

مطالعه تجربی اثر قطر دکمه جوش بر تنش‌های پسماند در نمونه‌هایی با جوش نقطه‌ای از جنس AISI 1008

عباس فدایی*
آزاد برزویی

استادیار، دانشگاه بوعلی سینا همدان، دانشکده مهندسی
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا همدان، دانشکده مهندسی

چکیده

فرآیندهای ساخت و تولید مثل جوش کاری که همراه با تغییر شکل غیریکنواخت باشند، تنش‌های پسماند قابل توجهی ایجاد می‌کنند. در صنعت خودرو سازی از فرآیند جوش کاری مقاومتی برای اتصال قطعات بدنه و شاسی خودرو به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر با انجام اندازه گیری به روش سوراخ کاری و با استفاده از کرنش سنج مقاومتی، اثر تغییر قطر دکمه جوش بر تنش‌های پسماند در نمونه‌هایی از جنس ورق فولاد AISI 1008 با جوش نقطه‌ای جستجو شده است. توزیع تنش پسماند شعاعی و محیطی در لبه دکمه جوش و تنش‌های پسماند طولی و عرضی در مرکز دکمه جوش برای هشت نمونه‌ی استاندارد آزمایشی با قطرهای مختلف دکمه جوش تعیین و نشان داده شده‌اند. بر اساس مطالعه انجام شده، با افزایش اندازه‌ی قطر دکمه‌ی جوش، تنش‌های پسماند شعاعی و محیطی کاهش می‌یابند.

واژه‌های کلیدی: مطالعه تجربی، جوش کاری نقطه‌ای، تنش‌های پسماند، قطر دکمه جوش، روش سوراخکاری

Experimental Study on Effect of Nugget Diameter on Residual Stresses in the AISI 1008 Spot Weldments

A. Fadaei Assistant Professor., Bu-Ali Sina University, Engineering Faculty
A. Borzuie M.Sc., Student, Bu-Ali Sina University, Engineering Faculty

Abstract

Manufacturing and production methods such as welding with non uniform deformation cause significant residual stresses. In automotive industry, resistance spot welding process was used to joint chassis and body parts widely. In present research, with utilization of the hole drilling method and using the resistance strain gage, effects of nugget diameter variation on residual stresses in AISI 1008 spot weldments were investigated. The distributions of radial and hoop residual stresses in edge of the nugget and longitudinal and transverse residual stresses in the nugget center of eight standard specimens with the different nugget diameters were determined and illustrated. The results show that by increasing the nugget diameter, the radial and hoop residual stresses were decreased.

Keywords: Experimental study, Spot welding, Residual stresses, Nugget diameter, Hole drilling method

۱- مقدمه

در تحقیق حاضر با انجام آزمایشات، اثر تغییر قطر دکمه جوش بر تنش‌های پسماند در نمونه‌هایی از جنس ورق فولاد AISI 1008 معادل St 14 [۶] با جوش نقطه‌ای جستجو شده است. نوع مطالعه و جنس انتخاب شده برای نمونه‌های آزمایشی از جنبه‌های نو تحقیق می‌باشند. اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به روش سوراخ کاری انجام گرفت. تنش‌های پسماند در لبه دکمه جوش درهشت نمونه و در وسط دکمه جوش برای یک نمونه آزمایشی اندازه‌گیری شدند.

۲- مشخصات نمونه‌های آزمایشی

در صنعت خودرو سازی از فرآیند جوشکاری مقاومتی برای اتصال قطعات بدنه و شاسی خودرو به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. لذا جهت کاربرد صنعتی پژوهش حاضر، جنس نمونه‌ها از ورق فولاد AISI 1008 معادل St 14 انتخاب شد که از فولادهای پرکاربرد در زمینه‌ی ساخت بدنه خودرو می‌باشد. ترکیب شیمیایی ورق که با انجام آزمون تعیین شده و مقادیر استاندارد [۶]، در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

خواص مکانیکی برای ورق‌های مورد استفاده، بر اساس استاندارد ASTM A370-03a با آزمون کشش ساده توسط ماشین یونیورسال سروهیدرولیک ساخت شرکت اینسترون تعیین گردیدند. نتایج آزمون و مقادیر متناظر استاندارد آنها (EN 10130 : 1999) [۶] برای St14 در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

نمونه‌های آزمایشگاهی از ورق با جنس St14 در ابعاد ۲۰۰×۳۰×۱ میلی‌متر برش زده شدند. معمولاً ورق‌های فولادی را برای جلوگیری از زنگ زدگی پوشش روغنی می‌دهند. لذا قبل از فرآیند جوشکاری سطوح تمییزکاری شدند. همان گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بر اساس استاندارد صنایع خودروسازی ابعاد نمونه جهت انجام آزمایش‌های خستگی انتخاب گردید [۶-۷].

