بررسی پارامترهای مؤثر بر خصوصیات فیزیکی جوش نقطه‌ای در ورق‌های فولادی کم‌کربن

عباس مغنی‌زاده [۱] **فرهنگ هنرور** [۲]**، مجید قریشی** [۳] **و رحمت‌الله قاجار** [۴]

دانشکده مهندسی مکانیک — دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه آزاد اسلامی- واحد شیروان — دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت:۸۸/۲/۱۴؛ تاریخ پذیرش:۸۹/۱۱/۴)

چکیده

جوش مقاومتی نقطه‌ای کاربرد وسیعی در صنعت (به خصوص خودروسازی) دارد. در بدنه هر خودرو، حدود دو تا پنج هزار جوش نقطه‌ای وجود داشته و استحکام بدنه خودرو کاملاً به استحکام این جوش‌ها وابسته است. ارزیابی جوش نقطه‌ای به‌منظور اطمینان از کیفیت و استحکام جوش در ایمنی خودرو بسیار مؤثر است. در این مقاله، پارامترهای مؤثر بر کیفیت جوش نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند. میزان تأثیر عواملی چون شدت جریان، زمان جوشکاری، فشار وارد بر ورق‌ها و تعداد پالس‌های جوش بر استحکام کششی- برشی، سختی سطح موضع جوش و نیز سختی مرکز جوش در ورق‌های کم‌کربن مطالعه شده است. برای انجام این مطالعه، با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها (DOE)، مدلی برای وابستگی پارامترهای خروجی به پارامترهای ورودی تهیه و میزان تأثیر پارامترهای ورودی بر خواص جوش ارزیابی شده است. تحلیل آماری نتایج آزمایش‌ها حاکی از وابستگی بالای استحکام جوش به زمان جوشکاری است. همچنین، تغییرات سختی مرکز جوش حساسیت بالایی به تغییر عامل جریان الکتریکی – ضخامت دارد.

واژه‌های کلیدی: جوش نقطه‌ای، استحکام کششی-برشی جوش، طراحی آزمایش‌ها، سختی سطحی

An Investigation of the Parameters Affecting the Quality of Resistance Spot Welds in Low Carbon Steel Sheets

A. Moghanizadeh — Mech. Eng. Dep't. — Islamic Azad Univ., Shirvan Branch

F. Honarvar, M. Ghoreishi and R. Ghajar — Mech. Eng. Dep't. — K.N. Toosi Univ. of Tech.

(Received: 4 May 2009; Accepted: 24 Jan. 2011)

ABSTRACT

Resistance spot welding is widely used in industry (especially in automobile manufacturing industries). There are approximately two to five thousand spot welds in the body of a car and the strength of the body is very much dependent on the quality of these spot welds. Therefore, it is very important to use a proper technique for assuring the quality of spot welds. In this paper, the effect of welding parameters, such as electrical current, welding time, pressure, and the number of pulses on the weld tension-shear strength, surface hardness, and the hardness of welding center were studied. The design of experiments (DOE) technique was used for modeling the dependence of the input parameters on the output values. The results indicate that the weld strength is highly dependent on the welding time. The hardness of the weld center is also very sensitive to the changes in electrical current-thickness.

Keywords: Spot Welding, Tensile–Shear Strength, Design of Experiments, Surface Hardness

۱- مربی: abbas.moghanizadeh@gmail.com

۲- دانشیار(نویسنده پاسخگو): honarvar@kntu.ac.ir

۳- استادیار: ghoreishi@ kntu.ac.ir

۴- استادیار: ghajar@ kntu.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

جوش مقاومتی نقطه‌ای یکی از قدیمی‌ترین روش‌های جوشکاری می‌باشد که برای اتصال قطعات در بسیاری از صنایع از جمله خودرو، هوافضا، الکترونیک و صنایع الکتریکی استفاده می‌شود. در این روش، جوش به‌وسیله ترکیب گرما، فشار و زمان ایجاد می‌شود. همان‌طور که از نام این روش پیداست، در هنگام عبور جریان، مقاومت الکتریکی موضع اتصال قطعاتی که به یکدیگر جوش داده می‌شوند باعث ایجاد گرما در موضع اتصال شده و هم‌زمان فشار نیز توسط الکترودها اعمال می‌شود. زمانی نیز برای برقراری جریان اتصال دو قطعه به یکدیگر در نظر گرفته می‌شود. بعد از سرد شدن فلز مذاب، نقطه جوش ایجاد می‌شود. یکی از مزایای جوش نقطه‌ای نسبت به سایر روش‌ها، سرعت بالای آن و قابلیت تطبیق آن با خطوط تولید اتوماتیک می‌باشد. پارامترهای مؤثر بر جوش نقطه‌ای عبارتند از:

جریان: طبق قانون اهم، هنگامی که جریان الکتریکی از یک مقاومت عبور کند گرما تولید می‌شود. هر چند این جریان، حرارت لازم برای ذوب منطقه بین دو ورق را فراهم می‌سازد، اما به علت کوتاه بودن زمان برقراری جریان و مسیر کوتاه عبور جریان، شدت جریان زیادی برای ایجاد گرمای ذوب لازم است.

زمان: کنترل زمان بسیار مهم است. اگر پارامتر زمان خیلی طولانی باشد، فلز اصلی در موضع جوش بیش از حد ذوب شده و ممکن است حتی به حالت غلیان درآید. این امر می‌تواند باعث بروز برخی از مشکلات نظیر تخلخل گازی شده و حتی موجب جریان یافتن مذاب به بیرون از موضع جوش شود.

