



# Effect of Tool Rotation Speed and Dwelling Time on Mechanical Properties of Al-Mg Sheets Welded By Protrusion Friction Stir Spot Welding

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Mohammadnia H.<sup>1</sup> MSc,  
Mousavizade S.<sup>2</sup> PhD,  
Ezatpour H.R.<sup>\*3</sup> PhD

### How to cite this article

Mohammadnia H, Mousavizade S, Ezatpour H.R. Effect of Tool Rotation Speed and Dwelling Time on Mechanical Properties of Al-Mg Sheets Welded By Protrusion Friction Stir Spot Welding. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(1):25-34.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Dezfool University, Dezfool, Iran

<sup>2</sup>Material Science Engineering Department, Engineering Faculty, University of Gonabad, Gonabad, Iran

<sup>3</sup>Engineering Science Department, Engineering Faculty, Sabzevar University of New Technology, Sabzevar, Iran

### \*Correspondence

Address: Sabzevar University of New Technology, Bardaskan Road Intersection, Sabzevar, Iran  
Phone: +98 (51) 44200980  
Fax: +98 (51) 44200886  
h.r.ezatpour@gmail.com

### Article History

Received: February 14, 2019  
Accepted: April 24, 2019  
ePublished: January 1, 2020

## ABSTRACT

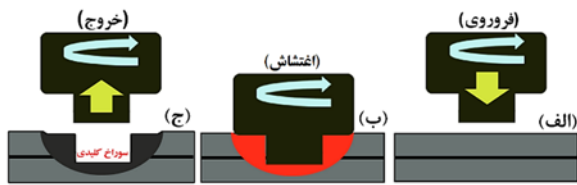
In this research, the effect of tool rotation speed and dwelling time on the strength of the welds produced by protrusion friction stir spot welding (PFSSW) was investigated. This simple novel technique involves the use of a designed circular protrusion on the backing anvil. Welding was performed by pinless tools on the AA5053 sheets with a thickness of 1 mm at tool rotation speeds of 630-2000 rpm and dwelling times of 6 s, 12 s, and 18 s. Appearance surface of produced welds was the smooth and free keyhole in comparison with conventional friction stir spot welding. Tensile-shear test results showed that all welds were failed in circumferential failure mode. Maximum and minimum peak loads were obtained at 1600 rpm, 18 s (4.9 kN) and 1000 rpm, 12 s (3.5 kN), respectively. Maximum and minimum elongations were obtained at 2000 rpm, 18 s (5 mm) and 2000 rpm, 6 s (2.3 mm), respectively. Maximum and minimum failure energies were obtained at 2000 rpm, 18 s (12.3 J) and 1000 rpm, 12 s (3.1 J), respectively.

**Keywords** AA5053; Protrusion Friction Stir Spot Welding; Tool Rotational Speed; Tool Dwelling Time; Mechanical Properties

## CITATION LINKS

[1] Achieving high mechanical performance in protrusion friction stir spot welding (PFSSW) of DQSK steel compared to other techniques [2] Achieving special mechanical properties with considering dwell time of AA5052 sheets welded by a simple novel friction stir spot welding [3] Friction stir spot welding of advanced high-strength steels-a feasibility study [4] Dissimilar resistance spot welding of DP600 dual phase and AISI 1008 low carbon steels: Correlation between weld microstructure and mechanical properties [5] Structure-properties relations in friction stir spot welded low carbon steel sheets for light weight automobile body [6] Mechanical performance of three thickness resistance spot welded low carbon steel [7] Microstructures and failure mechanisms of friction stir spot welds of aluminum 6061-T6 sheets [8] Critical review of automotive steels spot welding: Process, structure and properties [9] Frictional wear evaluation of WC-Co alloy tool in friction stir spot welding of low carbon steel plates [10] Microstructure and mechanical properties of mild steel joints prepared by a flat friction stir spot welding technique [11] Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behaviour of friction stir spot welded joints in Al-Mg-Si alloy [12] Mechanical properties and microstructure of resistance spot welded severely deformed low carbon steel [13] On the failure of low carbon steel resistance spot welds in quasi-static tensile-shear loading [14] Microstructure, mechanical properties and failure behaviour of protrusion friction stir spot welded 2024 aluminium alloy sheets [15] High mechanical performance of similar Al joints produced by a novel spot friction welding technique [16] Protrusion friction stir spot welding: A simple novel method to produce dissimilar joints of galvanized steel/aluminum sheets with high mechanical performance

و فورده از سال ۲۰۰۳ در اتصالات بدنه خودرو به کار گرفته شده است.<sup>[5]</sup>



شکل ۱) نمایش شماتیک از فرآیند جوشکاری اصطکاکی مرسوم شامل ۳ مرحله (الف) فروروی، (ب) اغتشاش، (ج) خارج شدن ابزار

از مزایای عمده این روش کاهش ۹۰ درصدی مصرف انرژی و کاهش ۴۰ درصدی هزینه تجهیزات نسبت به جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای است.<sup>[2, 8]</sup> علاوه بر این جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای برخلاف جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، یک روش جامد است که این ویژگی منجر به بهبود خواص مختلف جوش خواهد شد. با وجود مزایای فراوان، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای دارای معایبی همچون زمان اجرای بالاتر نسبت به جوش مقاومتی و از آن مهم‌تر باقی‌ماندن فرورفتگی (Keyhole) قابل توجهی در سطح قطعه است که از منظر زیبایی و مقاومت به خوردگی نامطلوب می‌باشد (شکل ۱-ج). تحقیقات زیادی برای حذف این فرورفتگی انجام شده است. در ادامه به تعدادی از تحقیقات انجام‌شده در این زمینه اشاره می‌شود.