جدول ۱- ترکیب شیمیایی نمونه و ترکیب استاندارد برای St 14

	Al	P	Si	Mn	C <	Fe
استاندارد	-	۰٫۰۶۰	۰٫۰۱۰	۰٫۴۰۰	۰٫۰۸۰	پایه
نمونه	۰٫۰۴۲	۰٫۰۶۳	۰٫۰۵۰	۰٫۳۱۹	۰٫۰۵۰	پایه

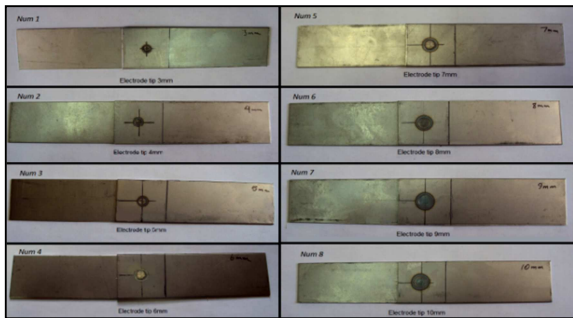
جدول ۲- خواص مکانیکی ورق‌ها

خواص	استاندارد	نمونه
تنش تسلیم (MPa)	۲۴۰	۲۷۴
استحکام کششی (MPa)	۳۷۰	۴۰۰
درصد ازدیاد طول	۲۹	۳۱

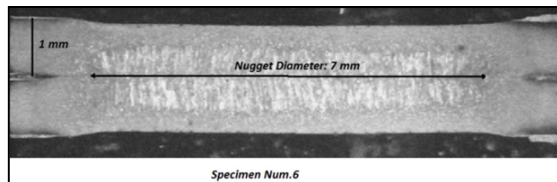
تنش‌های باقیمانده در یک ماده یا جسم بدون اعمال بار خارجی، تنش‌های پسماند خوانده می‌شوند. این تنش‌ها معمولاً از فرآیندهای ساخت و تولید به واسطه تغییر شکل‌های پلاستیک غیر متجانس، انقباض‌های گرمایی و انتقال فازی حاصل می‌شوند. منشأ تنش‌های پسماند می‌تواند مکانیکی، گرمایی و شیمیایی باشد. از بعد مکانیکی، فرآیندهای ساخت و تولید مثل جوش کاری که همراه با تغییر شکل غیریکنواخت باشند، تنش‌های پسماند قابل توجهی ایجاد می‌کنند. در شرایط تعادل تنش‌های پسماند کششی در هر جسم با تنش‌های پسماند فشاری در مکان دیگر از آن جسم متوازن می‌شوند. عموماً تنش پسماند کششی در سطح جسم نامطلوب است، زیرا این تنش به گسیختگی کمک می‌کند. تنش‌های پسماند فشاری در سطح جسم، استحکام خستگی و مقاومت در مقابل ایجاد ترک را افزایش می‌دهند.

در زمینه تنش‌های پسماند در جوشکاری نقطه‌ای تحقیقات محدودی انجام گرفته است. چا و نا [۱] با ارائه یک تحلیل الکتریکی- گرمایی- مکانیکی، تنش‌های پسماند حاصل از جوش کاری نقطه‌ای مقاومتی در ورق‌های فولادی ضدزنگ ۳۰۴ را تعیین و اثر پارامترهای مختلف بر این تنش‌ها را نشان دادند. آنها معادلاتی برای تنش‌های پسماند بر حسب شرایط مختلف جوش کاری توسعه دادند که بر مبنای آنها می‌توان پارامترهای جوش کاری را طوری انتخاب کرد که این تنش‌ها حداقل شوند. ورال و همکارانش [۲] با مطالعه تجربی استحکام خستگی در ورق‌های فولاد گالوانیزه و فولاد آستینیتی ضدزنگ که به حالت لبه روی هم جوش کاری نقطه‌ای شده بودند، نمودارهای تنش - تعداد سیکل خستگی را برای قطرهای مختلف دکمه جوش استخراج کردند. رنجبر و همکارانش [۳] یک مدل سازی الکتریکی- گرمایی - مکانیکی برای پیش بینی تنش‌های پسماند در طی مراحل مختلف جوش کاری نقطه‌ای ارائه داده و اثر پارامترهای مختلف جوش کاری بر توزیع این تنش‌ها را بررسی کردند. نتایج تحلیل با اندازه‌گیری‌های انجام شده به روش انکسار اشعه X انطباق خوبی را نشان می‌داد. ما و موراکاوا [۴] شکل‌گیری دکمه جوش در جوش مقاومتی نقطه‌ای برای سه قطعه از ورق فولادی با استحکام بالا را به روش عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. شبیه‌سازی اجزاء محدود برای تعیین اندازه دکمه جوش و شکل‌گیری آن انطباق خوبی با اندازه‌گیری‌های تجربی نشان داد. مشیدی و ستاری فر [۵] رشد دکمه جوش در فولادهای آستینیتی را به روش عددی و تجربی مطالعه کردند. آنها اثر زمان جوش کاری و شدت جریان در جوش کاری نقطه‌ای بر رشد دکمه جوش را بررسی کردند.