تعداد پالس‌های جریان: جوش نقطه‌ای شامل یک، یا چند چرخه اعمال جریان است که هر یک شامل چند سیکل بوده که با یک زمان خاموشی از پیش تعیین شده تفکیک شده‌اند. این زمان‌بندی ممکن است به صور مختلف برای جوشکاری به‌کار رود. در بعضی موارد، از یک سری پالس‌های جریان با اندازه‌های مشابه و زمان‌های نیم‌سیکل یا بیشتر استفاده می‌شود تا گرمای لازم را به آرامی ایجاد نمایند. به این نوع جوشکاری، جوشکاری پالسی (ضربه‌ای) گفته می‌شود.

فشار: نخستین هدف ایجاد فشار، نگه داشتن دو قطعه در کنار هم می‌باشد. دو الکترود جوشکاری با اعمال نیرو، باعث فشرده شدن دو ورق به هم می‌شوند.

جوش نقطه‌ای در اواخر قرن نوزده میلادی شناخته شد و استفاده از آن برای اتصال ورق‌ها از سال ۱۹۲۰ مرسوم گشت[۱]. جوش نقطه‌ای در صنعت خودرو کاربرد زیادی دارد. ورق‌های مورد استفاده در بدنه خودرو قابلیت خوبی برای اتصال به یکدیگر با استفاده از جوش نقطه‌ای دارند. جوش نقطه‌ای از سال ۱۹۵۰ در صنعت خودرو به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفت، به‌طوری‌که امروزه در بدنه یک خودروی مدرن، بین ۲,۰۰۰ تا ۵,۰۰۰ جوش نقطه‌ای وجود دارد[۲]. بیوسفی[1] و همکارانش به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر خصوصیات اتصالات جوش نقطه‌ای پرداختند و نتیجه گرفتند که نیروی الکترود نسبت به دو پارامتر دیگر تأثیر بیشتری بر سختی و استحکام جوش داشته و کاهش نیروی اعمالی الکترود، منجر به کاهش سختی جوش می‌شود[۳]. در سایر منابع اشاره شده که کوتاه شدن زمان انجام جوشکاری می‌تواند انتقال گرما از فلز اصلی و اعوجاج اجزای جوش را کاهش داده و طول منطقه متأثر از حرارت[2] را نیز کمتر سازد[۴]. همچنین برای بالا بردن کیفیت جوش نقطه‌ای از جوشکاری پالسی استفاده شده است[۵]. وانگ[3] و لویی[4] نیز با کنترل شکل موج جریان الکتریکی متناسب با چرخه جوشکاری، استفاده بهینه از انرژی الکتریکی را گزارش دادند[۶].

اسلانلار[5] اثر اندازه هسته جوش بر خواص مکانیکی جوش نقطه‌ای در ورق‌های مورد استفاده در صنعت اتومبیل را بررسی نموده و به تأثیر پارامترهای مختلف جوش بر مقاومت برشی جوش پرداخته است. وی عقیده دارد که اندازه قطر هسته جوش و یا اندازه ارتفاع هسته به

1- B. Bouyousfi
2- HAZ
3-X.C. Wang
4-M.Y. Lui
5- S. Aslanlar

Archive of SID

www.SID.ir

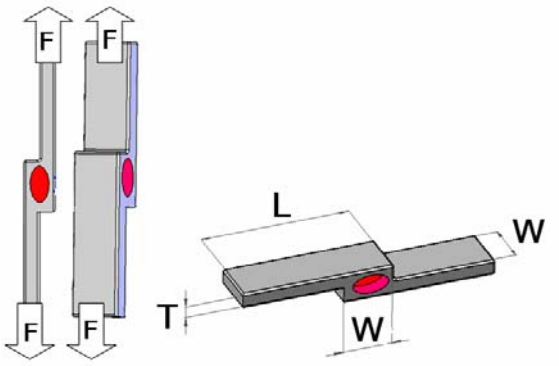
تنهایی نشان‌دهنده تأثیر هسته جوش بر استحکام کششی- برشی نبوده و بنابراین از نسبت ارتفاع به قطر هسته جوش برای این منظور استفاده کرده است[۱].

عیسی‌زاده و همکارانش با استفاده از روش المان محدود به بررسی و پیش‌بینی توزیع گرمایی و اندازه قطر دکمه جوش پرداختند و نشان دادند که اگر ضخامت ورق افزایش یابد، باید مقدار جریان عبوری نیز افزایش یابد[۷]. ایی[1] و همکارانش پس از بررسی پارامترهای مؤثر جوش نقطه‌ای بر استحکام کششی و اندازه قطر دکمه جوش به این نتیجه رسیدند که این تأثیر غیر خطی است و تأثیر عوامل دوتایی و اثرات متقابل پارامترها را نیز نباید ناچیز انگاشت[۸]. اسلانلار[2] و همکارانش نشان دادند که حرارت تولید شده بین دو ورق از نیروی فشاری دو الکترود، جریان و زمان جوشکاری تأثیر می‌پذیرد[۹]. خان[3] جوش نقطه‌ای را برای پیش‌بینی نحوه رشد دکمه جوش مدل نموده و رابطه زمان و نیروی الکترود بر چگونگی رشد دکمه جوش را بررسی کرده است[۱۰]. مارتین[4] و همکارانش به بررسی اثر پارامترهای جوش نقطه‌ای بر خصوصیات فیزیکی جوش با استفاده از شبکه‌های عصبی پرداخته‌اند[۱۱]. یانگ[5] اثرات اندازه دکمه جوش بر استحکام جوش نقطه‌ای را بررسی کرده و نتیجه گرفت که ضخامت و طول جوش دو پارامتر تأثیرگذار بر استحکام کششی- برشی جوش نقطه‌ای هستند[۱۲].

