمده‌ی حرارت ایجاد شده، ناشی از مقاومت تماسی الکتریکی میان دو ورق بوده که دقیقاً همین بخش از دو ورق به‌طور موضعی حالت سیال گرفته و سپس با یکدیگر ممزوج و تحت فشار الکترودها به یکدیگر متصل می‌شوند. (در این تحقیق از مقاومت الکتریکی میان الکترودها و ورق صرف‌نظر شده است). حرارت بالای ایجاد شده در منطقه‌ی تماسی میان دو ورق از یک طرف، و اعمال هم‌زمان فشار مکانیکی الکترودها از طرف دیگر، باعث ورود تنش‌ها در این منطقه به محدوده‌ی پلاستیک

همانند آنچه در شکل ۲ نشان داده شده است، برای هر گره یک محدوده، خواه مستطیلی، دایره‌ای یا هر شکل دلخواه دیگری در نظر گرفته می‌شود که حاصل ضرب معادله‌ی حاکم بر مسأله در تابع تست در این محدوده، انتگرال‌گیری می‌شود. بنابراین به تعداد گره‌ها، رابطه‌ی انتگرالی وجود خواهد داشت. مهم نیست که داخل هر محدوده چند گره وجود دارد بلکه نکته‌ی مهم آن است که هر نقطه‌ی داخل محدوده‌ی انتگرال‌گیری، تحت تأثیر کدام گره‌ها و با چه ضریب وزنی می‌باشد.



شکل ۲- نمونه‌ای از شبکه گره‌ای در روش MLPG [۱۲]

به‌طور خلاصه این‌گونه می‌توان بیان کرد، در مسایلی که تغییر شکل‌های بزرگ و غیرقابل پیش‌بینی وجود دارد، تکیه بر روش‌های مرسوم مکانیک محاسباتی که بر پایه شبکه‌های المان‌بندی شده بنا شده‌اند منجر به افت شدید دقت محاسباتی می‌گردد. چرا که ممکن است در طی روند تحلیل مسأله، تغییر شکل‌های المان‌ها به مشکلات عددی ناخواسته‌ای منجر گردد. به‌عنوان مثال در مواردی ممکن است در حوزه‌ی تحلیل، نقاط منفردی که در آن‌ها تغییرات شدیدی در پاسخ‌ها ایجاد می‌گردد، وجود داشته باشد، استفاده غیرمعمول و ساده از این روش‌ها در چنین نقاطی باعث ایجاد خطای فراوان در تحلیل می‌گردد. نمونه‌ی بارز این مسأله تحلیل ترک در مکانیک خستگی می‌باشد. با رشد ترک، المان‌هایی که با هم در ارتباط هستند، از هم گسیخته گردیده و ساختار شبکه به‌طور کلی تغییر می‌یابد. در این‌گونه روش‌ها برای مرتفع کردن این مشکل به شبکه‌بندی مجدد دامنه حل پرداخته می‌شود. انجام این کار نیز با توجه به آنکه اگر دقت بالایی در تحلیل لازم باشد، باید بازسازی شبکه در فواصل بسیار کم

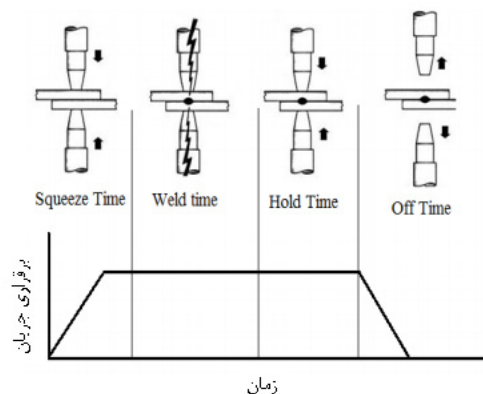
ناحیه‌ی جوش و بازه‌ی زمانی فرآیند جوش در این تحقیق از مدل‌سازی در نرم‌افزار ANSYS و به‌وسیله‌ی کدنویسی در بخش^۲ APDL آن استفاده شده تا در اجرای برنامه و گرفتن نتایج تحت شرایط مختلف تسهیل گردد.

با توجه به تقارن موجود در مسئله، تحلیل انجام شده در نرم‌افزار ANSYS به‌صورت متقارن محوری انجام شده و ورق‌های فلزی نیز به‌صورت دایروی در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به این‌که فرآیند حرارتی ایجاد شده برای ایجاد اتصال میان دو ورق به‌صورت نقطه‌ای و موضعی است، لذا میزان انتقال حرارت در خارج از محدوده‌ی محل جوش به شدت افت خواهد نمود؛ بنابراین انتخاب بخشی از دو ورق به‌صورت دایروی برای انجام تحلیل‌های تنش‌ی مورد نظر به هیچ‌وجه خللی در روند حل مسئله و دقت جواب‌ها ایجاد نموده است.

تحلیل تنش موردنظر صرفاً برای ورق‌های فلزی متصل شونده انجام شده و بستر نرم‌افزاری مورد استفاده در این بخش برای کدنویسی، MATLAB می‌باشد. روش MLPG در مسایل تحلیل تنش، بیشتر به‌صورت تنش‌صفحه‌ای^۳ و یا کرنش‌صفحه‌ای^۴ مورد استفاده واقع شده و با توجه به پیچیدگی‌های خاص آن، کمتر به‌صورت سه‌بعدی از آن استفاده گردیده؛ در این تحقیق سعی شده تا از روش MLPG به‌صورت متقارن محوری استفاده شود، که این نوع به‌کارگیری MLPG تا به‌حال در مقالات دیگر مشاهده نشده است.