می کند و از آنجا که باعث تخریب موضعی شده و در بسیاری از موارد تأثیر عمده‌ای بر قابلیت استفاده‌ی قطعه به جا نمی‌گذارد، نیمه مخرب محسوب می شود.



شکل ۲- نمونه‌های نقطه جوش با قطرهای الکتروود ۳ تا ۱۰ میلی‌متر



شکل ۳- تصویر میکروسکوپیکی از دکمه ی جوش (نمونه شماره ۶)

جدول ۴- اندازه‌ی قطر دکمه جوش در نمونه‌ها

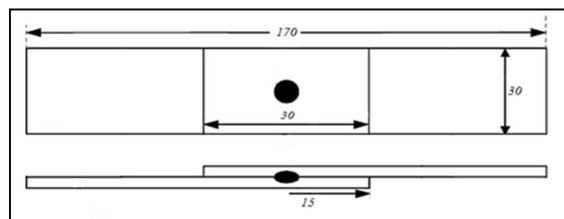
شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
قطر نوک الکتروود (mm)	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
قطر دکمه جوش (mm)	۲٫۶	۳٫۵	۴٫۳	۵٫۲	۶٫۱	۷٫۰	۷٫۹	۸٫۲

در این روش ابتدا کرنش سنج ها به یک قطعه‌ی دارای تنش پسماند متصل شده سپس یک سوراخ کوچک با عمق تقریباً برابر قطر سوراخ در مرکز کرنش سنج ایجاد می‌شود. این سوراخ به صورت محلی تنش ها را در محیط پیرامونی آزاد نموده و کرنش‌های رها شده به وسیله‌ی سه کرنش سنج با آرایش روزت، اندازه‌گیری می‌شوند. با داشتن مقادیر کرنش‌های رها شده و بر اساس روابط الاستیسیسته مقادیر تنش‌های پسماند تعیین می‌گردند.

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، دو موقعیت برای تعیین تنش‌های پسماند انتخاب گردید. مرکز نقطه جوش و ناحیه‌ی متأثر از گرما، به دلیل خواص مکانیکی ویژه و نیز تغییرات ساختاری متعددی در طی جوش کاری، نواحی بسیار مستعد جهت

جهت جوشکاری نمونه‌ها از دستگاهی با ظرفیت kVA ۱۲۰ که مجهز به برد کنترلی و فک پنوماتیکی می‌باشد، استفاده شد. الکتروودهای متعددی با قطرهای ۳ تا ۱۰ میلی‌متر در قسمت دماغه آنها تهیه و بر روی دستگاه نقطه جوش نصب گردید. در نهایت تعداد ۸ نمونه با استفاده از الکترودهایی با قطرهای مختلف تهیه شدند که مشخصات آنها در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. در جدول ۳ زمان و شدت جریان اعمالی برای شکل‌گیری هر یک از نقطه جوش‌ها در نمونه های آزمایشی آورده شده اند.

برای اندازه‌گیری قطر دکمه جوش، نمونه های آماده شده در جهت طولی توسط دستگاه وایرکات برش داده شدند. پس از برش نمونه‌ها، سطوح پولیش و سپس اچ شده و با استفاده از میکروسکوپ از آنها تصویربرداری گردید. در نهایت با مقیاس‌بندی تصاویر، قطر دکمه جوش ها تعیین شدند. نمونه‌ای از این تصاویر در شکل ۳ نمایش داده شده است. نتایج اندازه‌گیری برای نمونه ها در جدول ۴ ذکر شده اند.