در مطالعات دیگران، بیشتر به سختی سطح جوش و استحکام جوش نقطه‌ای پرداخته شده است. بنابراین در این مقاله سعی شده است سختی مرکز دکمه جوش (وسط دکمه جوش) مورد بررسی قرار گیرد و پارامترهای تأثیرگذار بر آن با پارامترهای مؤثر بر سختی سطح جوش مقایسه شوند. همچنین برقراری زمان جریان الکتریکی به‌صورت پالسی و تأثیر آن بر استحکام جوش نقطه‌ای نیز کمتر توسط دیگر محققان مطالعه شده است. در مقاله حاضر به مطالعه اثر تعداد پالس‌ها (ضربه‌ها) و دیگر پارامترها بر خصوصیات فیزیکی جوش پرداخته شده است. برای این منظور با استفاده از روش توانمند طراحی آزمایش‌ها[6] از پارامترهای مهم جوش نقطه‌ای (ضخامت ورق، شدت جریان، زمان، فشار و تعداد پالس) به‌عنوان ورودی آزمایش‌ها، و از معیارهای نشان دهنده خصوصیات فیزیکی جوش مانند سختی سطح جوش، سختی مرکز دکمه جوش و استحکام جوش به‌عنوان پاسخ آزمایش‌ها استفاده خواهیم کرد. با استفاده از طراحی آزمایش‌ها می‌توان با حداقل تعداد آزمایش، اثرات اصلی پارامترها و مهم‌تر از آن تعامل اثر آن‌ها را بدست آورد. آزمایش‌ها در دو گروه طراحی شده و تمامی اثرات اصلی و متقابل پارامترهای ورودی بر پاسخ آزمایش‌ها (سختی سطح جوش، سختی مرکز جوش و استحکام جوش) مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- تجهیزات مورد استفاده

جنس ورق‌های مورد استفاده در این تحقیق فولاد ST12 با ۰/۰۵ درصد کربن است که کاربرد زیادی در صنعت خودرو دارد. ضخامت ورق مورد استفاده در آزمون کشش ۱/۵ میلی‌متر است. ابعاد اتصال مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل **۱** آمده است. همچنین در شکل **۲** چگونگی اعمال نیرو و چند نمونه از نقطه جوش‌ها بعد از آزمون تعیین استحکام کششی نشان داده شده است.



T(mm)	W(mm)	L(mm)
۱/۵	۵۰	۱۵۰

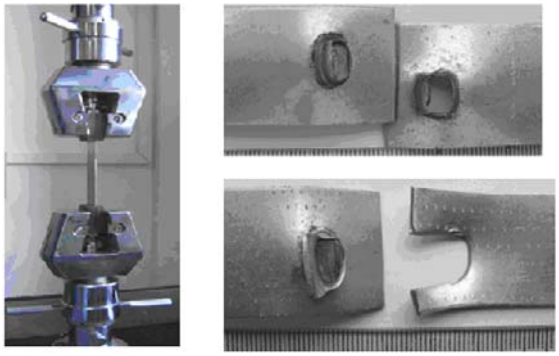
شکل(۱): ابعاد نمونه برای آزمون کشش.

1- Luo Yi
2- Aslanlar
3- Khan
4- Oscar Martin
5- HongGang Yang

6- Design of Experiments (DOE)

Archive of SID

www.SID.ir



ب الف

شکل(۲): الف) نمونه‌ها، بعد از آزمون کشش، ب) دستگاه تست کشش.

۲-۱- وسایل جوشکاری

برای جوشکاری از الکترود آلیاژهای مس کروم‌دار با قطر ۶ میلی‌متر استفاده شده است. تجهیزات مورد استفاده شامل یک دستگاه جوش نقطه‌ای با قابلیت برنامه‌ریزی جهت اعمال پارامترهای مختلف است. این دستگاه ساخت شرکت نوین‌سازان با واحد کنترل مدل CU08 و ترانسفورماتور TP53 است.

۲-۲- وسایل آزمون کشش و سختی

برای ارزیابی استحکام کششی نمونه‌های ساخته شده از دستگاه کشش یونیورسال با دقت یک دهم کیلو نیوتن استفاده شده است. در آزمایش‌های انجام شده، نرخ اعمال نیرو ۰/۵ کیلو نیوتن بر ثانیه بوده و ماکزیمم نیروی تحمل شده توسط جوش قبل از پارگی و یا شکست به‌عنوان استحکام جوش در نظر گرفته شده است.

سختی جوش به کمک دستگاه Dia-Testor-2Rc اندازه‌گیری شده است. سختی جوش‌ها بر حسب ویکرز با استفاده از الماس هرمی با زاویه رأس ۱۳۶ درجه و بار نفوذ ۵۰ کیلوگرم اندازه‌گیری شده است. برای ثبت عدد سختی هر نمونه، آزمایش سه بار تکرار و میانگین این سه اندازه‌گیری، به‌عنوان سختی نمونه ثبت شده است.

متغیرهای مورد بررسی دارای اثرات هم‌زمان بوده و تغییر در یکی، باعث تغییر در سایر متغیرها و نهایتاً استحکام جوش می‌شود. لذا بررسی تأثیر هر یک از متغیرها بر روی خروجی به تنهایی صحیح نمی‌باشد. برای بدست آوردن مدل تحلیلی، خصوصیات فیزیکی جوش با تغییر متغیرها-که در آن‌ها اثرات متقابل و هم‌زمان پارامترها نیز در نظر گرفته شده‌اند- از ماتریس آزمایش‌های طراحی شده خاص استفاده شده است. با استفاده از این روش، با انجام تعداد آزمایش‌های کمتر، می‌توان به نتایج دقیق‌تری دست یافت.

