



مطالعه تجربی تاثیر جریان الکتریکی فرعی براستحکام کششی-برشی اتصالات نقطه جوش مقاومتی در ورق های AA2219

مهدی جعفرپور¹، مهدی جعفری وردنجانی²، بهروز شهرياری^{3*}

1- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران

3- استادیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 84145-115، shahriari@mut-es.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 آبان 1400

داوری اولیه: 12 دی 1400

پذیرش: 10 اسفند 1400

کلیدواژگان:

جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی

اثر شار الکتریکی فرعی

استحکام کششی-برشی

مدل رگرسیون

اثر شار فرعی در نقطه جوش مقاومتی (RSW) به واسطه جریان الکتریکی فرعی ایجاد شده از طریق نقطه جوش‌های قبلی بروز می‌کند. در ایجاد نقطه جوش‌های متناوب، کیفیت نقطه جوش‌های بعدی به واسطه تغییرات الکتریکی-حرارتی ایجاد شده، تحت تأثیر جریان الکتریکی فرعی قرار می‌گیرد. این امر نشان می‌دهد که تحلیل اثر جریان فرعی برای دستیابی به شناختی در زمینه چگونگی تأثیر پارامترهای مختلف بر این فرایند دارای اهمیت است. بنابراین ابعاد دکمه جوش، ساختار متالورژیکی و استحکام مکانیکی نقطه جوش‌های متأثر از اثر شار فرعی، تحت تأثیر تغییرات جریان الکتریکی و توزیع دمایی ناشی از این جریان قرار می‌گیرند. پارامترهای مؤثر شامل فاصله جوش و تعداد یا ابعاد نقطه جوش قبلی هستند. در این تحقیق، اثر جریان الکتریکی فرعی روی استحکام کششی-برشی نقطه جوش‌های RSW، در ورق‌های AA2219 و برای فواصل مختلف جوشکاری مورد بررسی قرار گرفته است. جریان، زمان و فاصله جوشکاری جهت طراحی آزمایش‌هایی مبتنی بر استحکام کششی-برشی، در داخل محدوده جوش‌پذیری، در نظر گرفته شده‌اند. یک مدل رگرسیون نیز بر اساس نتایج تجربی بدست آمده است. اساسی‌ترین فاکتور جریان فرعی (فاصله بین جوشی)، به همراه جریان جوشکاری و زمان، با انجام یک طراحی آزمایش سه عاملی (DOE) در داخل محدوده جوش‌پذیری، جهت دستیابی به یک مدل آماری مبتنی بر نتایج استحکام کششی-برشی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یک مدل رگرسیون تجربی استخراج شد. نتایج نشان می‌دهند که افزایش جریان یا فاصله جوشکاری باعث افزایش استحکام کششی-برشی اتصالات شده است.

Experimental study of the shunting effect on tensile-shear strength of resistance spot welds in AA2219 sheets

Mahdi Jafarpoor¹, Mahdi Jafari Vardanjani², Behrooz Shahriari^{1*}

1- Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

* P.O.B. 84145-115, Isfahan, Iran, shahriari@mut-es.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 18 November 2021

First Decision: 2 January 2022

Accepted: 1 March 2022

Keywords:

Resistance spot welding

Shunting effect

Tensile-shear strength

Regression model

Abstract

The shunting effect in resistance spot welding (RSW) occurs due to the side electrical current created through the previous spot welds. In creation of alternating welding points, the quality of subsequent welding points is affected by a side electric current due to electro-thermal changes. This shows that the analysis of the effect of the side current is important for achieving cognition of how different parameters affect this process. Therefore, the dimensions of the welding nuggets, the metallurgical structures and the mechanical strength of the welding points are affected by the changes in the electric current and the temperature distribution caused by this current. The amount of this current depends mostly on factors such as distance, number and size of previous spot welds. In this study, experimental research was performed to investigate the shunting effect on the tensile-shear strength of RSW spot welds in aluminum alloy 2219 sheets. The most important factor in shunting (welding distance) together with welding current and time was investigated by three design of experiment factor (DOE) within the welding range to achieve a statistical model based on tensile-shear strength results. An experimental regression model was derived. Results show that increasing the welding current or distance increases the tensile-shear strength of the joints.

1- مقدمه

الکتریکی فرعی انجام شده است. در ایجاد نقطه جوش‌های متناوب، کیفیت نقطه جوش‌های بعدی به واسطه تغییرات الکتریکی-حرارتی ایجاد شده، تحت تأثیر جریان الکتریکی فرعی قرار می‌گیرد. این امر نشان می‌دهد که تحلیل اثر جریان فرعی

در حالی که در اکثر کاربردهای RSW، چندین نقطه جوش جهت اتصال ورق‌ها مورد نیاز است و در موارد اندکی جوش به صورت منفرد دیده می‌شود، مطالعات اندکی روی اثر جریان

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Jafarpoor, M. Jafari Vardanjani, B. Shahriari, Experimental study of the shunting effect on tensile-shear strength of resistance spot welds in AA2219 sheets, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 12, pp. 44- 50, 2022 (in Persian)

دامنه ارتعاش با جریان الکتریکی محدود شده است که تأییدی بر مطالعات گذشته است.