شکل ۱- مشخصات هندسی نمونه آزمایشی (ابعاد بر حسب میلی متر هستند) [۶-۷]

جدول ۳- پارامترهای اعمال شده جهت جوش کاری نمونه ها

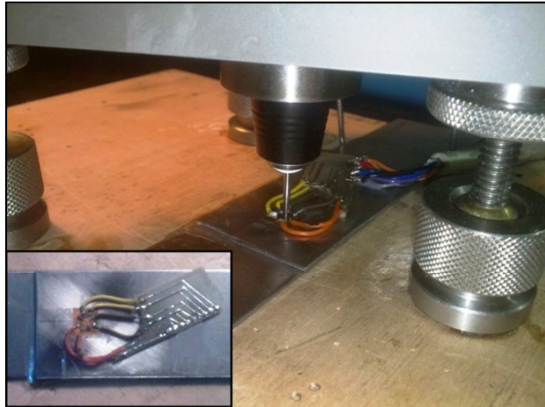
(هر سیکل جوش کاری برابر با ۰٫۲ ثانیه می باشد)

شماره نمونه	قطر نوک الکتروود (mm)	شدت جریان (kA)	تعداد سیکل ها
۱	۳	۶	۹
۲	۴	۷	۹
۳	۵	۱۰	۹
۴	۶	۱۲	۱۳
۵	۷	۱۴	۱۵
۶	۸	۱۶	۱۵
۷	۹	۱۷	۱۷
۸	۱۰	۱۸	۱۹

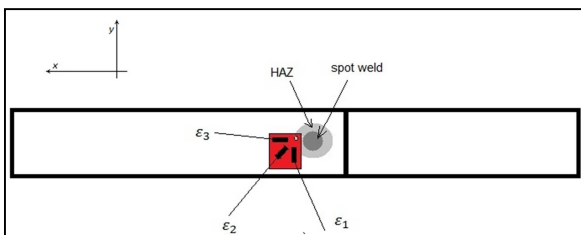
۳- مطالعه تجربی

روش سوراخ کاری، روشی پرکاربرد برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در بسیاری از مواد مهندسی است. این روش، نسبتاً ساده و مطمئن بوده و صدمه‌ی کمی را به نمونه وارد

ناحیه‌ی دکمه‌ی جوش و اعمال فشار از سوی الکترودهای جوش کاری، ناحیه‌ی آزاد دو ورق خیز مثبت پیدا کرده و از هم فاصله می‌گیرند. ولی در مرحله‌ی خنک کاری به دلیل منقبض شدن ناحیه‌ی جوش کاری (دکمه جوش و ناحیه‌ی متأثر از گرما) مقداری از خیز برگشته و از آنجا که تنش‌های پسماند نهایی حاصل از جمع جبری کلیه‌ی تنش‌های محبوس است، باعث می‌شود روند رشد تنش‌های پسماند کششی در راستای عمق با کاهش روبرو شود.



شکل ۴- موقعیت کرنش سنج در ناحیه‌ی متأثر از گرما و نحوه‌ی انجام اندازه‌گیری تنش پسماند



شکل ۵- موقعیت قرارگیری کرنش سنج نسبت به نقطه جوش و جهت‌های سنجش کرنش

نکته‌ی قابل بحث دیگر، اختلاف در دامنه‌ی تغییر تنش‌های پسماند برای هر نمونه در جهات شعاعی، x و محیطی، y است. از شکل‌های ۶ و ۷ در نمونه‌ی شماره ۱ تنش پسماند شعاعی در محدوده‌ی ۵۰ تا ۱۹۷ MPa و تنش پسماند محیطی در محدوده‌ی ۶۰ تا ۲۷۲ MPa تغییر می‌کنند. یکی از دلایلی که می‌توان برای این امر ذکر کرد عدم وجود تقارن در ساختار دکمه جوش به وجود آمده است، بدین معنی که شکل دکمه جوش به جای دایروی بودن، بیشتر بیضوی است و این امر نوعی عدم تقارن در میدان تنش ایجاد می‌کند.