بعضاً امکان انجام هم‌زمان بعضی از آزمایش‌ها نظیر آزمون مخرب کشش و سختی‌سنجی مرکز جوش بر روی یک نمونه وجود ندارد، چرا که جوش، برش عرضی خورده و وسط دکمه جوش، سختی‌سنجی می‌شود. لذا آزمایش‌ها در دو گروه مجزا طراحی و انجام شده است. مشخصات کلی گروه‌ها در جدول **۱** آمده است.

در گروه یک با توجه به قابل کنترل بودن پارامترهای ضخامت، جریان، زمان جوشکاری و فشار، این پارامترها به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند. سختی سطح و وسط (مرکز) جوش به‌عنوان پاسخ آزمایش‌ها انتخاب شد. سه سطح از هر پارامتر برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شد، که این سطوح در جدول**۲** آمده است.

هدف از انجام آزمایش‌های گروه دو، بررسی تأثیر پارامترهای قابل کنترل دستگاه جوش بر استحکام جوش می‌باشد. لذا در این گروه، چهار پارامتر جریان، زمان جوشکاری، فشار و تعداد پالس‌ها به‌عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند.

جریان، زمان جوشکاری و فشار هر کدام در دو سطح، و تعداد پالس‌ها در سه سطح مطابق با جدول **۳** طراحی شده‌اند. در انجام آزمایش‌ها از ورق با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر استفاده شده است.

جدول(۱): گروه‌بندی آزمایش‌های انجام شده.

گروه	پاسخ آزمایش‌ها	ورودی آزمایش‌ها	تعداد آزمایش‌ها
یک	سختی جوش	ضخامت، جریان، فشار، زمان	۲۷
دو	استحکام جوش	جریان، فشار، زمان، تعداد پالس	۲۴

Archive of SID

www.SID.ir

جدول(۲): سطوح پارامترهای مورد آزمایش در گروه یک.

سطح آزمایش	-۱	۰	۱
ضخامت ورق (میلی‌متر)	۱	۱/۵	۲
جریان (کیلو آمپر)	۱۵	۲۰	۲۵
فشار (کیلو نیوتن)	۱۵۰	۲۵۰	۳۵۰
زمان (سیکل)	۱۵	۲۰	۲۵

جدول(۳): سطوح پارامترهای مورد آزمایش در گروه دو.

سطح آزمایش	۱	۲	۳
جریان (کیلو آمپر)	۸	۹	*
فشار (کیلو نیوتن)	۳۰۰	۳۵۰	*
زمان (سیکل)	۱۲	۱۸	*
تعداد پالس‌ها	۱	۲	۳

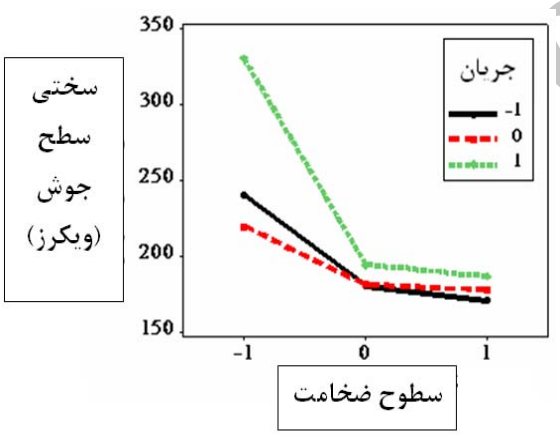
جدول(۴): تأثیر پارامترهای جوش نقطه‌ای بر سختی سطح جوش.

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
فرمول بندی	۱۴	۲۱۹۷۱/۵	۱۵۶۹/۴	۵/۶۴	۰/۱۶۱
اثرات خطی	۴	۱۳۹۷۹/۳	۸۵۴/۶	۳/۰۷	۰/۲۶۰
اثرات غیرخطی	۴	۲۵۶۶	۷۲۹/۸	۲/۶۲	۰/۲۹۵
تعاملی	۶	۵۴۲۶/۱	۹۰۴/۴	۳/۲۵	۰/۲۵۴
خطای باقی‌مانده	۲	۵۵۶/۴	۲۷۸/۲	-	-
عدم تطبیق	۱	۳۶۴/۹	۳۶۴/۹	۱/۹۱	۰/۳۹۹
خطای ثابت	۱	۱۹۱/۵	۱۹۱/۵	-	-
مجموع	۱۶	۲۲۵۲۷/۹	-	-	-

۳- تحلیل نتایج

ساختار داخلی جوش، بر استحکام و سختی جوش تأثیرگذار بوده و با اندازه‌گیری سختی جوش می‌توان به‌طور غیر مستقیم، ساختار، استحکام و کارآیی جوش را ارزیابی نمود. بنابراین ابتدا سختی ویکرز سطح جوش اندازه‌گیری گردیده سپس با برش مقطع جوش (مقطع عرضی)، سختی مرکز دکمه جوش (وسط جوش) اندازه‌گیری شد. آزمایش‌های گروه یک با در نظر گرفتن سختی سطح جوش و سختی وسط (مرکز) جوش، به‌عنوان پاسخ آزمایش‌ها در نرم‌افزار MINITAB تحلیل شد که نتایج آن در جداول **۵-۴** ارائه شده است.

در سختی سطح جوش عامل ضخامت – جریان بیشترین تأثیر را بر پاسخ آزمایش‌ها (سختی سطح جوش) دارد. همان‌طور که در شکل **۳** نشان داده شده است، با کاهش ضخامت ورق، سختی سطح جوش افزایش می‌یابد که در جریان با شدت بالا این امر واضح‌تر است. حرارت در منطقه ایجاد دکمه جوش، افزایش یافته و به دیگر قسمت‌های ورق و الکترودها منتقل می‌شود. در ضخامت‌های کم، این انتقال حرارت بیشتر بوده و باعث تغییر ساختار سطح جوش و افزایش سختی می‌گردد. در جریان‌های بالاتر تولید گرما افزایش یافته این اثر بیشتر مشهود است.