روند کلی که در این تحقیق به‌کار گرفته شده، ابتدا یک تحلیل حرارتی بر روی مجموعه‌ی الکتروود و ورق انجام شده و سپس از نتایج آن برای انجام یک تحلیل ترموالاستیک-پلاستیک استفاده شده است، در بخش اول این تحقیق از کدنویسی در بخش APDL از ANSYS استفاده شده و در بخش دوم تحلیل، روش عددی بدون المان MLPG به خدمت گرفته شده است.

می‌گردد. لذا با برداشتن فشار مکانیکی و قطع جریان الکتریکی بعد از اتمام فرآیند جوش، مقداری تنش‌های پسماند^۱ در محدوده‌ی مورد نظر باقی می‌ماند. باید خاطر نشان کرد که فرآیند جوش نقطه‌ای دارای چندین مرحله است که زمان‌بندی آن‌ها با یکدیگر متفاوت می‌باشد؛ به‌عنوان مثال مقدار زمان برقراری جریانی، تنها شامل بخشی از زمان تماس و فشار الکتروودها می‌شود و نه همه-ی آن (شکل ۳).



شکل ۳- چرخه عملکرد جوش مقاومتی نقطه‌ای [۲]

انجام هرگونه تحلیل تنش‌ی ابتدا مستلزم یک تحلیل الکتریکی و انتقال حرارتی است. خواص مواد از جمله ضرایب انتقال حرارت، ضرایب مقاومت الکتریکی، ظرفیت‌های گرمایی، ظرفیت گرمایی نهفته (هم‌چون مقدار گرمای لازم برای تغییر حالت از جامد به مایع و یا بالعکس) و غیره، همگی با دمای جسم متغیر می‌باشند. بنابراین انجام تحلیل‌های الکتریکی و انتقال حرارتی به‌طور مجزا مقدور نبوده و هر دو تحلیل به‌صورت کوپله انجام شده است. شایان ذکر است مقدار ضریب مقاومت الکتریکی تماسی میان دو قطعه (دو ورق) به دمای محل تماس وابسته می‌باشد [۱۱].

هدف اصلی در این تحقیق بررسی وضعیت تنش‌های ترمومکانیکی در ناحیه‌ی جوش مقاومتی در طول فرآیند جوش و هم‌چنین تنش‌های پسماند بعد از عملیات جوش به روش عددی بدون المان پتروف گالرکین بوده، لذا برای محاسبه‌ی مقادیر دمایی مورد نظر در محدوده‌ی مکانی

² ANSYS Parametric Design Language

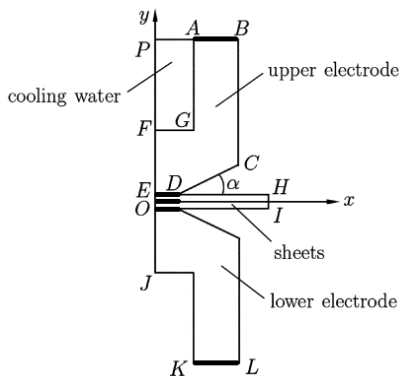
³ Plane stress

⁴ Plane strain

¹ residual stress

جدول ۱- مقادیر پارمترهای مربوط به جنس مواد برای الکتروود مسی و ورق فولاد برحسب تغییرات دما [۱۱]

دما (°C)	هدایت حرارتی W/(m.°C)		مقاومت الکتریکی $\Omega.m \times 10^{-8}$		مقاومت الکتریکی تماسی $\Omega.m^2 \times 10^{-7}$		گرمای ویژه J/(kg.°C)
	فولاد نرم	الکتروود مسی	فولاد نرم	الکتروود مسی	سطح اتصال	فولاد نرم	
21	64.75	390.3	14.2	2.64	2.38	443.8	397.8
93	63.25	380.6	18.6	3	2.31	452.2	401.9
204	55.33	370.1	26.7	4	2.25	510.8	418.7
316	49.94	355.1	37.6	5.05	2.12	561.0	431.2
427	44.86	345.4	49.5	6.19	1.93	611.3	439.6
538	39.77	334.9	64.8	6.99	1.79	661.5	452.2
649	34.91	320	81.1	8	1.31	762.0	464.7
732						1004	
760	30.50	315.5	101.1	8.98	0.567	2386	477.3
774						1004	
799						1189	
871	28.41	310.3	111.5	9.48	0.492		
982	27.66	305	115.8	9.98	0.417		
1093	28.56	300.1	117.9		0.342		
1204			120.9			1189	502.4



شکل ۴- سطوح عبوری شار جریان الکتریکی

مقادیر زمان کل فرآیند جوش ($T_f=0.32$ s)، زمان عبور جریان الکتریکی ($T_p=0.26$ s)، دامنه‌ی تابع جریان الکتریکی ($I_0=12.2$ kA) و فرکانس تابع جریان الکتریکی ($w=50$ Hz) می‌باشد.