روند دیگری که در بررسی شکل‌ها مشاهده می‌شود تأثیر افزایش اندازه‌ی قطر دکمه‌ی جوش بر تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده می‌باشد، به طوری که با افزایش قطر دکمه جوش، در کل مقدار تنش‌های پسماند کاهش می‌یابند که

انباشته شدن تنش پسماند هستند. لذا اندازه‌گیری‌ها در این دو ناحیه انجام گرفت. پس از آماده سازی سطح نمونه‌ها، کرنش سنج‌ها نصب شدند. از کرنش سنج نوع FRAS-2-11 ساخت شرکت TML با ساختار رزتی استفاده شد. جزییات مربوط به اندازه‌گیری تنش پسماند به روش سوراخ کاری در مرجع [۸] آمده است. شکل ۴ موقعیت کرنش سنج در ناحیه‌ی متأثر از گرما و نحوه‌ی انجام اندازه‌گیری را نمایش می‌دهد. فرآیند سوراخ کاری و اندازه‌گیری تنش در ناحیه‌ی متأثر از گرما در عمق نمونه و در فواصل ۰/۱ میلی‌متر با ۸ گام انجام گرفت. جهت‌های سنجش کرنش در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

برای محاسبه مؤلفه‌های اصلی تنش‌های پسماند از معادلات زیر استفاده شد [۸]:

$$\sigma_{max} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 + (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2)^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{min} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 + (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2)^2} \quad (2)$$

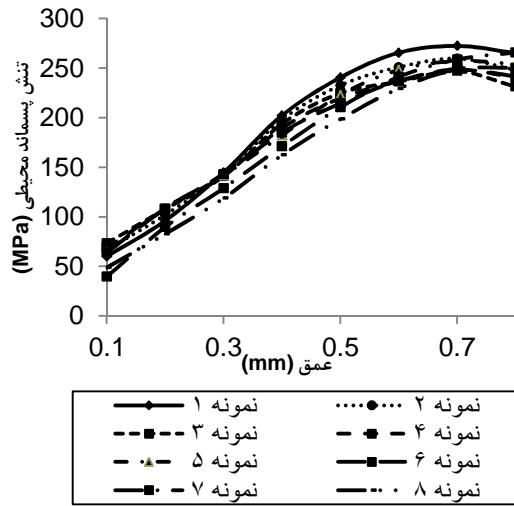
که ϵ مقادیر کرنش‌ها در سه راستای نشان داده شده در شکل ۵، A و B ضرایبی برای نمایش اثرات نوع کرنش سنج، خواص ماده مورد آزمایش و شرایط سوراخ کاری می‌باشند. ضرایب A و B از روابط زیر تعیین می‌شوند [۸]:

$$A = -\frac{(1 + \nu)a}{2E} \quad (3)$$

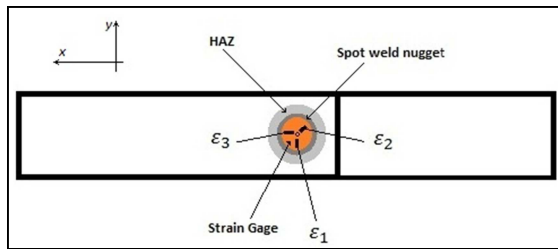
$$B = -\frac{b}{2E} \quad (4)$$

که E مدول الاستیسیته، ν نسبت پواسون، a و b ضرایب کالیبراسیون مرتبط با نوع کرنش سنج و کارخانه سازنده آن می‌باشند. در مطالعه انجام شده، بر اساس نوع کرنش سنج مقادیر $a=0.12$ و $b=0.34$ از کاتالوگ شرکت سازنده استخراج گردید.

نتایج اندازه‌گیری برای نمونه‌های آزمایشی با قطرهای مختلف دکمه جوش در شکل ۶ برای تنش پسماند شعاعی σ_x و در شکل ۷ برای تنش پسماند محیطی σ_y نشان داده شده‌اند. با توجه به این شکل‌ها، مشخص است با پیشروی در راستای ضخامت ورق، مقادیر تنش‌های پسماند در جهات شعاعی و محیطی افزایش یافته‌اند. دلیل این امر را باید در وضعیت گرادیان‌های دمایی ایجاد شده در هنگام جوشکاری جستجو کرد. بدین معنا که با حرکت در راستای ضخامت، دما افزایش یافته و این به معنای گرادیان دمایی مثبت است. لذا با نفوذ در عمق باید انتظار داشت که تنش‌های پسماند افزایش یابند. البته روند افزایش تنش تا نقطه‌ی خاصی ادامه پیدا کرده و سپس کاهش می‌یابد. این کاهش در نزدیکی سطح تماس دو ورق رخ می‌دهد. در مرحله‌ی جوش کاری بدلیل نرم و خمیری شدن