سنکارا و همکاران [6] و ژانگ و همکاران [7]، احتمال بروز ترک را در حین انجام جوشکاری نقطه‌ای منفرد و متوالی، به صورت تجربی و تئوری مورد بررسی قرار دادند. ترک‌ها معمولاً در فاز سرمایه‌گذاری جوشکاری و در سمت آزاد دکمه جوشی جدید ایجاد شدند. گرچه احتمال وجود رابطه‌ای بین جریان الکتریکی فرعی و تولید ترک روی سطح آزاد نقطه جوش پایانی وجود دارد، لیکن تأثیر فاصله و تعداد نقطه جوش روی تولید ترکی نیاز به انجام مطالعه عمیق‌تری دارد.

در این تحقیق، اثر جریان الکتریکی فرعی روی استحکام کششی-برشی نقطه‌جوش‌های RSW، در ورق‌های AA2219 و برای فواصل مختلف جوشکاری مورد بررسی قرار گرفته است. جریان، زمان و فاصله جوشکاری جهت طراحی آزمایش‌هایی مبتنی بر استحکام کششی-برشی، در داخل محدوده جوش‌پذیری، در نظر گرفته شده‌اند. یک مدل رگرسیون نیز بر اساس نتایج تجربی بدست آمده است.

2- روش تحقیق

2-1- آزمون‌های جوش‌پذیری

محدوده مجاز جوش‌پذیری با توجه به معیار عدم پاشش مذاب و دستیابی به قطر دکمه جوش بین $3.5\sqrt{t_s}$ و $5\sqrt{t_s}$ [8، 9]، تعیین شد (منظور از t_s ضخامت ورق است). پس از یافتن نیروی الکتروود قابل قبول، محدوده جوش‌پذیری طبق شکل 1، به دست آمد و مدل المان محدود جوش منفرد اعتبارسنجی شد [9].

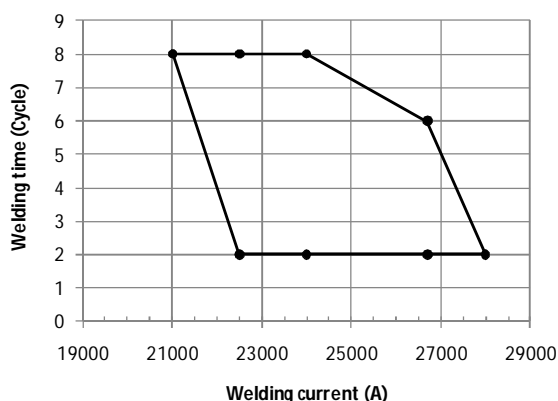


Fig. 1 The weldability range obtained by experimental results [9]

شکل 1 محدوده جوش‌پذیری به دست آمده توسط نتایج تجربی [9]

2-2- طراحی آزمایشات

یک طرح آزمایشی سه عاملی در محدوده مستطیلی داخل محدوده جوش‌پذیری شکل 2 و جدول 3 انجام شد، در حالی که

برای دستیابی به شناختی در زمینه چگونگی تأثیر پارامترهای مختلف بر این فرایند دارای اهمیت است. بنابراین می‌توان راه‌کارهایی را جهت بهینه‌سازی پارامترها و کاهش آثار نامطلوب یافت.

اولین کارهای عملی توسط هارد و همکارانش [1] انجام شد که در آن استحکام کششی و برشی چندین نقطه‌جوش با فاصله معین، هر یک به طور جداگانه، کمتر از یک نقطه جوش منفرد بود. همچنین روشی برای اندازه‌گیری مسیر جریان الکتریکی فرعی پیدا شد، هرچند که رابطه مستقیمی بین جریان اصلی (جوشکاری) و فرعی پیدا نشد. در مطالعه دیگر جعفری و همکاران [2] اثر جریان الکتریکی پالسی، فاصله بین جوشی، و جریان اعمال‌شده را روی اثر شار فرعی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که پالسی نمودن جریان تأثیر مثبتی در رفع اثر شار فرعی داشته است. همچنین اثر شار فرعی به صورت تحلیلی نیز توسط جعفری و همکاران [3] مورد بررسی قرار گرفت و محدوده پارامترهای بهینه جهت ایجاد نقطه جوش مناسب به دست آمد. ساوانیشی [4] انواع مختلفی از فولاد را جهت درک مکانیزم اثر جریان فرعی مورد بررسی قرار داد. از آنجا که فواصل جوشکاری مورد بررسی در این مطالعه بیش از مقادیر استاندارد تعریف شده بود، او نتیجه‌گیری کرد که فاصله فاکتور مؤثری نیست، هرچند که باید توجه نمود که آزمایش‌ها جهت تعیین فاصله حداقل دفع‌کننده اثر شار فرعی طراحی نشده بودند.