مقادیر ظرفیت گرمایی برای الکتروود مسی به طور کامل از جدول ۱ استفاده شده اما در خصوص ورق های فولاد مقدار آنتالپی مدنظر قرار گرفته است. دلیل این موضوع نیز به این دلیل است که ورق های فولاد در ناحیه‌ی جوش به طور محلی ذوب شده، به مایع تغییر حالت می‌دهند. پس از قطع جریان الکتریکی، این تغییر فاز یک بار دیگر نیز اتفاق می‌افتد اما به طور معکوس؛ یعنی تغییر حالت از

۴- حل عددی معادله حرارتی ناشی از جریان الکتریکی

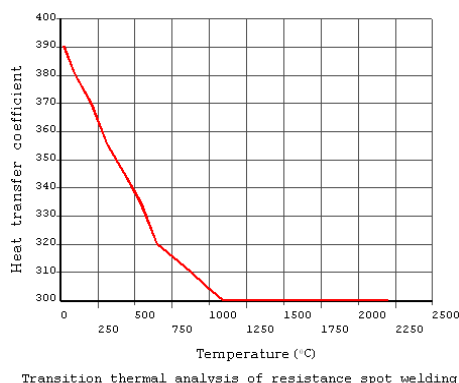
مقادیر پارمترهای اولیه، مطابق جدول ۱ مدنظر قرار گرفته است.

مقدار چگالی برای مس و فولاد به ترتیب برابر با ۸۹۰۰ و ۷۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب درنظر گرفته شده است. نقطه‌ی ذوب فولاد ۱۵۲۱ و نقطه‌ی انجماد آن ۱۴۸۲ درجه‌ی سلسیوس است. گرمای نهان فولاد هنگام تبدیل از فاز جامد به مایع برابر با 2.72×10^5 ژول بر کیلوگرم می‌باشد. مقادیر هندسی مورد نظر باتوجه به شکل ۴ برابر با مقادیر زیر می‌باشد:

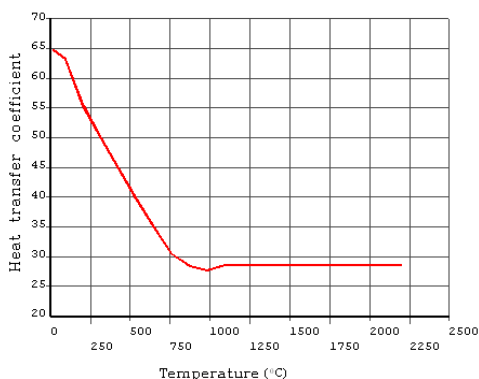
$OE=1.5$ mm, $OF=15$ mm, $PA=5$ mm, $PB=11$ mm, $AG=18$ mm, $EF=12.5$ mm, $ED=3$ mm, $OP=32$ mm, $\alpha=30^\circ$
 ضرایب همرفت انتقال حرارت با آب ($h_w=300$ W/m².K) و هوا ($h_a=20$ W/m².K) درنظر گرفته شده است.

۴-۱- المان بندی

در نرم افزار ANSYS پس از انتخاب المان (plane 55)، المان بندی هندسه‌ی مسأله به صورت آزاد انجام نشده است بلکه ابتدا خطوط موجود با توجه به حساسیت محلی خود تقسیم بندی شده و سپس سطوح به صورت منظم و از پیش تعیین شده، المان بندی گردیده اند. شکل ۷، تقسیم خطوط و سپس المان بندی مورد نظر را نشان می دهد. تعداد کل المان ها برابر ۷۵۰ عدد می باشد.



Transition thermal analysis of resistance spot welding



Transition thermal analysis of resistance spot welding

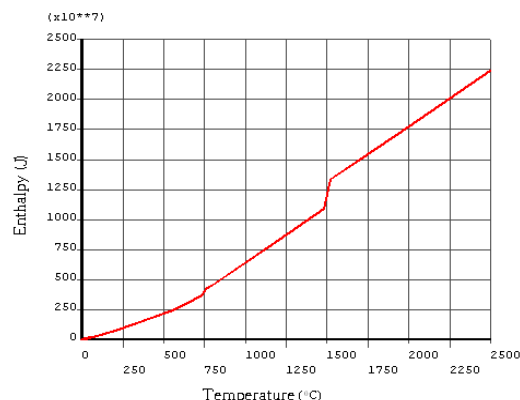
شکل ۶- تغییرات ضریب انتقال حرارت برحسب دما برای فولاد (بالا) و الکتروتود مسی (پایین)

۴-۲ حل مسأله و آرایه نتایج در خصوص معادله

حرارتی ناشی از جریان الکتریکی

بازه‌ی زمانی در هر مرحله از اجرا دست کم برابر با ۰/۰۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است. شکل ۸ گستره‌ی دمایی در جوش نقطه‌ای را در زمانی که مقدار آن حداکثر است نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود نتایج، انطباق قابل قبولی با یکدیگر دارند؛ محدوده‌ی حداقل و حداکثر در هر دو، تقریباً یکسان است.

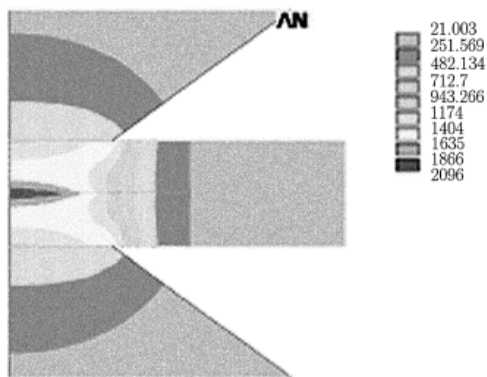
مایع به جامد. بنابراین وارد نمودن ظرفیت گرمایی فولاد به تنهایی در برنامه کافی نمی باشد، چرا که برای تغییر حالت های مذکور پاسخ گو نخواهد بود. بنابراین با استفاده از ظرفیت گرمایی داده شده برای فولاد در جدول ۱ و همچنین داشتن جرم حجمی و گرمای نهان آن (در تغییر حالت از مایع به جامد و برعکس)، می توان مقادیر آنتالپی برای فولاد را با توجه به تغییرات دمایی محاسبه نمود. شکل ۵ تغییرات آنتالپی برای ورق فولاد را در واحد حجم برحسب دما نشان می دهد.