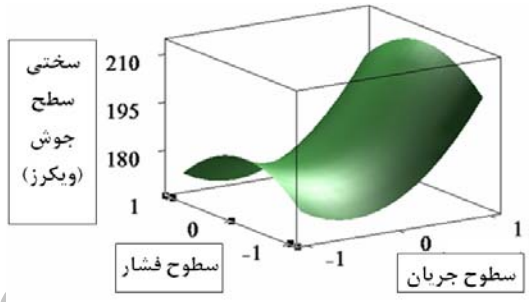
شکل(۳): تأثیر ضخامت و جریان در سطوح مختلف بر سختی سطح جوش نقطه‌ای.

همان‌طور که در شکل **۴** نشان داده شده است، افزایش جریان در فشار کم یا زیاد، منجر به افزایش سختی سطح جوش می‌شود. ولی افزایش فشار، ابتدا باعث افزایش سختی سطح جوش تا سطح معینی شده و پس از آن باعث کاهش سختی می‌گردد. افزایش فشار، باعث انتقال حرارت بهتر دکمه جوش از طریق الکترودها می‌شود که

Archive of SID

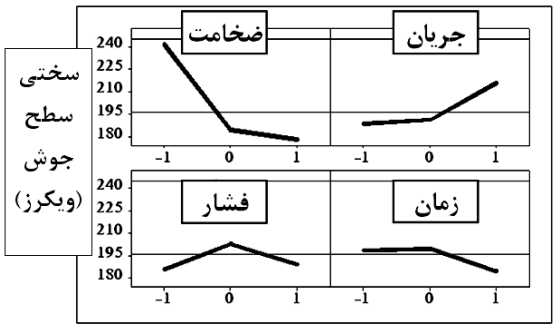
www.SID.ir

این مسئله، باعث خنک شدن سریع‌تر جوش و افزایش سختی خواهد شد. اما این افزایش انتقال حرارت تا حد مشخصی بوده و بعد از آن افزایش فشار، احتمالاً منجر به فشرده شدن زیاد دو ورق به یکدیگر و کاهش مقاومت تماسی می‌گردد. این امر منجر به کاهش حرارت تولید شده و در نتیجه کاهش تغییر ساختار و سختی جوش می‌شود.



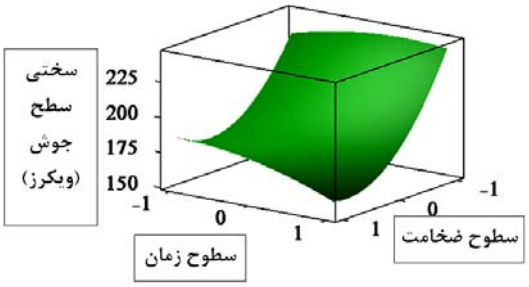
شکل(۴): رابطه فشار و جریان با سختی سطح جوش.

تأثیر عوامل اصلی نیز در شکل **۵** نشان داده شده است. هر چند تأثیر عوامل اصلی کمتر از اثرات متقابل می‌باشد ولی عامل اصلی ضخامت ورق، بیشترین تأثیر را بر سختی سطح جوش دارد که به‌خاطر پدیده انتقال حرارت به سطح می‌باشد.



شکل(۵): تأثیر عوامل اصلی بر سختی سطح جوش.

بررسی تأثیر عامل زمان نشان می‌دهد که با افزایش زمان جوشکاری، سختی سطح جوش کاهش می‌یابد. علت آن کاهش مقاومت الکتریکی تماسی بین دو ورق می‌باشد به‌طوری‌که با افزایش زمان و گرم شدن محل تماس دو ورق، مقاومت الکتریکی کاهش یافته و تولید گرما نیز کاهش می‌یابد و همچنین گرمای بیشتری از طریق سطح الکترودهای مسی از ورق خارج می‌گردد. همان‌طور که در شکل **۶** نشان داده شده است این امر در ضخامت‌های بالاتر مشخص‌تر می‌باشد.



شکل(۶): تأثیر عامل متقابل زمان- ضخامت بر سختی سطح جوش.

در مورد سختی وسط (مرکز) جوش، عامل متقابل ضخامت–جریان و بعد از آن به ترتیب عوامل اصلی زمان، فشار و ضخامت بیشترین تأثیر را دارند. (جدول**۵**).

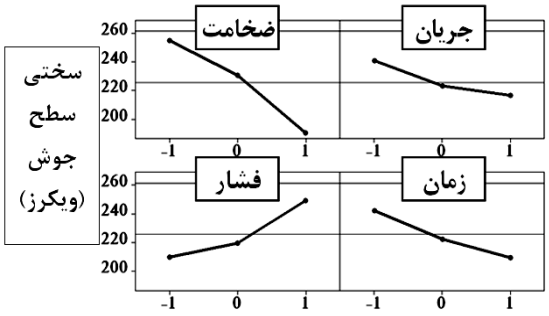
جدول(۵): تأثیر پارامترهای جوش نقطه‌ای بر سختی وسط جوش نقطه‌ای.