وانگ و همکاران [5] کاهش اندازه دکمه جوش را روی جوش متأثر از جریان الکتریکی فرعی، مشاهده کردند. این در حالی بود که شرایط سطحی و فاصله بین دو جوش، مهم‌ترین فاکتورهای این پدیده گزارش شدند. آنها نتیجه‌گیری کردند که برای فلزاتی با مقاومت الکتریکی بالا، فاصله کوتاه‌تری جهت دوری از اثر شار فرعی نیاز است. همچنین این نتیجه به دست آمد که نیروی الکتروود در مقدار جریان فرعی تأثیر معکوس دارد، که این مربوط به محدوده فاصله بحرانی بین جوشی می‌شود. جنس مورد استفاده در این تحقیق فولاد بود، بنابراین نتایج را نمی‌توان برای سایر فلزات تعمیم داد. به علاوه، نمایش اثر ترکیبی پارامترها به درک نسبتاً مبهمی نسبت به تأثیر هر یک از عوامل منجر شد. وانگ و همکاران [5] نیز نظارت بر کیفیت نقطه جوش مقاومتی را با استفاده از سیگنال‌های ارتعاشی الکتروود و تحت شرایط جوشکاری غیرعادی، از قبیل وجود جریان فرعی، مورد مطالعه قرار دادند. گستره تحقیق در زمینه اثر جریان الکتریکی فرعی در این تحقیق به مقایسه تجربی

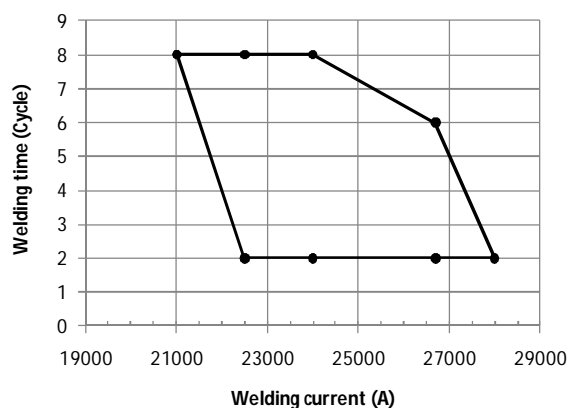


Fig. 3 The design experiment range selected within the welding range
 شکل 3 محدوده طرح آزمایش انتخاب شده در داخل محدوده جوش پذیری

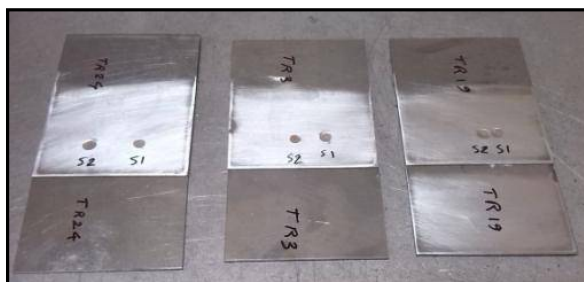


Fig. 4 The samples with different welding intervals before cutting for tensile-shear test

شکل 4 نمونه‌ها با فاصله جوشکاری مختلف قبل از برش برای آزمون کشش برش



Fig 5 The samples prepared for tensile-shear test [10]

شکل 5 نمونه‌های آماده شده برای آزمون کشش برش [10]

با توجه به نمودار پارتوی به دست آمده در شکل 3، مشخص می‌شود که اثر متقابل پارامترهای زمان و فاصله قابل چشم-پوشی نیست. بنابراین، مدل رگرسیون بار گسیختگی را می‌توان به صورت رابطه (1) به دست آورد که در آن F_{FL} بار گسیختگی دکمه جوش است.

$$F_{FL} = 0.1024 I_W - 0.0033 S + 0.0476 t_W + 0.0033 S \cdot t_W \quad (1)$$

محدوده فاصله جوشکاری طبق مطالعات قبلی [10-13] انتخاب شد (جدول 2).

نتایج آزمون طراحی آزمایش، به صورت نیروی گسیختگی بر حسب KN در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 1 محدوده پارامترها در طرح آزمایش