Transition thermal analysis of resistance spot welding

شکل ۵- تغییرات آنتالپی در واحد حجم برحسب دما برای فولاد

لازم به ذکر است مقدار آنتالپی فولاد در دمای صفر درجه برابر با صفر در نظر گرفته شده است. البته این موضوع هیچ تأثیری در روند محاسبات ندارد چراکه تنها تغییرات آنتالپی مهم می باشد. پرش موجود در نمودار شکل ۵ در محدوده‌ی دمایی ۱۵۰۰ درجه‌ی سیلسیوس، ناشی از تغییر حالت فولاد از جامد به مایع می باشد و اختلاف عددی دو سر پرش، برابر با مقدار گرمای نهان فولاد در واحد حجم می باشد. به عبارت دیگر، شیب نمودار در قسمتی که دارای پرش است، برابر با گرمای نهان فولاد در واحد حجم است. مقدار شیب در دیگر نقاط نمودار برابر با حاصل ضرب گرمای ویژه در چگالی فولاد در آن دمای مشخص است. شکل ۶ تغییرات ضریب انتقال حرارت را برحسب دما برای فولاد و مس نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش دما از میزان توانایی انتقال حرارت این فلزات کاسته می شود که این موضوع هم چون دیگر خواص (مانند خواص متغیر الکتریکی برحسب دما) در تحلیل مسأله در نظر گرفته شده است [۱۲].

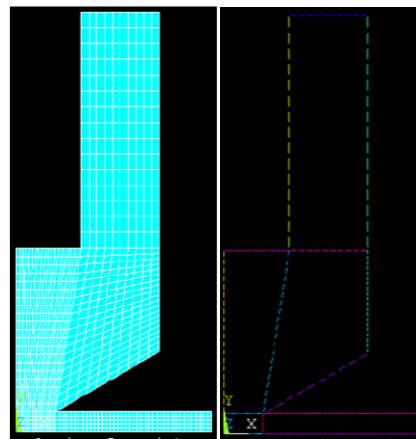


شکل ۸- گستره دمایی در جوش نقطه‌ای در زمانی که مقدار آن حداکثر است (بالا: تحقیق حاضر، پایین: تحقیق مرجع [۱۱])

۵- نتایج و بحث

برای تحلیل حداکثر مقدار نیروی عمودی میان دو الکترود هم‌چون مرجع این تحقیق برابر ۳۰۰۰ نیوتن در نظر گرفته شده است. تغییرات زمانی اعمال نیروی عمودی برحسب زمان به صورت شکل ۹ فرض شده است. با اعمال نیروی نشان داده شده در نمودار شکل ۹ به همراه میدان دمایی محاسبه شده در بخش (۴-۲)، مقادیر میدانی جابه‌جایی‌ها، کرنش‌ها و تنش‌ها برحسب زمان با استفاده از روش MLPG محاسبه شده است.

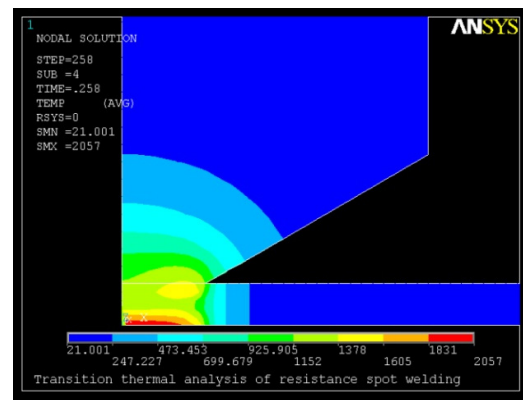
لازم به ذکر است، اعمال جریان الکتریکی و در نتیجه تولید حرارت و افزایش دما تا زمان $t=0/26$ ثانیه وجود داشته و به محض آن‌که جریان الکتریکی قطع می‌شود؛ مقدار دما در نقاط مختلف ورق رو به کاهش می‌گذارد اما همان‌طور که از نمودار شکل ۹ نیز مشخص است، فشار پشت الکترودها برداشته نشده و این فشار تا زمان حدود $t=0/46$ ثانیه نیز ادامه دارد. حداکثر فشار وارده ۳۰۰۰ نیوتن است که تا زمان $t=0/28$ ثانیه ادامه داشته و پس از آن طی زمان حدود $0/2$ ثانیه فشار کاهش پیدا می‌کند و به صفر می‌رسد و در نتیجه جدایش کامل الکترود از ورق اتفاق می‌افتد.