شکل ۷- تنش پسماند شعاعی σ_r در عمق برای نمونه‌های مختلف در ناحیه‌ی متأثر از گرما



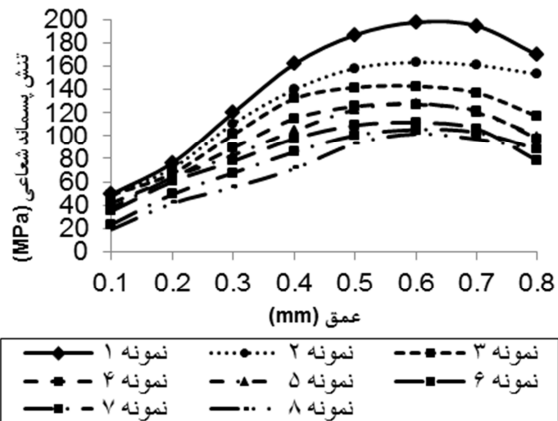
شکل ۸- موقعیت قرارگیری کرنش سنج نسبت به نقطه جوش و جهت های سنجش کرنش

این شکل نشان می‌دهد که با نفوذ در راستای ضخامت ورق، تنش‌های پسماند تا عمق معینی افزایش یافته و پس از آن شیب تغییرات تنش کاهش می‌یابد. به طوری که تقریباً در عمق 0.4 mm تنش‌ها ثابت می‌شوند. دکمه‌ی جوش از یک سو تحت فشار الکترودها قرار می‌گیرد و از سوی دیگر، نواحی داخلی که به حالت مذاب درآمده‌اند به دیواره‌های ناحیه‌ی خمیری فشار وارد می‌کنند، بنابراین سطوحی که در این میان واقع شده‌اند تحت فشار بوده، در برخی نواحی انقباض و انبساط‌های کنترل نشده‌ای ایجاد می‌گردند. این امر باعث می‌شود که در مقدار تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده در دکمه‌ی جوش یک جهش مشاهده شود [۱۰].

با برآزش منحنی می‌توان رابطه تنش‌های پسماند فون مایز بر حسب قطر نوک الکتروده در عمق‌های مختلف ۰٫۸ تا ۰٫۱ میلی‌متر در نمونه‌های آزمایشی، موثر بر ناحیه‌ی متأثر از گرما را تعیین کرد.

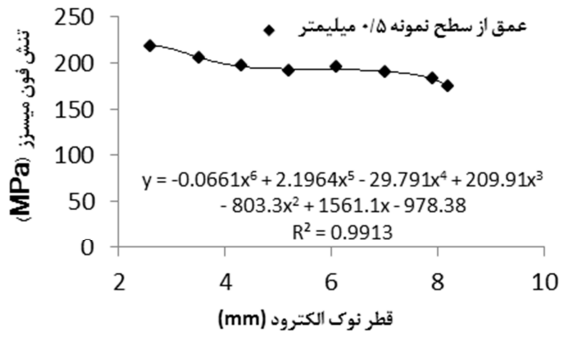
نشان از تأثیر اندازه‌ی قطر دکمه جوش بر نحوه‌ی توزیع گرادیان دمایی دارد. افزایش قطر دکمه جوش به معنای افزایش ناحیه‌ی ماده‌ی مذاب در حین جوشکاری است. گستردگی و پخش شدگی بیشتر دکمه جوش باعث می‌شود انتقال گرما در دو مرحله‌ی جوشکاری و خنک کاری افزایش یابد. این امر خود باعث کاهش شیب تغییرات دمایی یا در نمونه گردیده، که به کاهش تنش‌های پسماند می‌انجامد. به عبارت دیگر هر چه شیب تغییرات دما کاهش یابد کرنش‌های گرمایی کمتری نیز به وقوع می‌پیوندد، لذا تنش‌های گرمایی بوجود آمده نیز کاهش می‌یابند [۹].