	ضریب تخمین	ضریب خطای استاندارد	آزمون T	مقدار P
ثابت	۱۰/۵۰۳	۲۱۱/۰۹۵	۰/۰۹۸	۰/۰۰۲
ضخامت	۷/۴۲۷	-۲۴/۲۲۴	-۳/۲۶۲	۰.۰۸۳
جریان	۷/۴۲۷	-۶/۰۶۲	-۰/۸۱۶	۰/۵
فشار	۶/۴۳۲	۳۲/۰۶۴	۴/۹۸۵	۰/۰۳۸
زمان	۶/۴۳۲	-۳۱/۴۰۰	-۴/۸۸۲	۰/۰۳۹
ضخامت* ضخامت	۱۲/۳۱۶	-۷/۲۵۹	-۰/۵۸۹	۰//۶۱۵
جریان* جریان	۹/۸۲۵	۱۲/۶۶۵	۱/۲۸۹	۰/۳۲۶
فشار* فشار	۱۲/۳۱۶	۱۷/۴۲۵	۱/۴۱۵	۰/۲۹۳
زمان* زمان	۱۲/۳۱۶	۴/۵۷۸	۰/۳۲۷	۰/۷۴۷
ضخامت*جریان	۱۲/۸۶۴	-۳۸/۵۸۷	-۳	۰/۰۹۵
ضخامت*فشار	۷/۴۲۷	-۳/۱۴۵	-۰/۴۲۳	۰/۷۱۳
ضخامت*زمان	۲۴/۳۵۱	-۳/۸۶۲	-۰/۱۵۹	۰/۸۸۹
جریان*فشار	۱۲/۳۱۶	۱۲/۹۶۰	۱/۰۵۲	۰/۴۰۳
جریان*زمان	۷/۴۲۷	-۶/۰۶۲	-۰/۸۱۶	۰/۵۰۰
فشار*زمان	۱۹/۶۵۰	۰/۵۵۲	۰/۰۲۸	۰/۹۸۰

Archive of SID

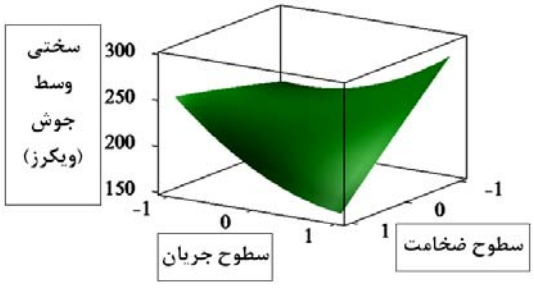
www.SID.ir

تأثیر عوامل اصلی در شکل **۷** نشان داده شده است. تأثیر عامل جریان الکتریکی و زمان جوشکاری مشابه یکدیگر است. به‌طوری‌که با افزایش هر دو عامل، سختی وسط (مرکز) جوش کاهش می‌یابد. هر چند تأثیر زمان جوشکاری، بیشتر از مقدار جریان می‌باشد. با افزایش زمان جوشکاری، مدت زمان لازم جهت تغییر ریزساختار جوش و دانه درشت‌تر شدن ریزساختار فراهم می‌شود ولی افزایش شدت جریان، تنها باعث افزایش مقدار فلز ذوب شده و تولید گرما می‌گردد (سختی سطح جوش افزایش می‌یابد) و بر سختی وسط دکمه جوش کمتر تأثیر می‌گذارد.



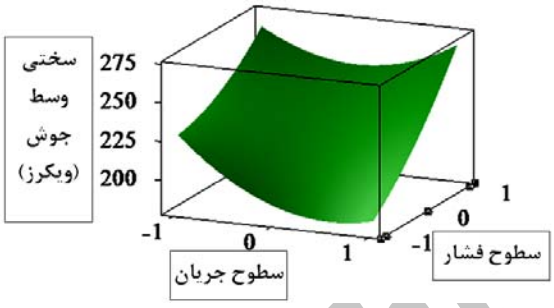
شکل(۷): تأثیر عوامل اصلی بر سختی وسط جوش.

تأثیر عامل متقابل ضخامت- جریان در شکل **۸** نشان داده شده است. افزایش شدت جریان در ورق‌های ضخیم، سختی وسط (مرکز) جوش را کاهش می‌دهد ولی افزایش شدت جریان در ضخامت‌های کم موجب افزایش سختی وسط جوش می‌شود. انتقال حرارت از مرکز دکمه جوش، در ضخامت کم بیشتر از ضخامت‌های زیاد می‌باشد که این امر به افزایش سختی مرکز دکمه جوش کمک می‌کند.



شکل (۸): تأثیر عامل متقابل جریان- ضخامت بر سختی وسط (مرکز) دکمه جوش نقطه‌ای.

افزایش عامل اصلی فشار، سختی وسط (مرکز) جوش را افزایش می‌دهد (شکل**۷**). با زیاد شدن فشار الکترود بر موضع جوش، رشد دانه‌ها کاهش یافته و وسط (مرکز) جوش ساختار ریزتری پیدا می‌کند. بنابراین، سختی وسط جوش افزایش می‌یابد. تأثیر فشار الکترود بر سختی وسط (مرکز) جوش تقریباً همانند تأثیر زمان می‌باشد. بنابراین می‌توان برای کاهش زمان تولید و افزایش بهره‌وری به‌جای افزایش زمان جوشکاری، فشار الکترودها را بر موضع جوش افزایش داد. تأثیر عامل متقابل فشار - جریان بر سختی وسط (مرکز) دکمه جوش در شکل **۹** نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در هر سطح جریان، افزایش فشار الکترودها باعث افزایش سختی وسط (مرکز) دکمه جوش می‌شود.



شکل(۹): تأثیر عامل متقابل جریان- ضخامت بر سختی وسط (مرکز) دکمه جوش نقطه‌ای.