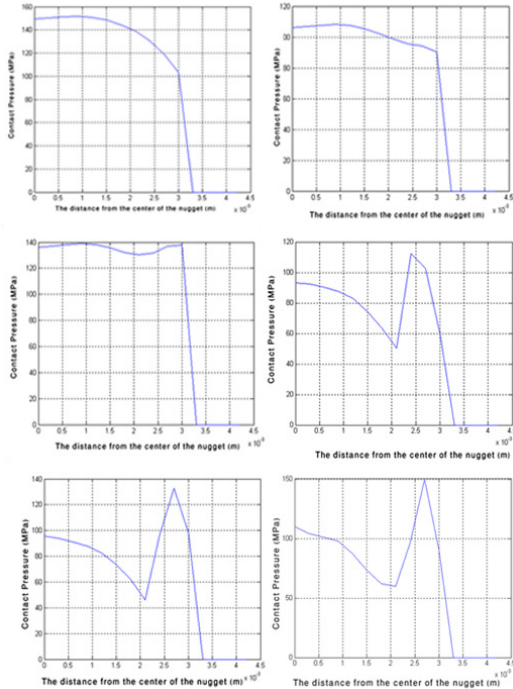


شکل ۷- تقسیم‌بندی خطوط و المان‌بندی سطوح

تغییرات اندک موجود میان نمودارها، ناشی از عدم وجود مقادیر عددی بعضی از پارامترها و خواص مواد مورد استفاده در تحقیق هوژیانگ از جمله مقادیر ضرایب انتقال حرارت و یا ظرفیت گرمایی ورق فولاد در دماهای بالای 1204 درجه است [۱۱].

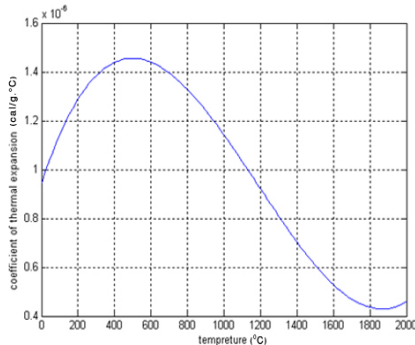
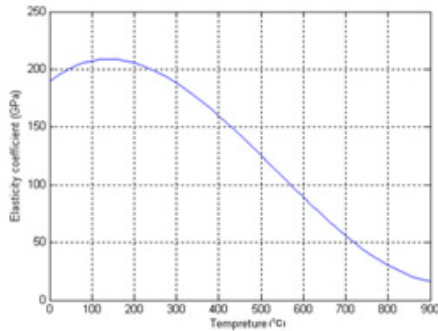
تغییرات اندک موجود میان نمودارها، ناشی از عدم وجود مقادیر عددی بعضی از پارامترها و خواص مواد مورد استفاده در تحقیق هوژیانگ از جمله مقادیر ضرایب انتقال حرارت و یا ظرفیت گرمایی ورق فولاد در دماهای بالای 1204 درجه است [۱۱].



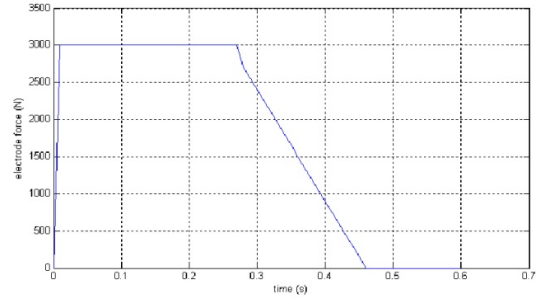


شکل ۱۱- توزیع فشار تماسی میان دو ورق در بازه زمانی ۰/۲ تا ۰/۱۴ ثانیه

به عنوان مثال شکل ۱۱، تغییرات ضریب الاستیسیته و ضریب انبساط حرارتی را برحسب دما نشان می‌دهد. بنابراین مشخص است که صرف تغییرات خواص مواد ناشی از تغییرات حرارت نیز در نحوه توزیع تنش‌ها دارای تأثیر بالایی است.



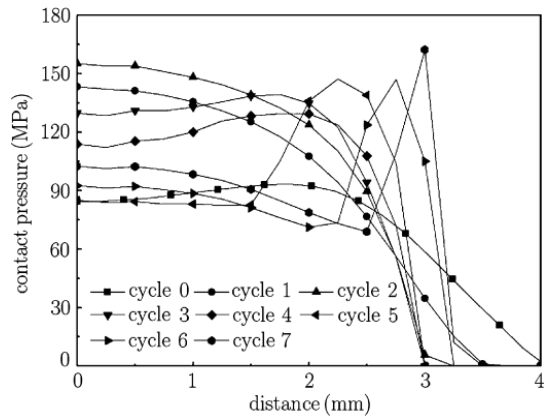
شکل ۱۲- تغییرات ضریب الاستیسیته (بالایی) و ضریب انبساط حرارتی (پایینی)



شکل ۹- مقدار نیروی عمودی الکتروود برحسب زمان

شکل ۱۱، توزیع فشار تماسی میان دو ورق را در زمان‌های $t=0/02$ ثانیه تا زمان $t=0/14$ ثانیه را در تحقیق حاضر نشان می‌دهد. مقایسه‌ی شکل ۱۱ با شکل ۱۰، نشان‌دهنده‌ی تطابق نسبتاً خوبی میان نتایج تحقیق حاضر با مرجع [۱۱] می‌باشد. خاطر نشان می‌سازد که روش مورد استفاده در مرجع مزبور همان محدود بوده است.

بررسی نتایج شکل ۱۱، نشان می‌دهد که در زمان‌های ابتدایی فرآیند جوش، توزیع فشار در سطح میان دو ورق تقریباً به صورت یکنواخت بوده اما از زمان $t=0/08$ ثانیه به بعد که مقدار دما در محدوده‌ی ورق به تدریج افزایش می‌یابد، تأثیر تنش‌های حرارتی، قابل ملاحظه گشته و نمودار، شکل دیگری به خود می‌گیرد. تأثیر دیگری که بر اثر افزایش دما قابل مشاهده می‌باشد، تأثیر بر روی خواص مواد می‌باشد.