اماتسو و همکاران<sup>[9]</sup> روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای پرکردنی (Refill FSSW) را معرفی کردند که این روش شامل حرکت متناوب پین و شانه (Shoulder) روی سطح ورق جهت پرکردن فرورفتگی ناشی از پین می‌باشد. از معایب این روش زمان و هزینه بالای فرآیند می‌باشد. از سال ۲۰۰۹ تحقیقاتی نیز در مورد استفاده از ابزار بدون پین صورت گرفته است. مشخص شده است که این ابزار فقط قابلیت جوش نقطه‌ای ورق‌هایی با ضخامت کمتر از ۱/۶mm را دارد و بنابراین برای کاربرد در اتصالات بدنه خودرو قابل استفاده نمی‌باشد.<sup>[10]</sup> در سال ۲۰۱۲، روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با دو پاس جوشکاری (Flat FSSW) مورد آزمایش قرار گرفت. دومرحله‌ای بودن فرآیند و در نتیجه زمان بالای اجرای آن از معایب این روش به شمار می‌آید.<sup>[11]</sup> روش دیگری شامل حرکت ابزار در مسیری دایره‌ای ابداع شده است (Walking FSSW) که این روش نیز زمان اجرای جوش را طولانی می‌کند.<sup>[12]</sup> هر چند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در فولاد بدنه خودرو دارای مزایای فراوانی است ولی تاکنون عدم موفقیت در حذف فرورفتگی سطحی آن و زمان طولانی اجرای آن، مانعی در توسعه این روش برای بدنه خودرو بوده است.

در این تحقیق، روش جدیدی برای حذف فرورفتگی ایجادشده توسط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای مرسوم (Conventional FSSW) به کار گرفته شد که شامل بکارگیری زائده‌ای (Protrusion) خاص در زیر ورق‌ها و استفاده از ابزار بدون پین

## تأثیر سرعت و زمان دوران ابزار روی خواص مکانیکی ورق‌های نازک آلیاژ آلومینیم- منیزیم جوشکاری شده توسط روش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای زائده‌ای

حسین محمدنیا MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد دزفول، دزفول، ایران

سیدمصطفی موسوی‌زاده PhD

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

حمیدرضا عزت‌پور\* PhD

گروه علوم مهندسی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فناوری های نوین سبزوار، سبزوار، ایران

### چکیده

در این پژوهش اثر سرعت و زمان دور ابزار بر استحکام جوش‌های تولیدشده توسط روش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای زائده‌ای مورد بررسی قرار گرفت. این روش جدید ساده شامل استفاده از زائده دایره‌ای شکل طراحی شده روی یک سندان است. جوشکاری توسط ابزار استوانه بدون پین با سطح مقطع مسطح با سرعت دوران متفاوت ۲۰۰-۶۳۰rpm و زمان‌های دوران ۶، ۱۲ و ۱۸s روی ورق‌های آلیاژ آلومینیم- منیزیم با ضخامت ۱mm انجام شد. سطح ظاهری نمونه‌های جوشکاری شده توسط این روش در مقایسه روش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای مرسوم نسبتاً صاف و بدون حضور سوراخ کلیدی بود. نتایج حاصل از آزمون کشش- برش نشان داد که تمام شکست در نمونه‌های جوشکاری شده به صورت شکست محیطی اتفاق افتاده است. نتایج مکانیکی نشان دادند که بیشترین استحکام کشش- برش در نمونه جوشکاری شده در ۱۶۰۰rpm و ۱۸s (۴/۹kN) و کمترین آن در ۱۰۰۰rpm و ۱۲s (۳/۵kN)، بیشترین میزان افزایش طول نمونه در ۲۰۰۰rpm و ۱۸s (۵mm) و کمترین آن در ۲۰۰۰rpm و ۶s (۲/۳mm)، بیشترین انرژی شکست در ۲۰۰۰rpm و ۱۸s (۱۲/۳J) و کمترین آن در ۱۰۰۰rpm و ۱۲s (۳/۱J) به دست آمده است.