Table 1 Range of parameters in the experiment design

پارامتر	حداقل	حداکثر
جریان جوشکاری (kA)	22/5	26/7
زمان جوشکاری (Cycles)	2	6

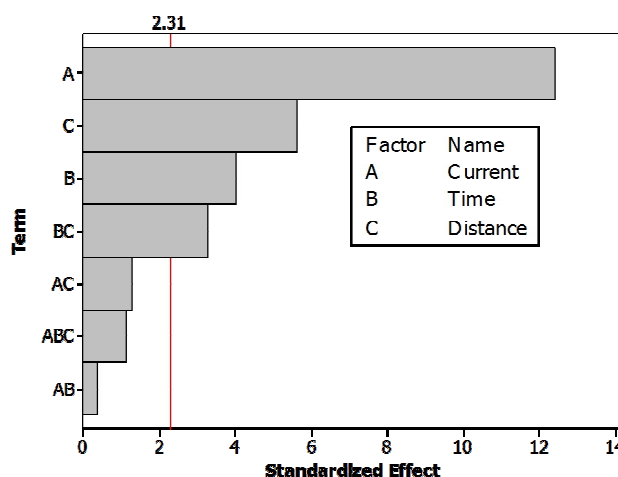


Fig. 2 The Pareto diagram for Table 2 data

شکل 2 نمودار پارتو برای داده‌های جدول 2

جدول 2 نتایج آزمون‌های طراحی آزمایش کششی-برشی

Table 2 The results of tensile-shear tests in design experiment

ردیف	جریان (kA)	زمان (cycles)	فاصله (mm)	نیروی گسیختگی متوسط (kN)
1	22/5	5	5	2/65
2	26/7	5	5	3/11
3	22/5	9	5	2/74
4	26/7	9	5	3/09
5	22/5	5	20	2/73
6	26/7	5	20	3/21
7	22/5	9	20	2/97
8	26/7	9	20	3/50

پس از انجام تحلیل واریانس با $\alpha = 0/05$ ، نمودار پارتوی شکل 3 به دست آمد. نتایج تحلیل واریانس در جدول 3 ارائه شده است. سطوح جدید فاکتورها پس از انجام طراحی آزمایشی، بر اساس اهمیت پارامترها و نمودار پارتو شکل 3 تعیین شدند. این سطوح به علاوه نتایج کششی-برشی در جدول 4 نمایش داده شده‌اند. شکل‌های 4 و 5 نمونه‌ها را به ترتیب قبل و بعد از برش نشان می‌دهند.

3- نتایج

3-1- اثر فاصله جوشکاری بر جریان جوشکاری برای بار گسیختگی مطلوب

نمودار محدوده‌ای مطلوب دیاگرام‌های جریان-فاصله برای بار گسیختگی 3 تا 3/5 kN در شکل‌های 6 تا 8، برای زمان‌های جوشکاری مختلف، که به وسیله مدل رگرسیون داده‌های تجربی بدست آمده‌اند، نمایش داده شده است.

همه دیاگرام‌ها کاهش جریان جوشکاری مورد نیاز را به وسیله افزایش فاصله جوشکاری و کاهش فاصله جوشکاری مورد نیاز را به وسیله افزایش جریان جوشکاری نشان می‌دهد. به علاوه، مقایسه شکل‌های 6 تا 8 نشان می‌دهند که با افزایش زمان جوشکاری، محدوده مطلوب به مناطق پائین دیاگرام انتقال می‌یابد.

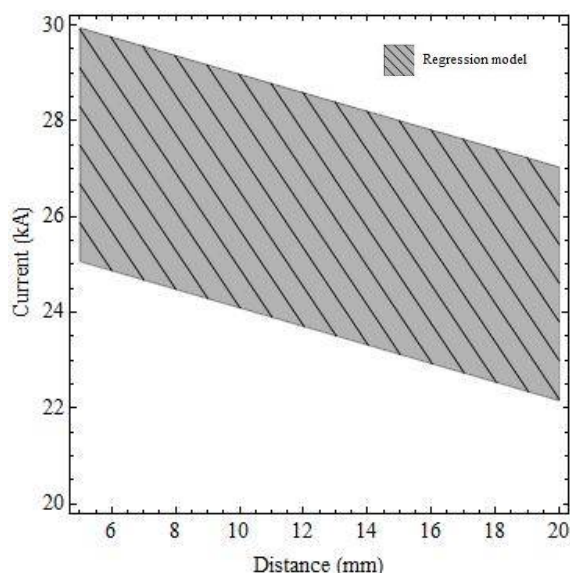


Fig 8 The optimal flow-distance range for a rupture load of 3 to 3.5 kN with a welding time of 7 cycles

شکل 8 محدوده جریان-فاصله مطلوب برای یک بار گسیختگی 3 تا 3/5kN با زمان جوشکاری 7 سیکل

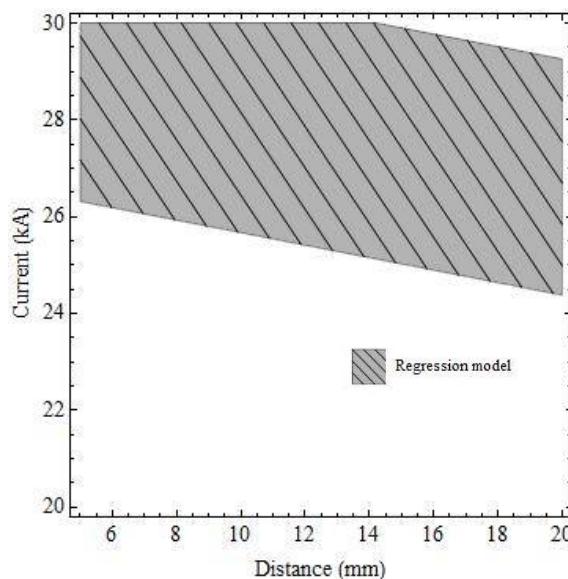


Fig. 6 The optimal flow-distance range for a rupture load between 3 to 3.5 kN with a welding time of 5 cycles