پس از اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در ناحیه‌ی متأثر از گرما، اندازه‌گیری آن در مرکز نقطه جوش انجام گرفت. شکل ۸ به موقعیت کرنش سنج را نشان می‌دهد. نمونه‌ی شماره‌ی ۸ به دلیل داشتن بزرگترین قطر دکمه‌ی جوش و سهولت در آماده سازی و نصب کرنش سنج برای اندازه‌گیری انتخاب شد. به دلیل اثر فشار بر روی دکمه جوش به هنگام عملیات جوش کاری و همچنین گرادیان‌های شدید دمایی در سطوح پایین‌تر، پیش‌بینی شد که تنش‌های پسماند در ناحیه‌ی دکمه جوش نسبت به ناحیه‌ی متأثر از گرما تغییرات بیشتری داشته باشد. لذا برای افزایش دقت، در گام‌های کوچکتر در عمق نمونه، اندازه‌گیری انجام گرفت.

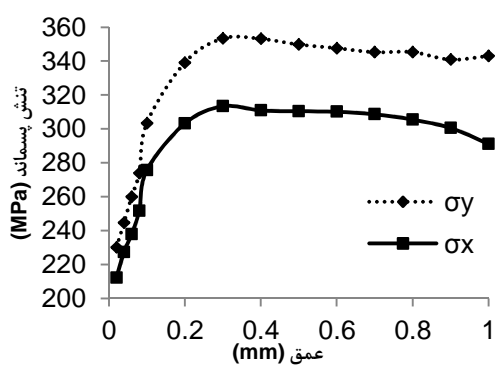


شکل ۶- تنش پسماند شعاعی σ_r در عمق برای نمونه‌های مختلف در ناحیه‌ی متأثر از گرما

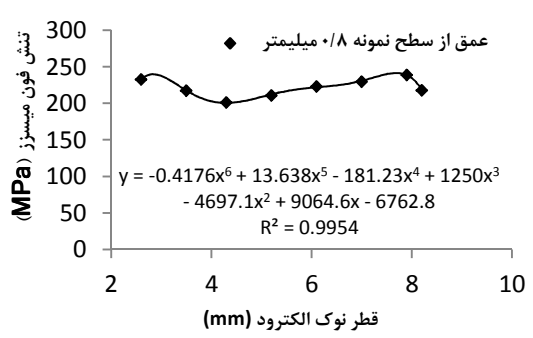
تنش‌های پسماند طولی و عرضی σ_x و σ_y موثر در عمق‌های مختلف مرکز دکمه جوش برای نمونه‌ی شماره ۸ در شکل ۹ نمایش داده شده است.



شکل ۱۲- تنش های پسماند فون مایز موثر در عمق ۰/۵ میلیمتر در نمونه‌های مختلف در ناحیه‌ی متأثر از گرما

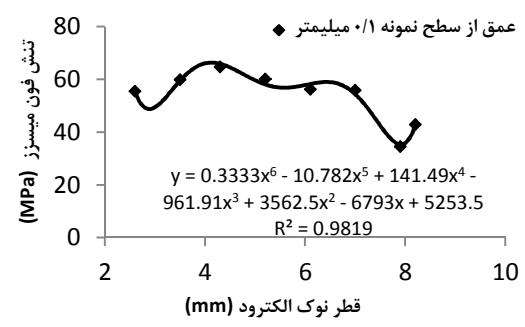


شکل ۹- تنش های پسماند σ_y و σ_x موثر در عمق های مختلف مرکز دکمه جوش برای نمونه‌ی شماره ۸



شکل ۱۳- تنش های پسماند فون مایز موثر در عمق ۰/۸ میلیمتر در نمونه‌های مختلف در ناحیه‌ی متأثر از گرما

در شکل های ۱۰ تا ۱۲ برای چهار عمق، تغییرات این تنش‌ها به همراه رابطه حاکم نشان داده شده‌اند. برای صحت برازش منحنی از معیار مجذور خطای متوسط یا R^2 استفاده شده است. نزدیکی این معیار به عدد یک مبین دقت در برازش منحنی می باشد.

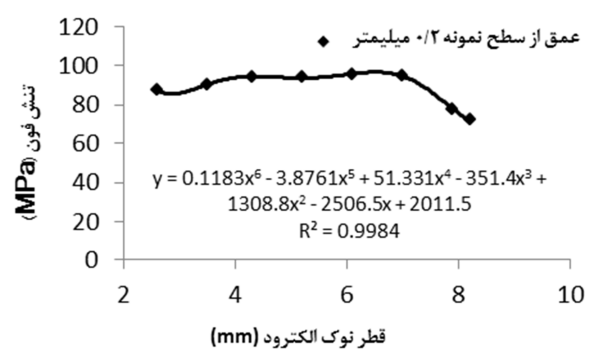


شکل ۱۰- تنش های پسماند فون مایز موثر در عمق ۰/۱ میلیمتر در نمونه‌های مختلف در ناحیه‌ی متأثر از گرما