کلیدواژه‌ها: آلیاژ آلومینیم ۵۰۵۳، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای زائده‌ای، سرعت دوران ابزار، زمان دوران ابزار، خواص مکانیکی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۴

\*نویسنده مسئول: h.r.ezatpour@gmail.com

### ۱- مقدمه

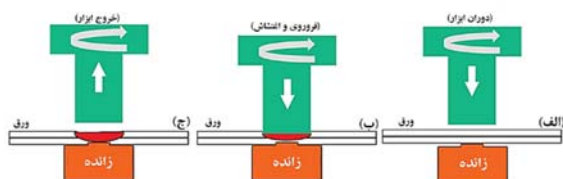
امروزه در اتصالات بدنه خودرو از ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ جوش نقطه‌ای استفاده می‌شود<sup>[1-3]</sup>. در حال حاضر جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (RSW) برای اتصال ورق‌های مختلف بدنه خودرو به طور گسترده استفاده می‌شود که دلیل آن سرعت بالا، انعطاف‌پذیری و قابلیت اتوماسیون بالای آن است. این روش دارای معایبی همچون عدم ایجاد جوش مناسب برای فلزات سبک، خرابی الکترودهای مسی، مصرف انرژی بالا، هزینه تجهیزات نسبتاً بالا و عدم ایجاد خواص کاملاً مطلوب در فولادها و خصوصاً در فولادهای استحکام‌بالا به دلیل دمای بالا و سرعت سرد شدن بالا است<sup>[3, 4]</sup>. از این رو روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW؛ شکل ۱) به دلیل مزایای قابل توجه توسط شرکت‌های مختلف خودروسازی مانند مزدا

حذف لایه اکسید تشکیل شده قبل از فرآیند جوشکاری، سطح ورق‌ها سنباده‌زنی شد. علاوه بر این سطح ورق‌ها باید عاری از آلودگی‌های سطحی مانند روغن و چربی باشد. وجود این آلودگی‌ها در سطح ورق در حین انجام جوشکاری توسط جریان مواد نرم شده، به درون ناحیه جوش وارد شده و باعث بروز خطا در آزمایشات می‌شود. بنابراین، سطح ورق‌ها با استفاده از استن تمیزکاری شد. این کار احتمال وجود آلودگی را در ناحیه جوش و فصل مشترک دو ورق تا حد زیادی کاهش می‌دهد.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای زائده‌ای توسط ماشین فرز مدل FP4M انجام شد. پس از انتخاب ابزار و آماده‌سازی دستگاه، دو ورق آلایژ آلومینیوم- منیزیم که روی هم قرار گرفته‌اند روی برجستگی که دقیقاً در زیر ابزار و در محل فرود آن تعبیه شده است، قرار داده شده و توسط نگهدارنده‌های فولادی، محکم بسته شدند. سپس با تنظیم سرعت دوران ابزار، فرآیند جوشکاری در مدت زمان‌های نگهداری تعیین شده انجام شد (شکل ۲- ب). جوشکاری در سرعت دوران ابزار بین ۶۳۰ تا ۲۰۰۰rpm و زمان‌های ۶ تا ۱۸s انجام شد. میزان فروروی ابزار در سطح نمونه‌ها ۰/۱mm در نظر گرفته شد.

شکل ۳ مراحل جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای زائده‌ای شرح داده شده را نشان می‌دهد. جوشکاری در سه مرحله انجام می‌شود. ابتدا ابزار در حال دوران به‌طور عمودی در جهت پایین به سمت ورق حرکت کرده و با سطح آن تماس می‌یابد. در اثر اعمال نیروی عمودی و تماس ابزار با سطح ورق حرارت اصطکاکی بین آن دو ایجاد می‌شود. مواد در زیر ابزار با افزایش دما نرم شده و با ادامه اعمال نیروی عمودی، مرحله فروروی ابزار انجام می‌شود. زائده قرارداده شده در زیر دو ورق سبب ایجاد ناهمواری در فصل مشترک دو ورق می‌شود. بعد از نگهداری ابزار در مدت معین، ابزار به‌وسیله نیروی بالابرنده از ناحیه جوش خارج می‌شود.

خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده در مطالعه حاضر توسط آزمون کشش برش با سرعت ۱mm/min توسط دستگاه سنتام انجام شد. نمونه‌های آزمون کشش برش طبق شکل ۴ تهیه شد. نمودارهای نیرو- جابجایی حاصل از آزمون کشش- برش نمونه‌های جوش به کمک داده‌های دستگاه کشش رسم شد. با توجه به نمودارهای حاصل مقادیر حداکثر نیروی قابل تحمل برای نمونه، تغییر طول تا نقطه حداکثر نیرو و نیز انرژی شکست نمونه‌های جوش محاسبه شد. این داده‌ها به منظور ارزیابی خواص مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۳ (۳) تصویر شماتیک از مراحل فرآیند PFSSW شامل: (الف) دوران، (ب) فروروی و اغتشاش (ج) خارج شدن ابزار

می‌باشد. سپس، تأثیر پارامترهای جوشکاری (سرعت و زمان دوران ابزار) جهت تعیین شرایط مناسب برای ایجاد جوش با خواص مکانیکی مطلوب مورد بررسی گرفت.