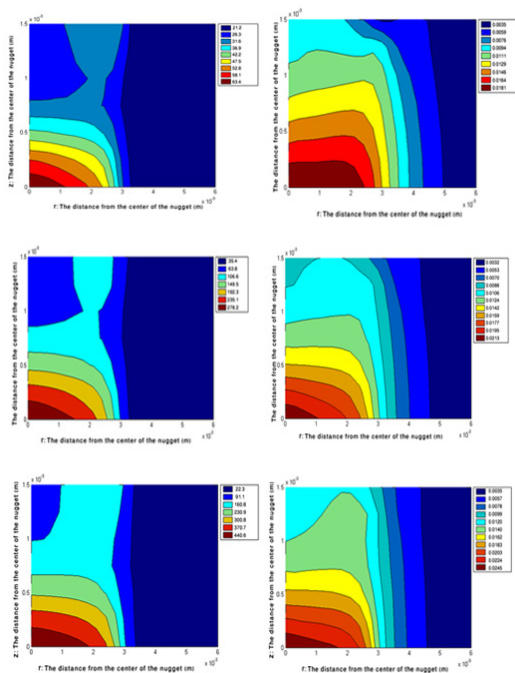


شکل ۱۰- توزیع فشار تماسی میان دو ورق براساس مرجع ۱۱

همانطور که پیشتر نیز اشاره گردید، این موضوع از دو منظر قابل بررسی است؛ یکی آن‌که با تغییرات دمایی، میزان ضرایب الاستیسیته و انبساط حرارتی دست‌خوش تغییرات قابل توجهی می‌گردد و دیگر آن‌که با توجه به عدم انقیاد کامل ورق، شرایط انبساط نسبتاً آزاد آن فراهم است.

شکل ۱۵، میزان کرنش‌های پلاستیک را در زمانی که مقدار دما به حداکثر مقدار خود می‌رسد نشان می‌دهد در صورتی که تحت همین شرایط جسم شروع به سرد شدن و باربرداری گردد، تقریباً همین مقادیر کرنش به‌عنوان کرنش‌های باقیمانده در جسم باقی می‌مانند و باعث ایجاد تنش‌های باقیمانده می‌گردند.

گستره‌ی تنش عمودی σ_z در لحظه‌ی دمایی حداکثر در شکل ۱۶، نشان داده شده است. با توجه به این‌که در این لحظه مقادیر نیروی عمودی الکتروود و همچنین میزان دما در ورق در حداکثر مقدار خود قرار دارد، بنابراین می‌توان گفت که مقادیر تنش‌های عمودی σ_z در شکل ۱۷، مقادیر حداکثری تنش عمودی σ_z در طول فرآیند جوش هستند.

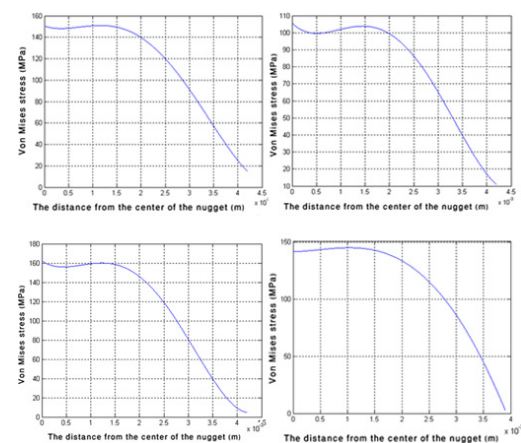


شکل ۱۴- کانتور توزیع کرنش مماسی (نمودارهای سمت چپ) کانتور توزیع دمایی (نمودارهای سمت راست) در بازه‌های زمانی ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۵ ثانیه

به‌منظور درک بهتر از مقدار و نحوه‌ی توزیع تنش‌ها، توزیع تنش فون مایز میان دو ورق نیز در نمودارهای شکل ۱۳ طی بازه‌های زمانی مختلف آورده شده است.

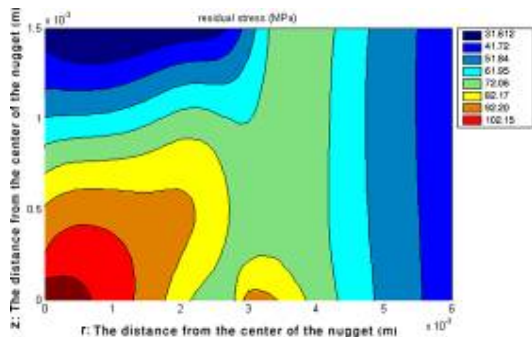
مقایسه‌ی نمودارهای ۱۳ بیان‌گر آن است که به‌طور کلی مقدار تنش فون مایز در سطح تماس، با افزایش شعاع کاهش پیدا نموده است. همچنین شکل کلی نمودار در بازه‌های زمانی مختلف دارای تغییرات چشم‌گیری نسبت به یکدیگر نبوده است. دلیل این موضوع آن بوده است که مقدار نیروی الکتروود در حد ۳۰۰۰ نیوتن ثابت بوده است و افزایش دمایی نیز بیشتر باعث افزایش کرنش‌ها گردیده است تا افزایش تنش‌ها؛ چرا که ورق برای انبساط دارای محدودیت خاصی نبوده است. به‌عنوان مثال افزایش دمایی در یک قطعه که تمام نقاط مرزی‌اش به‌طور کامل گیردار شده باشد، به‌طور قطع باعث افزایش تنش‌های داخلی می‌شود و برعکس مقدار کرنش‌ها دچار تغییرات خاصی نمی‌گردد.