برای تعیین استحکام جوش نقطه‌ای معمولاً از آزمون کششی - برشی استفاده می‌شود. برای پارامترهای مؤثر بر استحکام کششی جوش، آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال انجام شد. در تحلیل انجام شده، نیروی کششی لازم برای جدا کردن دو ورق از یکدیگر به‌عنوان پاسخ آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. نتایج آزمایش‌ها در جدول **۶** آمده است.

نتایج تحلیل نشان می‌دهد، عوامل اصلی زمان و مقدار جریان بیشترین تأثیر را بر استحکام جوش نقطه‌ای دارند (شکل**۱۰**). بعد از آن عامل متقابل جریان – زمان قرار دارد (شکل‌های **۱۲-۱۱**). استفاده از زمان و جریان بالاتر، منجر به افزایش استحکام جوش می‌گردد به‌طوری‌که در

Archive of SID

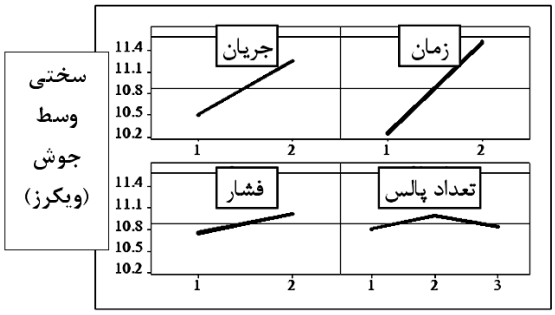
www.SID.ir

جریان‌های کم، تأثیر افزایش زمان بر استحکام جوش، بیشتر از جریان‌های بالا می‌باشد. تأثیر جریان و زمان قابل پیش‌بینی است. زیرا افزایش جریان و زمان، باعث افزایش حرارت و ذوب شدن مقدار بیشتری از ماده در موضع جوش شده لذا عرض و قطر دکمه جوش افزایش می‌یابد. بنابراین برای جدا کردن دو ورق از یکدیگر یا گسیختن دکمه جوش نیروی بیشتری نیاز است. افزایش فشار الکترودها نیز استحکام جوش نقطه‌ای را بهبود می‌بخشد زیرا باعث افزایش قطر دکمه جوش می‌شود.

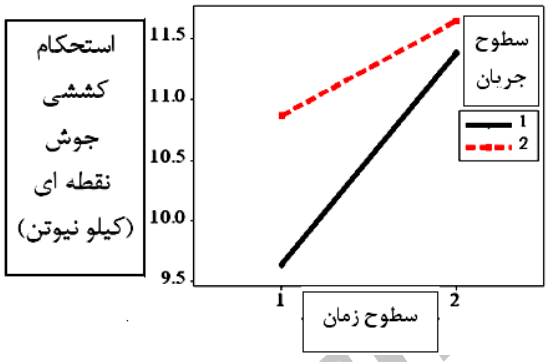
جدول (۶): تأثیر پارامترهای جوش نقطه‌ای بر استحکام کششی - برشی جوش نقطه‌ای.

منبع تغییرات	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
جریان	۳/۳۷۵	۳/۳۷۵	۲۲/۴۴	۰/۰۴۲
زمان	۹/۶۲۶۷	۹/۶۲۶۷	۶۴	۰/۰۱۵
فشار	۰/۴۲۶۷	۰/۴۲۶۷	۶۴	۰/۲۳۴
تعداد پالس	۰/۱۶۵۸	۰/۰۸۲۹	۰/۵۵	۰/۶۴۵
جریان*زمان	۱/۴۰۱۷	۱/۴۰۱۷	۹/۳۲	۰/۰۹۳
جریان*فشار	۰/۲۰۱۷	۰/۲۰۱۷	۱/۳۴	۰/۳۶۶
جریان*تعداد پالس	۰/۰۳۲۵	۰/۰۱۶۲	۰/۱۱	۰/۹۰۳
زمان*فشار	۰/۶۶۶۷	۰/۶۶۶۷	۴/۴۳	۰/۱۷۰
زمان*تعداد پالس	۱/۰۵۰۸۰	۰/۵۲۵۴	۳/۴۹	۰/۲۲۳
فشار*تعداد پالس	۰/۱۷۵۸	۰/۰۸۷۹	۰/۵۸	۰/۶۳۱
جریان*زمان*فشار	۰/۲۸۱۷	۰/۲۸۱۷	۱/۸۷	۰/۳۰۵
جریان*زمان*تعداد پالس	۰/۸۳۰۸	۰/۴۱۵۴	۲/۷۱	۰/۲۶۶
جریان*فشار*تعداد پالس	۰/۹۱۵۸	۰/۴۵۷۹	۳/۰۴	۰/۲۴۷
زمان* فشار *تعداد پالس	۰/۱۴۰۸	۰/۰۷۰۴	۰/۴۷	۰/۶۸۱
خطا	۰/۳۰۰۸	۰/۱۵۰۴		
مجموع	۱۹/۵۹۳۳			

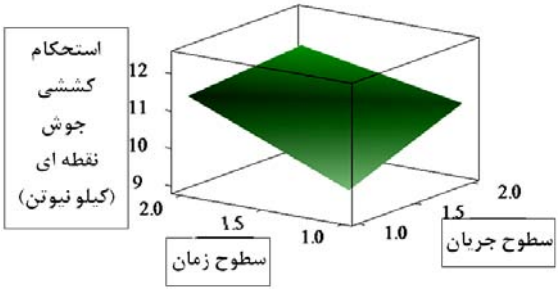
همچنین استفاده از تعداد دو پالس باعث افزایش جزئی استحکام جوش نسبت به حالت‌های تک پالسی و سه پالسی می‌شود (شکل **۱۳**). نتایج نشان می‌دهد اگر زمان جوشکاری به‌صورت دو پالسی باشد تأثیر کمی بر استحکام کششی دارد اما استفاده از جریان به‌صورت دو پالسی نسبت به استفاده از جریان به‌صورت تک پالسی (آنچه در صنعت معمول است) و همچنین به‌صورت سه پالسی بهتر بوده و باعث بهبود استحکام جوش نقطه‌ای می‌شود (شکل‌های **۱۰** و **۱۳**).