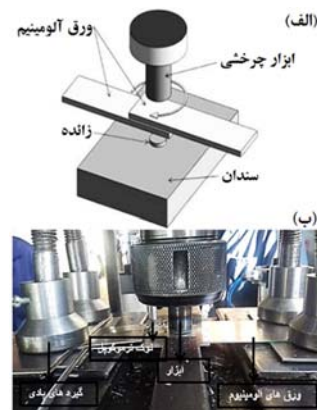
## ۲- مواد و روش انجام آزمایش

در این پژوهش ورق‌هایی از جنس آلایژ آلومینیوم- منیزیم ۵۰۵۳ با ضخامت ۱mm مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی ورق‌ها به کمک دستگاه کوانتومتری اندازه‌گیری شد که در جدول ۱ گزارش شده است.

ورق‌ها به شکل صفحات مستطیلی با طول و عرض به ترتیب ۱۰۰ و ۴۵mm برش داده شدند. سطح قرارگیری دو ورق روی هم دارای طول و عرض به ترتیب ۴۵ و ۳۰mm اندازه‌گیری شد. جوشکاری در مرکز این ناحیه انجام شد. در پژوهش حاضر، جوشکاری اغتشاشی نقطه‌ای به کمک زائده تعبیه شده روی میز کار اجرا و ویژگی‌های ماکروساختاری و مکانیکی جوش مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۲- الف، تصویر شماتیک از نحوه قرارگیری ابزار و زائده را در این روش نمایش می‌دهد. زائده تعبیه شده روی میز کار دقیقاً در محل فرود ابزار قرار دارد. دو ورق روی زائده قرار گرفته و جوشکاری انجام می‌شود. ابزار استفاده شده در این تحقیق از جنس فولاد ابزار SPK سخت شده در آب انتخاب شده است. با توجه به اینکه این ابزار به عنوان یک ابزار مقاوم به سایش شناخته شده است. امروزه استفاده از آن در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای رایج است. هندسه ابزار به شکل استوانه‌ای با قطر ۱۶mm و فاقد پین و دارای سطح مسطح است. در سطح میز کار و دقیقاً در محل فرود ابزار، زائده دایره‌ای شکل ایجاد شد. این زائده دارای قطر ۷mm و ارتفاع ۰/۴mm از سطح میز کار است.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی آلایژ آلومینیوم ۵۰۵۳

عناصر	آلومینیوم	منیزیم	سلیسیم	آهن	کرم	مس
wt%	باقی مانده	۲/۸	۰/۲۵	۰/۴	۰/۱۵	۰/۱



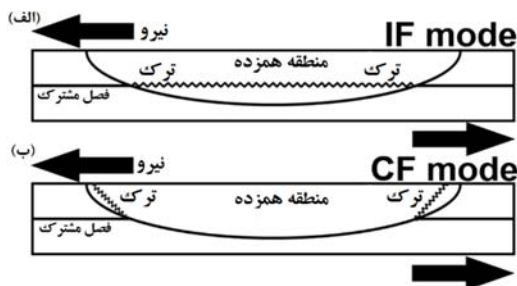
شکل ۲ (الف) تصویر شماتیک از فرآیند PFSSW نشان‌دهنده نحوه قرارگیری ابزار و زائده، (ب) مراحل انجام جوشکاری

وجود لایه اکسیدی که معمولاً روی سطح ورق‌ها تشکیل می‌شود، ممکن است موجب کاهش کیفیت جوش‌های نقطه‌ای شود. برای

سطح جوشکاری شده در این پژوهش به دلیل استفاده از ابزار بدون پین تقریباً صاف بوده که بر خلاف روش استفاده از ابزار پین دار تمرکز تنش و نیاز بتونه کاری در آن حداقل مقدار خود را دارد. اثر فرورفتگی ناشی از دوران ابزار و همچنین ناشی از زائده یک نمونه جوشکاری شده به روش حاضر مشابه با اثر فرورفتگی بسیار کم ناشی از الکترودهای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای می‌باشد [8, 12]. به دلیل حالت جامد بودن این روش تغییرات ریزساختاری و به وجود آمدن فازها و ساختارهای نامطلوب در این روش در مقایسه با روش جوشکاری مقاومتی بسیار کم تر بوده و همین امر سبب افزایش استحکام و مطلوبیت این روش جوشکاری می‌شود.

### ۳-۲- بررسی رفتار مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده

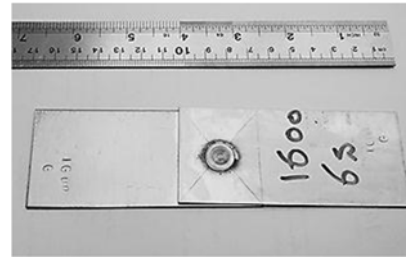
کیفیت جوش‌های تهیه شده به وسیله آزمون کشش- برش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. حالت شکست معمولاً تاثیر قابل توجهی روی نیروی ماکزیمم نیروی شکست (Peak Load) و انرژی شکست (Failure Energy) جوش دارد [10]. در مجموع، نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای دارای دو حالت شکست فصل مشترکی (Interfacial Failure Mode) و محیطی (Circumferential Failure Mode) می‌باشند که در شکل ۶ نشان داده شده است. رخ دادن شکست فصل مشترکی و شکست محیطی به شرایط جوشکاری بستگی دارد.