نمودارهای شکل ۱۴، کانتورهای توزیع دمایی و کرنش مماسی را برای بازه‌های زمانی $t=0.2$ ، $t=0.4$ و $t=0.5$ نشان می‌دهد.

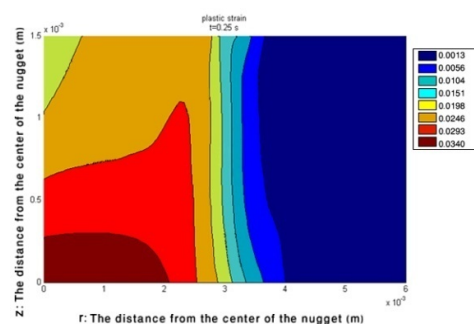


شکل ۱۳- توزیع تنش فون مایز میان دو ورق در بازه زمانی ۰/۰۲ تا ۰/۱۴ ثانیه

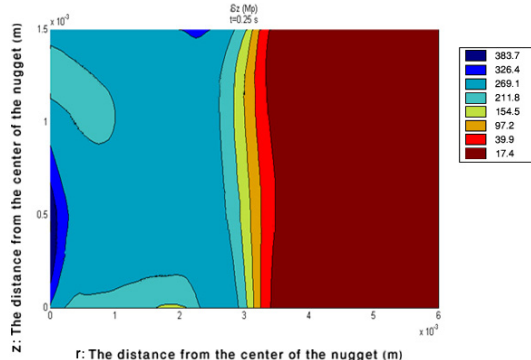
با مقایسه میان کانتورهای توزیع کرنش مماسی مشخص می‌شود که با افزایش زمان و در نتیجه افزایش دما (به کانتورهای دمایی در همان شکل توجه شود)، مقادیر کرنش‌ها به میزان قابل توجهی افزایش یافته است.



شکل ۱۷- توزیع تنش پسماند در منطقه جوش بعد از عملیات جوش کاری



شکل ۱۵- توزیع کرنش‌های پلاستیک در مقدار حداکثر دما



شکل ۱۶- توزیع تنش σ_z در مقدار حداکثر دما

۵-۱ نتیجه‌گیری:

در این تحقیق، تحلیل حرارتی و تحلیل تنش در منطقه‌ی جوش نقطه‌ای انجام و مورد بررسی قرار گرفته است. حرارت بالای ناشی از عبور جریان با آمپر بالا از میان دو ورقه‌ی که تحت فشار حدود ۳۰۰۰ نیوتن است، باعث ایجاد ناگت در محل تماس میان دو ورق و در نهایت اتصال آن‌ها به یکدیگر می‌گردد. جریان عبوری به صورت متناوب و با دوره‌ی تناوب ۰/۰۲ ثانیه است. میزان برقراری جریان به اندازه ۱۳ چرخه (۰/۲۶ ثانیه) است. فشار ۳۰۰۰ نیوتنی قبل از اعمال جریان الکتریکی برقرار می‌باشد و تا سه چرخه بعد از قطع جریان نیز این فشار ادامه خواهد داشت.

تحلیل حرارتی با استفاده از کدنویسی در بخش APDL از نرم‌افزار ANSYS (که یک نرم‌افزار براساس المان محدود است) انجام و به وسیله‌ی آن، توزیع دمایی منطقه-ی جوش در طول زمان جوش کاری و مقداری بعد از آن نیز محاسبه و استخراج گردید. در بخش دوم از این تحقیق به تحلیل تنش در منطقه‌ی جوش در طول زمان جوش کاری و مقداری نیز بعد از آن با استفاده از روش بدون المان MLPG پرداخته شد. برای این منظور ۱۴۷ گره در منطقه‌ی جوش توزیع گردیده است. با توجه به مدل سازی و محاسبات صورت گرفته منتج به موارد ذیل گردید:

۱- مشاهده‌ی کانتورهای توزیع دمایی حاکی از آن است که مرکز محل تماس میان دو ورق، دارای بالاترین دما

شکل ۱۷ مقدار تنش پسماند در منطقه جوش بعد از خاتمه‌ی عملیات جوش کاری را نشان می‌دهد؛ همان‌طور که مشاهده می‌گردد و انتظار می‌رفت، مقدار تنش پسماند در محل ناگت دارای بیشترین مقدار در حدود ۹۲ مگاپاسکال است. به تدریج که از منطقه‌ی ناگت فاصله گرفته می‌شود، از مقدار تنش پسماند نیز کاسته می‌شود؛ علت تمرکز بیشترین تنش پسماند در ناحیه‌ی ناگت، بالا رفتن قابل توجه دمای آن ناحیه و در نتیجه کاهش شدید تنش تسلیم در جسم می‌باشد؛ طبیعی است وجود تنش پسماند در ناحیه‌ی ناگت، استعداد آن را برای ایجاد ترک ورشد ترک در بارهای سری افزایش خواهد داد. زمان جوش کاری، دامنه‌ی شدت جریان، فرکانس جریان الکتریکی و قطر الکترود از جمله مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار در افزایش یا کاهش ناحیه‌ی تنش پسماند می‌باشد؛ از این رو بهینه‌سازی پارامترهای مزبور یکی از مهم‌ترین راه‌کارها در کاهش تنش پسماند می‌باشد [۱۳].