شکل 6 محدوده جریان-فاصله مطلوب برای یک بار گسیختگی بین 3 تا 3/5 kN با زمان جوشکاری 5 سیکل

جدول 3 نتایج تحلیل واریانس برای داده‌های جدول 2

Table 3 The results of analysis of variance for the data in Table2

P	F	Adj MS	Adj SS	Seq SS	DF	Source
0	67/43	0/360841	1/08252	1/08252	3	Main Effects
0	154/41	0/826281	0/82628	0/82628	1	Current
0/004	16/32	0/08732	0/08732	0/08732	1	Time
0	31/57	0/168921	0/16892	0/16892	1	Distance
0/702	0/16	0/000841	0/00084	0/00084	1	Current Time
0/228	1/7	0/00912	0/00912	0/00912	1	Current Distance
0/011	10/67	0/057121	0/05712	0/05712	1	Time Distance
0/281	1/33	0/00714	0/00714	0/00714	1	Current Time Distance
---	---	0/005351	0/04281	0/04281	8	Residual Error
---	---	0/005351	0/04281	0/05281	8	Pure Error
---	---	---	---	1/19955	15	Total

3-2- اثر جریان جوشکاری بر نیروی گسیختگی

شکل‌های 9 تا 11 بار گسیختگی دکمه جوش را تحت آزمون کشش، در مقابل جریان جوشکاری، برای فاصله‌های مختلف جوشکاری آزمون‌های تجربی نشان می‌دهند.

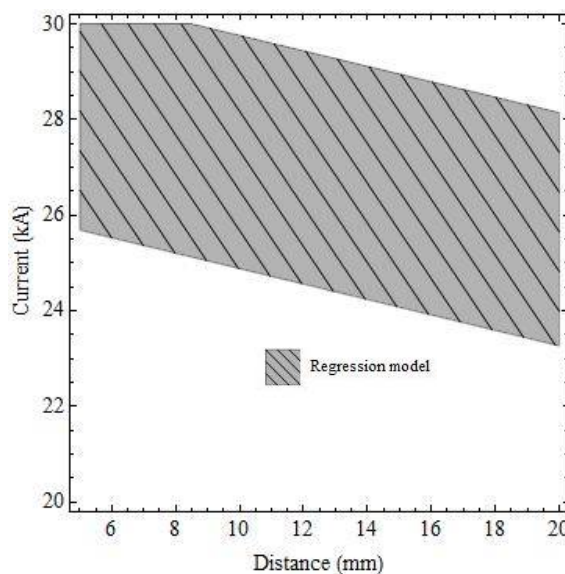


Fig. 7 The optimal flow-distance range for a rupture load of 3 to 3.5 kN with a welding time of 6 cycles

شکل 7 محدوده جریان-فاصله مطلوب برای یک بار گسیختگی 3 تا 3/5 kN با زمان جوشکاری 6 سیکل

جدول 4 نتایج آزمون کشش-برش

Table 4 Tensile-shear test results

ردیف	جریان (kA)	زمان (cycles)	فاصله (mm)	نیروی گسیختگی متوسط (kN)	انحراف معیار
1	22/50	5	2	2/18	0/0336
2	22/50	5	6	2/63	0/0401
3	22/50	12/5	2	2/42	0/0720
4	22/50	12/5	6	3/05	0/0469
5	22/50	20	2	2/94	0/0326
6	22/50	20	6	3/54	0/0404
7	23/9	5	2	2/66	0/1207
8	23/9	5	6	2/82	0/0909
9	23/9	12/5	2	2/45	0/0901
10	23/9	12/5	6	3/21	0/1057
11	23/9	20	2	2/81	0/0662
12	23/9	20	6	3/18	0/0773
13	25/3	5	2	3/11	0/1007
14	25/3	5	6	3/28	0/0663
15	25/3	12/5	2	2/85	0/0432
16	25/3	12/5	6	3/23	0/0829
17	25/3	20	2	3/02	0/0469
18	25/3	20	6	3/25	0/0926
19	26/7	5	2	3/46	0/1908
20	26/7	5	6	3/32	0/1473
21	26/7	12/5	2	3/50	0/1104
22	26/7	12/5	6	3/56	0/1234
23	26/7	20	2	3/56	0/0891
24	26/7	20	6	3/55	0/0730

گسیختگی افزایش می‌یابد و هیچ رابطه متقابلی بین جریان جوشکاری و فاصله جوشکاری وجود ندارد زیرا بار گسیختگی برای تمام فواصل تقریباً هیچ تغییری ندارد.