شکل ۶ تصویر شماتیک از انواع شکست رخ داده شده بعد از آزمون کشش- برش نمونه‌های جوشکاری شده توسط فرآیند FSW، (الف) شکست فصل مشترکی، (ب) شکست محیطی

شکل ۶- الف تصویری شماتیک از شکست فصل مشترکی را نشان می‌دهد. در نوع شکست فصل مشترکی، پارگی تنها در امتداد فصل مشترک ورق بالایی و پایینی مشاهده می‌شود و در سطح مقطع ورق، پارگی وجود ندارد. این نوع شکست استحکام کششی برشی کمی دارد. همچنین در یک زمان خیلی کوتاه نیرو به صفر کاهش می‌یابد و تغییر شکل پلاستیک بسیار کم می‌باشد [13]. در جوش مقاومتی نقطه‌ای استحکام جوش در حالت فصل مشترکی به اندازه ناحیه ذوبی و استحکام برشی ناحیه ذوبی بستگی دارد [14].

شکل ۶- ب، تصویری شماتیک از شکست محیطی را نشان می‌دهد. در شکست محیطی، پارگی در اطراف ناحیه جوش ترک در اثر گردنی شدن ایجاد شده و گسترش می‌یابد و دکمه جوش از یکی از ورق‌ها روی دیگری باقی می‌ماند. این حالت نشان‌دهنده استحکام کششی برشی زیادی در اتصالات می‌باشد [13]. استحکام جوش در

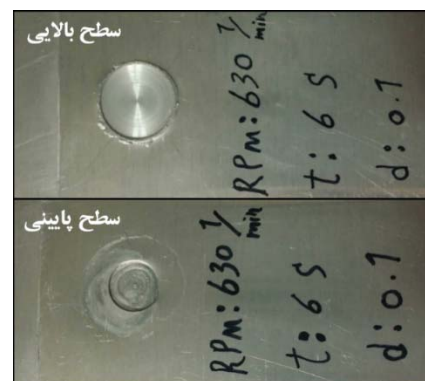


شکل ۴ نمونه آماده سازی شده برای آزمون کشش برش

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی سطح ظاهری جوش

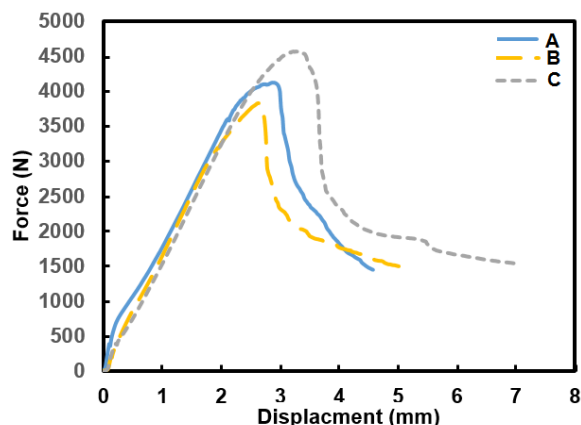
یکی از نکات بسیار مهم در زمینه بررسی و تعیین مطلوبیت جوش بررسی ظاهری و زیبایی سطحی آن می‌باشد. همچنین جوش ایجاد شده باید کمترین میزان عیوب سطحی، بهترین کیفیت و کمترین نیاز به عملیات بعدی اعم از پرداخت سطحی و بتونه کاری را داشته باشد. تصویری از سطح بالا و پایین جوش یک نمونه ورق آلومینیوم آلیاژی جوشکاری شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای زائده‌ای در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سطح بالایی جوش (Upper Surface) تقریباً مسطح و هیچ‌گونه حفره یا غیریکنواختی مشخصی در سطح مشاهده نمی‌شود (سطح بدون سوراخ کلیدی در مقایسه با روش مرسوم FSSW نشان داده در شکل ۱- ج است). قطر اثر ابزار به اندازه ۱۶mm می‌باشد و میزان کمی پلیسه در اثر نرم‌شدگی ورق و سیلان آن به لبه‌های نقطه جوش دیده می‌شود. به دلیل عمق فروروی کم (۰/۱mm برابر با ۱۰٪ ضخامت ورق‌های استفاده شده در این مطالعه) پلیسه‌های ایجاد شده بسیار کم می‌باشد. میزان عمق فروروی در فرآیند مرسوم FSSW ۷۰٪ ضخامت ورق‌های استفاده شده می‌باشد. در سطح پایینی محل اتصال (Bottom Surface)، اثر فرو رفتگی ناشی از زائده تعبیه شده در زیر محل فرود ابزار قابل مشاهده است. قطر زائده تعبیه شده ۱۰mm و ارتفاع آن ۰/۴mm می‌باشد به همین دلیل اثر فرورفتگی ابعاد و عمق کمی دارد. وجود همین زائده کوچک در زیر محل فرود ابزار سبب افزایش فشار در هنگام فروروی و دوران ابزار شده و مود سیلان مواد و در نتیجه آن کیفیت و استحکام اتصال بهبود می‌یابد.