یکنواخت می‌باشد اما به تدریج و با گذشت زمان که مقدار حرارت تولیدی قابل توجه می‌شود، محل حداکثر فشار به سمت انتهای منطقه‌ی تماس تمایل می‌یابد، که این موضوع ناشی از تأثیر تنش‌های حرارتی می‌باشد. البته ایجاد اختلاف قابل ملاحظه در خواص مواد (هم‌چون ضریب الاستیسیته و ضریب انبساط حرارتی) میان نقاط موجود در اوایل منطقه تماس و نقاط موجود در انتهای منطقه‌ی تماس نیز از جمله دلایل عمده در نحوه‌ی توزیع فشار تماسی در این منطقه می‌باشد.

۴- وجود توزیع دمایی بالا در منطقه‌ی جوش باعث پایین آمدن قابل توجه تنش تسلیم می‌شود و در نتیجه با اعمال نیروی ۳۰۰۰ نیوتنی شرایط ورود به منطقه پلاستیک در منطقه‌ی جوش فراهم می‌گردد. پس از عمل باربرداری در پایان منطقه‌ی جوش، مقادیر قابل توجهی از کرنش‌ها و تنش‌های پسماند در منطقه‌ی جوش باقی می‌ماند که کانتور آن‌ها قبلاً نمایش داده شده است.

نسبت به دیگر نقاط است و به تدریج که از نقطه مذکور فاصله گرفته می‌شود، از میزان دما کاسته می‌شود.

۲- در طول زمان جوش کاری و عبور جریان الکتریکی، مقدار دما در مرکز سطح تماس در زمان $t=0/24$ ثانیه به حداکثر مقدار خود (حدود ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) می‌رسد؛ این دما باعث ذوب محلی دو ورق در پیرامون مرکز سطح تماس و در نهایت اتصال دو ورق به یکدیگر می‌گردد. مهم‌ترین عامل در تولید حرارت، ناشی از مقاومت الکتریکی میانی سطح مشترک دو ورق می‌باشد و مقاومت الکترودها و تأثیر آن‌ها در تولید حرارت بسیار ناچیز است چراکه جنس آن‌ها از مس بوده و اصولاً طراحی آن‌ها نیز به گونه‌ای بوده است که کم‌ترین مقاومت الکتریکی و حرارتی را داشته باشند و بدین‌وسیله شرایط را برای تولید بیشترین حرارت در سطح تماس مشترک مهیا نمایند.

۳- بررسی نمودار فشار تماسی در سطح مشترک دو ورق نشان‌دهنده‌ی آن است که در زمان‌های ابتدایی جوش کاری، توزیع تنش میان دو سطح تقریباً به‌طور

مراجع:

- [1] ERTAS, A.H., SONMEZ, F.O. (2007). "A parametric study on fatigue life behavior of spot welded joints". Proceedings of the 8th International Fracture Conference, Istanbul, Turkey.
- [2] Kou, S. (2003). "Welding Metallurgy". John Wiley & Sons, New Jersey.
- [3] Parmar, R.S. (1999). "Welding Processes and Technology". second ed. Khanna Publishers, New Delhi.
- [4] Hilley, M.E. (1971). "Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction". SAE J784a, pp. 21-24.
- [5] Lindh, D.V., Tocher, J.R. (1967). "Heat generation and residual stress development in resistance spot welding". Weld. J., Vol. 46, pp. 351-361.
- [6] Nied, H.A. (1984). "The finite element modeling of the resistance spot welding process". Weld. J., Vol. 63, pp. 123-132.
- [7] Wei, P.S., Ho, C.Y. (1990). "Axisymmetric nugget growth during resistance spot welding". ASME J. Heat Transfer, Vol. 112, pp. 316-390.
- [8] Anastassiou, M., Babit, M., Lebrun, J.L. (1990). "Residual stress and microstructure distribution in spot welded steel sheets: relation with fatigue behavior". Mater. Sci. Eng. A, Vol. 123, pp. 141-156.
- [9] Tsai, C.L., Jammel, O.A., Papritan, J.C., Dickinson, D.W. (1992). "Modeling of resistance spot weld nugget growth". Weld. J., Vol. 71, pp. 47-54.
- [10] Murphy, A.J., Yeung, K.S., Thornton, P.H. (1999). "Transient thermal analysis of spot welding electrodes". Weld. J., Vol. 78, pp. 1-6.

- [11] Zhigang, H., Yuanxun, W., Chunzhi, L., Chuanyao, C. (2006). "A multi-coupled finite element analysis of resistance spot welding process". *Acta Mechanica Solida Sinica*, Vol. 19, No. 1, pp. 86-94.
- [12] Rosli, A.B., Muhamad, M.N., Ruzaimi, M., Rejab, M. (2008). "Fatigue life prediction of spot-welded structures: a finite element analysis approach". *European Journal of Scientific Research*, Vol. 22, No. 3, pp. 444-456.
- [13] Yaghi, A., Hyde, T.H., Becker, A.A., Sun, W., Williams, J.A., Pathiraj, B. (2006). "Simulation of Residual stress in welded P91 PIPES". *Proceeding of the 5th International Conference on Mechanics and Materials in Design*, REF: A0406.0402, Porto-Portugal.