3-3- تاثیر فاصله جوشکاری بر بار گسیختگی

شکل‌های 12 تا 14 نیروی گسیختگی دکمه جوش را تحت آزمون کشش، در مقابل فاصله جوشکاری، برای جریان‌های جوشکاری معین آزمون‌های تجربی نشان می‌دهند. دوباره افزایش بار گسیختگی به وسیله افزایش جریان و فاصله جوشکاری برای دیاگرام‌های مختلف دیده می‌شود. هیچ اثر متقابل مهمی بین جریان و فاصله جوشکاری دیده نمی‌شود.

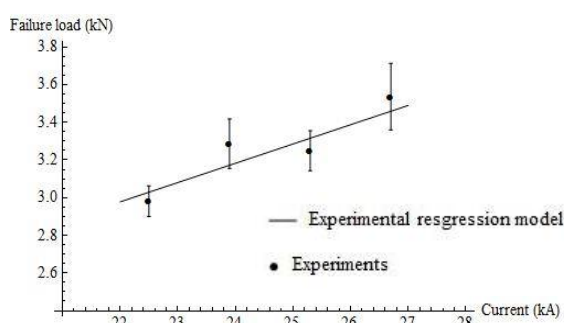


Fig. 10 Comparison of experimental results and experimental regression model of rupture force against welding current for welding distance of 12.5 mm and welding time of 8 cycles [12]

شکل 10 مقایسه نتایج تجربی و مدل رگرسیون تجربی نیروی گسیختگی در مقابل جریان جوشکاری برای فاصله جوشکاری 5/12 mm و زمان جوشکاری 8 سیکل [12]

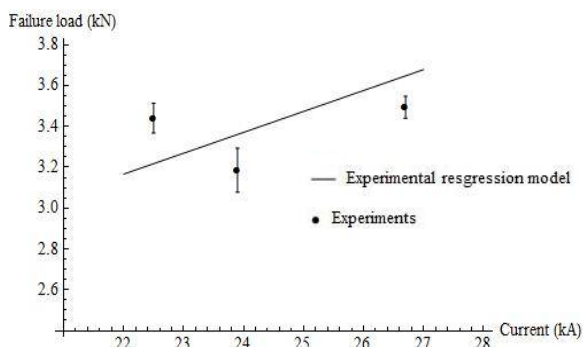


Fig. 11 Comparison of experimental results and experimental regression model of rupture force against welding current for 20 mm welding distance and 8 cycle welding time

شکل 11 مقایسه نتایج تجربی و مدل رگرسیون تجربی نیروی گسیختگی در مقابل جریان جوشکاری برای فاصله جوشکاری 20 mm و زمان جوشکاری 8 سیکل

3-4- تاثیر زمان جوشکاری روی نیروی گسیختگی

شکل‌های 15 تا 17 نیروی گسیختگی دکمه جوشکاری را تحت آزمون کشش در مقابل زمان جوشکاری، برای جریان‌های جوشکاری معین نشان می‌دهد.

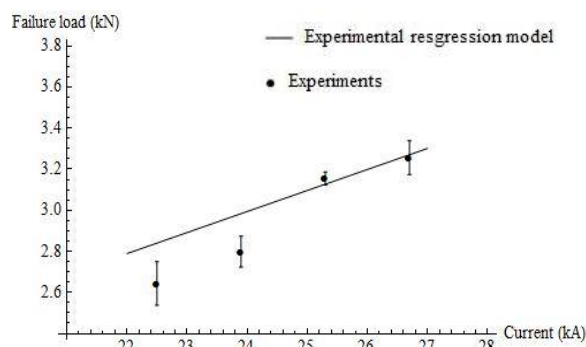


Fig. 9 Comparison of experimental results and experimental regression model of rupture force against welding current for welding distance of 5 mm and welding time of 8 cycles

شکل 9 مقایسه نتایج تجربی و مدل رگرسیون تجربی نیروی گسیختگی در مقابل جریان جوشکاری برای فاصله جوشکاری 5 mm و زمان جوشکاری 8 سیکل

نتیجه‌گیری کلی به دست آمده از همه دیاگرام‌ها با افزایش جریان جوشکاری تقریباً باعث افزایش استحکام شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله جوشکاری، نیروی

فاصله جوشکاری باعث افزایش سهم جریان جوشکاری شده است؛ بنابراین افزایش زمان، حرارت کافی، و در نتیجه آن، دکمه جوش محکم‌تری فراهم می‌آورد، هرچند که محدودیتی در افزایش زمان جوشکاری وجود دارد. در واقع افزایش بیش از حد زمان باعث تدارک زمان کافی جهت سرد شدن جوش می‌شود، زیرا ضریب رسانش حرارتی آلیاژ آلومینیوم بالا است.