شکل ۵ سطح ظاهری نمونه جوشکاری شده توسط فرآیند PFSSW



اتصال دو ورق نیاز می‌باشد. به همین دلیل نمونه با زمان دوران ابزار ۱۸S از بیشترین میزان نفوذ و هم‌زدگی برخوردار بوده و استحکام بیشتری از دو نمونه دیگر را نشان می‌دهد. با توجه به منحنی‌های دو نمونه دیگر ممکن است کاهش ضخامت ناشی از چسبیدن مواد به سطح ابزار یا پلیسه‌برداری اولیه تا قبل از رسیدن به نرم‌شدگی کامل سطح بالایی ورق سبب افت استحکام در نمونه با زمان دوران ابزار ۱۲S شده باشد؛ در واقع مواد در ابتدا به سطح ابزار چسبیده و از سطح جدا می‌شوند و پس از رسیدن به دمای مناسب با ادامه دوران ابزار عمق بیشتری از نمونه نرم شده، مواد از ابزار جدا شده و هم‌زدگی در فصل مشترک اتصال نیز اتفاق خواهد افتاد. به بیان دیگر در نمونه با زمان دوران ابزار ۶S نرم‌شدگی و هم‌خوردگی چندان بالا نبوده و اتصال تنها به دلیل نفوذ در فصل مشترک دو ورق اتفاق افتاده است. در رابطه با افزایش طول نمونه تا زمان رسیدن به بار حداکثر و پس از آن مشاهده می‌شود، نمونه با زمان دوران ابزار ۱۸S افزایش طول بیشتری داشته است. در این نمونه ممکن است پس از شروع گلوپی‌شدن در ورق نیز افزایش طول، بسیار بیشتر از دو نمونه دیگر بوده است. میزان افزایش طول تا مرحله شروع گلوپی‌شدن در دو نمونه دیگر تقریباً یکسان بوده است.



نمودار ۱) منحنی نیرو- جابجایی نمونه‌های جوشکاری‌شده در سرعت دوران ۶۳۰rpm و زمان‌های دوران مختلف

در نمودار ۲ نیز مانند نمودار ۱، نمونه با زمان دوران ابزار ۱۸S بیشترین استحکام را نشان می‌دهد که ممکن است به دلیل بالابودن زمان دوران ابزار، افزایش میزان گرمای ورودی ناشی از اصطکاک ابزار و هم‌زدگی بیشتر نسبت به دو نمونه دیگر باشد و در نتیجه استحکام از دو نمونه دیگر حدود ۶۰۰N بیشتر می‌باشد. میزان افزایش طول نمونه تا مرحله رسیدن به استحکام نهایی در این حالت حدود ۱mm بیشتر از دو نمونه دیگر است. برای دو نمونه دیگر به دلیل اینکه سرعت دوران ابزار کمی از نمونه‌های نمودار ۱ بیشتر است ممکن است شرایط هم‌خوردگی و نفوذ تقریباً یکسان بوده و افزایش هم‌زدگی با افزایش زمان دوران ابزار و کاهش ضخامت محل جوش ناشی از اصطکاک و چسبیدن مواد به ابزار اثر یکدیگر را خنثی کرده و دو نمونه استحکام یکسانی از خود نشان داده‌اند. جالب توجه

این حالت در جوش مقاومتی نقطه‌ای به اندازه ناحیه ذوب، ضخامت ورقه و استحکام کششی مکان شکست بستگی دارد [14].

جدول ۲ نوع شکست رخ داده بعد از آزمون کشش برش در شرایط مختلف فرآیند را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود شکست در همه نمونه‌ها به صورت محیطی رخ داده است. محل پارگی در برخی نمونه‌ها از منطقه هم‌زده و در برخی از محیط جوش و از فلز پایه مشاهده شد. در نمونه‌هایی که پارگی از منطقه هم‌زده می‌باشد، علت شکست می‌تواند ناشی از نرم‌شدگی در این ناحیه باشد. در نمونه‌هایی که سرعت دوران ابزار بالاست، پارگی از منطقه فلز پایه و در محل فرود لبه ابزار رخ داده است. در این نمونه‌ها به دلیل بالابودن سرعت یا زمان دوران ابزار کاهش ضخامت در محل محیط دایره جوش اتفاق افتاده و همین امر سبب حساسیت این منطقه به شکست و پارگی شده است [15, 16].