شکل (۱۰): تأثیر عوامل اصلی بر استحکام جوش نقطه‌ای (کیلو نیوتن).



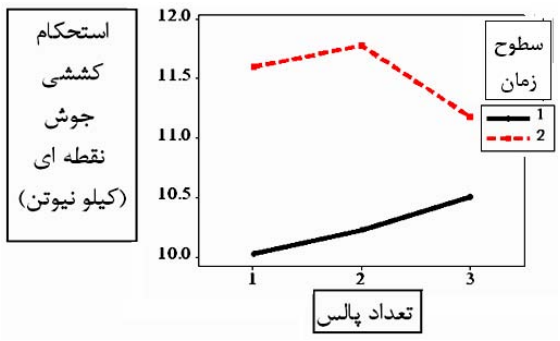
شکل(۱۱): تأثیر عامل متقابل جریان- زمان بر استحکام جوش نقطه‌ای.



شکل(۱۲): تأثیر جریان و زمان جوشکاری بر استحکام جوش نقطه‌ای.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل(۱۳): تأثیر تعداد پالس و زمان برقراری جریان بر استحکام جوش نقطه‌ای.

۴- نتیجه‌گیری

پس از بررسی پارامترهای مؤثر بر جوش نقطه‌ای در ورق‌های فولادی کم‌کربن، به‌طور کلی، نتایج آزمایش‌ها را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

۱- در بین پارامترهای مؤثر در جوش نقطه‌ای، زمان جوشکاری بیشترین تأثیر را بر استحکام جوش نقطه‌ای دارد،

۲- افزایش تعداد پالس‌ها باعث افزایش کمی در استحکام جوش نقطه‌ای می‌شود ولی استفاده از تعداد دو پالس مناسب‌تر می‌باشد،

۳- تعامل اثر شدت جریان- ضخامت بیشترین تأثیر را بر سختی سطح جوش دارد،

۴- افزایش عامل فشار، ابتدا سختی سطح جوش را افزایش داده و اگر فشار از حد معینی بیشتر گردد، منجر به کاهش سختی سطح جوش خواهد شد و

۵- افزایش شدت جریان و زمان جوشکاری، باعث کاهش سختی وسط جوش می‌گردد.

مراجع

1. Aslanlar, S., “The Effect of Nucleus Size on Mechanical Properties in Electrical Resistance Spot Welding of Sheets Used in Automotive Industry” Mat. and Design, Vol. 27, No. 2, pp. 125-131, 2006.
2. Hou, Z., Kimb, S., Wang, Y., Li, C., and Chena, C., “Finite Element Analysis for the Mechanical Features of Resistance Spot Welding Process”, J. Mat. Processing Tech., Vol. 185, No’s. 1-3, pp. 160–165, 2007.
3. Bouyousfi, B., Sahraoui, T., Guessasma, S., and Chaoch, K.T., “Effect of Process Parameters on the Physical Characteristics of Spot Weld Joint”, Mat. and Design, Vol. 28, No. 2, pp. 414-419, 2007.
4. Olson, D.L., Siewert, T.A., Liu, S., and Edwards, G.R., “ASM Handbook, Vol. 6: Welding, Brazing, and Soldering” ASM Int., 1993.
5. Drozda, T., Philip E., Mitchell, P.E., and Charles W.C., “Tool and Manufacturing Engineers Handbook”, Society of Manufacturing Eng., 1998.
6. Wang, X.C. and Lui, M.Y., “An Arbitrary Waveform Control System for a Precise Spot-Welding Power Source”, J. Mat. Processing Tech., Vol. 122, No’s. 2-3, pp. 185–188, 2002.
7. Eisazadeh, H., Hamedi, M., and Halvaee, A., “New Parametric Study of Nugget Size in Resistance Spot Welding Process, Using Finite Element Method”, Mat. and Design, Vol. 31, No. 1, pp. 149–157, 2010.
8. Yi, L., Jinhe, L., Huibin, X., Chengzhi X., and Lin, L., “Regression Modeling and Process Analysis of Resistance Spot Welding on Galvanized Steel Sheet”, Mat. and Design, Vol. 30, No. 7, pp. 2547–2555, 2009.
9. Aslanlar S., Ogur A., Ozsarac U., and Ilan E., “Welding Time Effect on Mechanical Properties of Automotive Sheets in Electrical Resistance Spot Welding”, Mat. and Design, Vol. 29, No. 7, pp. 1427-1431, 2008.
10. Khan, J.A., Xu L., Chao, Y., and Broach, K., “Numerical Simulation of Resistance Spot Welding Process”, Numerical Heat Transfer Part A: Applications, Vol. 37, No. 5, pp. 425-446, 2000.
11. Martín, O., Tiedra, P.D., and López, M., “Artificial Neural Networks for Pitting Potential Prediction of Resistance Spot Welding Joints of AISI 304 Austenitic Stainless Steel”, Corrosion Sci., Vol. 52, No. 7, pp. 2397-2402, 2010.
12. Yang, H.G., Zhang, Y.S., Lai, X.M., and Chen, G., “An Experimental Investigation on Critical Specimen Sizes of High Strength Steels DP600 in Resistance Spot Welding”, Mat. and Design, Vol. 29, No. 9, pp. 1679-168, 2008.

Archive of SID

www.SID.ir