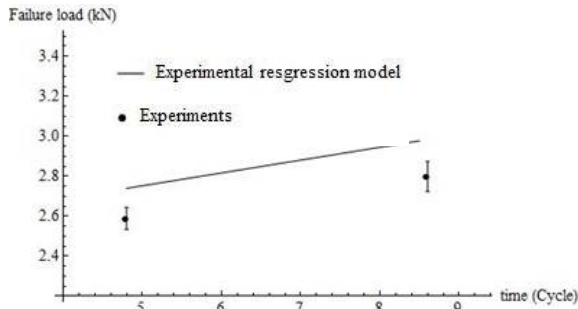


Fig. 15 Comparison of experimental results and experimental regression model of rupture force against welding time, for welding distance of 5 mm and welding current of 23.9 kA

شکل 15 مقایسه نتایج تجربی و مدل رگرسیون تجربی نیروی گسیختگی در مقابل زمان جوشکاری، برای فاصله جوشکاری 5 mm و جریان جوشکاری 23/9 kA

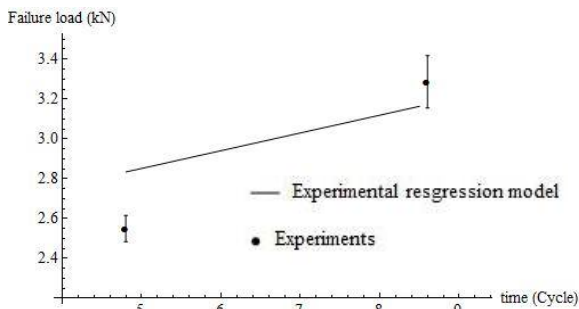


Fig. 16 Comparison of experimental results and experimental regression model of rupture force versus welding time for welding distance of 12.5 mm and welding current of 23.9 kA

شکل 16 مقایسه نتایج تجربی و مدل رگرسیون تجربی نیروی گسیختگی در مقابل زمان جوشکاری برای فاصله جوشکاری 12/5 mm و جریان جوشکاری 23/9 kA

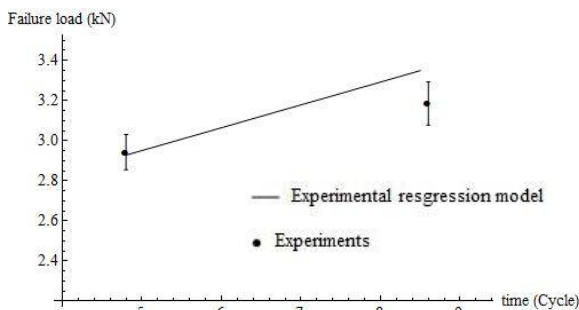


Fig. 17 Comparison of experimental results and experimental regression model of rupture force versus welding time for welding distance of 20 mm and welding current of 23.9 kA

شکل 17 مقایسه نتایج تجربی و مدل رگرسیون تجربی نیروی گسیختگی در مقابل زمان جوشکاری برای فاصله جوشکاری 20 mm و جریان جوشکاری 23/9 kA

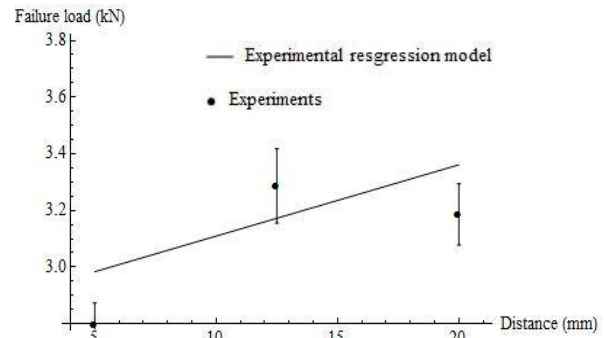


Fig. 12 Comparison of experimental results and experimental regression model of rupture load versus welding distance for welding current of 23/9 kA and welding time of 8 cycles

شکل 12 مقایسه نتایج تجربی و مدل رگرسیون تجربی بار گسیختگی در مقابل فاصله جوشکاری برای جریان جوشکاری 23/9kA و زمان جوشکاری 8 سیکل

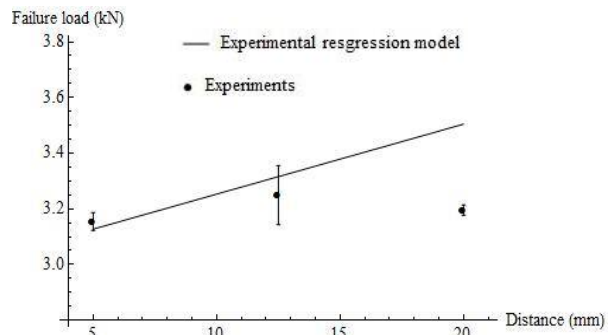


Fig. 13 Comparison of experimental results and experimental regression model of rupture load versus welding distance for welding current of 25.3 kA welding time 8 cycles

شکل 13 مقایسه نتایج تجربی و مدل رگرسیون تجربی بار گسیختگی در مقابل فاصله جوشکاری برای جریان جوشکاری 25/3 kA زمان جوشکاری 8 سیکل