۴- نتایج تحقیق

در تحقیق حاضر، تنش‌های پسماند حاصل از جوش نقطه‌ای در نمونه‌هایی از جنس St14 با قطر های مختلف دکمه جوش به روش سوراخ کاری تعیین گردیدند. بر اساس مطالعه تجربی انجام شده می توان نتیجه گرفت:

- ۱- برای تمام نمونه ها با قطرهای مختلف دکمه جوش، با پیشروی در راستای ضخامت ورق، مقادیر تنش های پسماند در جهات شعاعی σ_x و محیطی σ_y در لبه دکمه جوش افزایش می‌یابند. البته روند افزایش تنش تا نقطه‌ی خاصی ادامه پیدا کرده و سپس کاهش می‌یابد. این کاهش در نزدیکی سطح تماس دو ورق رخ می‌دهد.
- ۲- دامنه ی تغییرات تنش‌های پسماند برای هر نمونه در جهات شعاعی و محیطی با یکدیگر تفاوت دارند.
- ۳- با افزایش اندازه‌ی قطر دکمه‌ی جوش، تنش‌های پسماند شعاعی و محیطی کاهش می‌یابند که نشان از تأثیر اندازه‌ی قطر دکمه جوش بر نحوه‌ی توزیع گرادیان دما دارد.



شکل ۱۱- تنش های پسماند فون مایز موثر در عمق ۰/۲ میلیمتر در نمونه‌های مختلف در ناحیه‌ی متأثر از گرما

- [8] "Standard test method for determining residual stress by hole drilling strain-gage method", ASTM Designation, E837-95, pp. 642-648, 1997.
- [9] Cha B.W., and Na S.J., "A study on the relationship between welding conditions and residual stress of resistance spot welded 304-type stainless steels", Journal of Manufacturing Systems, vol. 3, no. 22, pp. 181-189, 2003.
- [10] Long X., "Finite element analysis of residual stress generation during spot welding and its affect on fatigue behavior of spot welded joint", Ph. D. Thesis, The Faculty of the Graduate School, University of Missouri-Columbia, 2005.

- ۴- با نفوذ در راستای ضخامت ورق، تنش‌های پسماند طولی و عرضی به ترتیب σ_x و σ_y موثر در عمق‌های مختلف مرکز دکمه جوش برای نمونه‌ی شماره ۸ تا عمق معینی افزایش یافته و پس از آن شیب تغییرات تنش کاهش می‌یابد. به طوری که تقریباً در عمق 0.4 میلیمتر تنش‌ها ثابت می‌شوند.
- ۵- مقادیر تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده در مرکز دکمه‌ی جوش، نسبت به مقادیر این تنش‌ها در لبه دکمه جوش از یک جهش قابل ملاحظه برخوردارند.

مراجع

- [1] Cha B. W., and Na S. J., "A study on the relationship between welding conditions and residual stress of resistance spot welded 304-type stainless steels", Journal of Manufacturing Systems, vol. 3, no. 22, pp. 181-189, 2003.
- [2] Vural M., Akkus A., and Eryurek B., "Effect of welding nugget diameter on the fatigue strength of the resistance spot welded joints of different steel sheets", Journal of Materials Processing Technology, 176, pp. 127-132, 2006.
- [3] Ranjbar Nodeh I., Serajzadeh S., and Kokabi A. H., "Simulation of welding residual stresses in resistance spot welding, FE modeling and X-ray verification", Journal of Materials Processing Technology, 205, pp. 60-69, , 2008.
- [4] Ma N., and Murakawa H., "Numerical and experimental study on nugget formation in resistance spot welding for three pieces of high strength steel sheets", Journal of Materials Processing Technology, 210, pp. 2045-2052, 2010.
- [5] Moshayedi H., and Sattari-Far I., "Numerical and experimental study of nugget size growth in resistance spot welding of austenitic stainless steels", Journal of Materials Processing Technology, 212, pp. 347- 354, 2012.
- [6] Dickinson D.W., "Welding in the automotive industry", Committee of Sheet Steel Industries, Report AISI SG 81-5, 1981.
- [7] "Recommended practices for test methods for evaluating the resistance spot welding behavior of automotive sheet materials", American Welding Society, AWS/SAE D8.9:02, 2002.