جدول ۲) نوع شکست رخ داده شده بعد از آزمون کشش برش در شرایط مختلف

پارامتر جوشکاری (rpm)	۶s	۱۲s	۱۸s
۶۳۰	محیطی از منطقه هم‌زده: A	محیطی از منطقه هم‌زده: B	محیطی از منطقه هم‌زده: C
۸۰۰	محیطی از منطقه هم‌زده: D	محیطی از منطقه هم‌زده: E	محیطی از منطقه هم‌زده: F
۱۰۰۰	محیطی از منطقه هم‌زده: G	محیطی از منطقه هم‌زده: H	محیطی از منطقه هم‌زده: I
۱۲۵۰	محیطی از منطقه هم‌زده: J	محیطی از محل حفره زائده زیر ابزار: K	محیطی از منطقه هم‌زده: L
۱۶۰۰	محیطی از منطقه هم‌زده: M	محیطی از منطقه هم‌زده: N	محیطی از منطقه هم‌زده: O
۲۰۰۰	محیطی از منطقه هم‌زده: P	محیطی از منطقه هم‌زده: Q	محیطی از منطقه هم‌زده: R

### ۳-۲-۱- بررسی تأثیر زمان دوران ابزار بر استحکام کشش- برش نمونه‌ها

نتایج حاصل از آزمون کشش- برش به صورت نموداری ترسیم گردید. برای هر سرعت دوران ابزار سه زمان دوران در نظر گرفته شد و منحنی‌های حاصل از آزمون در این سه زمان دوران در یک نمودار ترسیم گردید. نمودار ۱ نتایج حاصل از آزمون کشش برش برای سه نمونه با سرعت دوران ابزار ۶۳۰rpm و زمان دوران ابزار ۶ تا ۱۸S را نشان می‌دهد.

از منحنی‌های نمودار ۱ مشاهده می‌شود نمونه با سرعت دوران ابزار ۶۳۰rpm و زمان دوران ابزار ۱۸S بیشترین استحکام را نشان می‌دهد. در دو نمونه دیگر نیز نمونه با زمان دوران ابزار ۶S استحکام بیشتری دارد. آن ممکن است به این دلیل باشد که زمانی که سرعت دوران ابزار کمترین مقدار تعیین شده در این پژوهش را داشته باشد، اصطکاک و نرخ کرنش حاصل از دوران ابزار بسیار کم می‌باشد و در نتیجه به زمان زیادی برای نفوذ و هم‌خوردگی در فصل مشترک

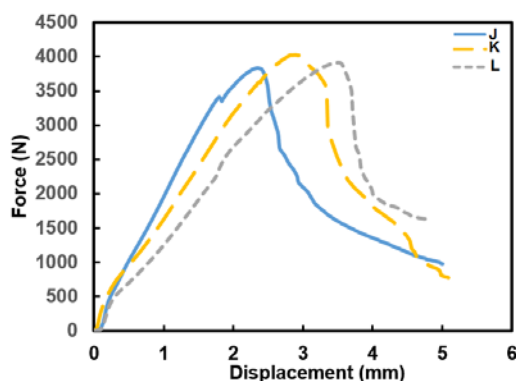
است که در نمونه با زمان دوران ابزار ۶S نیز پارگی از محیط دایره جوش اتفاق افتاده است.

است که افزایش طول نمونه‌ها نیز یکسان بوده و هر دو نمونه شرایط مکانیکی یکسانی داشته‌اند.



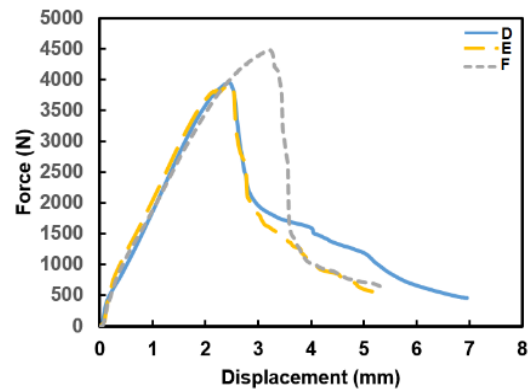
شکل ۷) تصویر میکروسکوپی از نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت ۱۰۰۰rpm و زمان‌های دوران ۱۲ و ۱۸S بعد از آزمون کشش برش

در نمودار ۴ نتایج حاصل از آزمون کشش- برش سه نمونه با سرعت دوران ابزار یکسان ۱۲۵۰rpm و زمان دوران ابزار ۶ تا ۱۸S نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در این سه نمونه، استحکام نهایی جوش تقریباً نزدیک به هم بوده است. آن ممکن است به این دلیل باشد که در سرعت دوران ابزار ۱۲۵۰rpm و در هر سه زمان دوران ابزار هم‌خوردگی و نفوذ به طور مناسب اتفاق افتاده است. در این سرعت دوران ابزار به دلیل دمای ناشی از اصطکاک ابزار روی سطح نمونه مواد در زیر ابزار نرم شده و همراه ابزار حرکت کرده و هم‌زده شده‌اند. هم‌زدگی آنچنان بالا بوده که حتی در سمت دیگر ورق نیز آثار مارپیچی شکل مشاهده شدند. از نمودار ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش زمان دوران ابزار میزان افزایش طول نمونه تا زمان رسیدن به استحکام حداکثر افزایش یافته است که نشان‌دهنده افزایش چقرمگی جوش با افزایش زمان دوران ابزار می‌باشد.