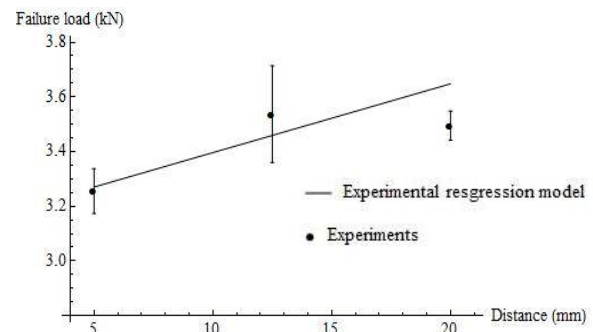


Fig. 14 Comparison of experimental results and experimental regression model of rupture load versus welding distance for welding current 26.7 kA welding time 8 cycles

شکل 14 مقایسه نتایج تجربی و مدل رگرسیون تجربی بار گسیختگی در مقابل فاصله جوشکاری برای جریان جوشکاری 26/7 kA زمان جوشکاری 8 سیکل

گرچه افزایش زمان جوشکاری باعث افزایش نیروی گسیختگی دکمه شده است، اثر متقابل اندکی بین زمان و فاصله دیده می‌شود. افزایش فاصله باعث افزایش نیروی گسیختگی شده است. دلیل اصلی، مجدداً به جریان فرعی وابسته است. افزایش

4- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر جریان الکتریکی فرعی بر استحکام کششی-برشی اتصالات نقطه جوش ورق های AA2219، با استفاده از آزمون های تجربی مورد بررسی قرار گرفتند. یک مدل رگرسیون بر اساس نتایج، برای نیروی گسیختگی، بدست آمد. افزایش جریان یا فاصله جوشکاری باعث افزایش استحکام کششی-برشی اتصالات شده است. اثر متقابلی بین پارامترها دیده نشد و رابطه ای تقریباً خطی بین پارامترها و نیروی گسیختگی مشاهده شد. رابطه متقابل اندکی بین زمان و جریان نشان می دهد که افزایش زمان، حرارت کافی برای تولید دکمه جوش فراهم می کند در حالی که زمان جوشکاری بالا می تواند زمان کافی را برای دفع آسان تر حرارت به واسطه ضریب رسانش حرارتی بالای آلیاژ آلومینیوم فراهم آورد.

5- مراجع

- steels-part 1: experimental study, *Welding Journal*, Vol. 92, No. 6, pp. 182-189, 2013.
- [6] J. Senkara, H. Zhang, Cracking in spot welding aluminum alloy AA5754, *Welding Journal*, Vol. 79, No. 7, pp. 194-202, 2000.
- [7] H. Zhang, J. Senkara, X. Wu, Suppressing cracking in resistance welding AA5754 by mechanical means, *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 124, No. 1, pp. 79-85, 2002.
- [8] M. Jafari Vardanjani, Metallurgical Effects of Shunting Current on Resistance Spot-Welded Joints of AA2219 Sheets, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 25, No. 8, pp. 3506-3517, 2016.
- [9] M. J. Vardanjani, A. Araee, J. Senkara, J. Jakubowski, J. Godek. Experimental and numerical analysis of shunting effect in resistance spot welding of Al2219 sheets, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, Vol. 64, No. 2, pp. 425-434, 2016.
- [10] M. J. Vardanjani, A. Araee, J. Senkara, M. Sohrabian, R. Zarandooz, Influence of Shunting Current on the Metallurgical and Mechanical Behaviour of Resistance Spot-welded Joints in AA2219 Joints, *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 62, No. 11, pp. 625-635, 2016.
- [11] R. Moharrami, B. Hemmati, Numerical stress analysis in resistance spot-welded nugget due to post-weld shear loading, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 27, pp. 284-290, 2017.
- [12] A. Chabok, Effect of pulse scheme on the microstructural evolution, residual stress state and mechanical performance of resistance spot welded DP1000-GI steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 23, No. 8, pp. 649-658, 2018.
- [13] Voda, M., C. Codrean, D. Chicot, V. A. Şerban, D. Uţu, E. Linul, D. Buzdugan, Characterization of brazed joints by electrical resistance spot brazing with Ni-based amorphous self-flux alloys, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 37, pp. 617-627, 2019.
- [1] A. Hard, Preliminary test of spot weld shunting in 24ST Alclad, *Welding Journal*, Vol. 27, No. 6, pp. 491-495, 1948.
- [2] M. Jafari Vardanjani, J. Senkara, Effect of Multi-Pulsed Current Mechanism on Shunting Current in Resistance Spot Welding (RSW) of AA-2219 Sheets, *Experimental Techniques*, pp. 1-15, 2021.
- [3] M. Jafari Vardanjani, Theoretical analysis of shunting effect in resistance spot welding (RSW) of AA2219, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 39, No. 8, p p. 907-918, 2016.
- [4] C. Sawanishi, Development of resistance spot welding technology applying multi-stage adaptive control for narrow pitch spot welding, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, Vol. 37, No. 4, pp. 173-180, 2019.
- [5] B. Wang, Shunting effect in resistance spot welding