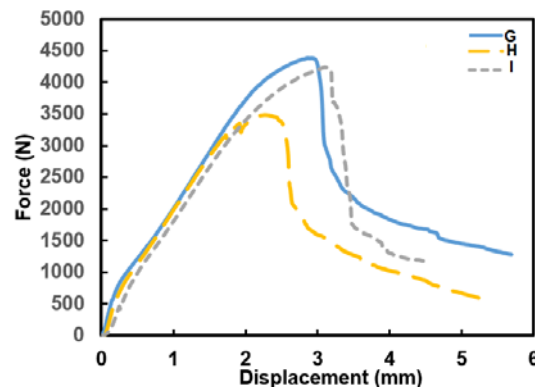
نمودار ۴) منحنی نیرو- جابجایی نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت دوران ۱۲۵۰rpm و زمان‌های دوران مختلف

نتایج حاصل از آزمون کشش- برش سه نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۶۰۰rpm و زمان دوران ابزار ۶ تا ۱۸S در نمودار ۵ نشان داده شده



نمودار ۲) منحنی نیرو- جابجایی نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت دوران ۸۰۰rpm و زمان‌های دوران مختلف

از نمودار ۳ مشاهده می‌شود که دو نمونه با زمان‌های دوران ابزار ۶ و ۱۸S استحکام کشش- برش نزدیک به هم دارند، ولی استحکام کشش- برش نمونه با زمان دوران ابزار ۱۲S بسیار کمتر از دو نمونه دیگر می‌باشد. لازم به ذکر است افزایش طول دو نمونه با زمان دوران ابزار ۶ و ۱۸S نیز تقریباً نزدیک به هم می‌باشد و اختلافی حدود ۰/۲mm تا مرحله پیک استحکام دارند. در نمونه با زمان دوران ابزار ۱۲S ممکن است شرایط اصطکاک و هم‌زدگی ابزار به گونه‌ای باشد که نرم‌شدگی در منطقه هم‌زده اتفاق افتاده است و این ناحیه از نمونه به عنوان نقطه ضعف اتصال عمل کرده و سبب افت شدید استحکام شده است. میزان افزایش طول در این نمونه نیز بسیار کمتر از دو نمونه دیگر بوده است.



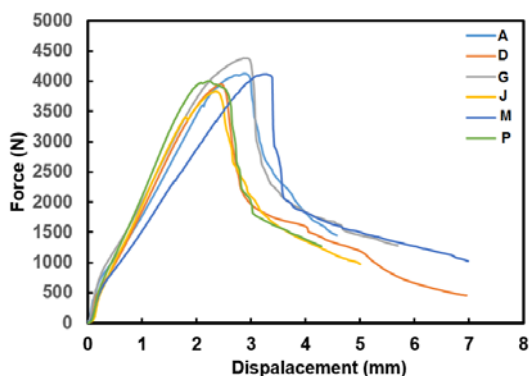
نمودار ۳) منحنی نیرو- جابجایی نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت دوران ۱۰۰۰rpm و زمان‌های دوران مختلف

تصویری از نمونه‌های جوشکاری شده با زمان دوران ابزار ۱۲ و ۱۸S پس از آزمون کشش- برش در شکل ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود پارگی در نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۰۰۰rpm و زمان دوران ابزار ۱۸S که استحکام بیشتری داشته از محیط دایره جوش و در نمونه با زمان دوران ابزار ۱۲S از محل منطقه هم‌زده و به فاصله حدود یک چهارم قطر ابزار از محیط جوش می‌باشد. در واقع در این نمونه عرض اتصال کمتر بوده و استحکام کمتر است. لازم به ذکر

## ۲-۲-۳- بررسی تأثیر سرعت دوران ابزار بر استحکام کشش- برش

## نمونه‌ها

نتایج حاصل از آزمون کشش- برش برای نمونه‌های با زمان دوران ابزار ثابت ۶s و سرعت دوران ۶۳۰ تا ۲۰۰۰rpm در نمودار ۷ نشان داده شده است. از نمودار ۷ قابل مشاهده است که بیشترین استحکام کشش- برش مربوط به نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۰۰۰rpm می‌باشد. کمترین استحکام نیز به نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۲۵۰rpm مربوط می‌باشد. با توجه به تفاوت در استحکام کشش- برش، اختلاف حداقل و حداکثر پیک نمودار برای نمونه‌ها تقریباً ۵۰۰N بوده و اختلاف چندان زیادی برای نمونه‌های مختلف وجود ندارد. به نظر می‌رسد که در نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۰۰۰rpm، هم‌خوردگی در منطقه هم‌زده به صورت مناسب رخ داده است و لذا اتصال کامل‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها ایجاد گشته است.



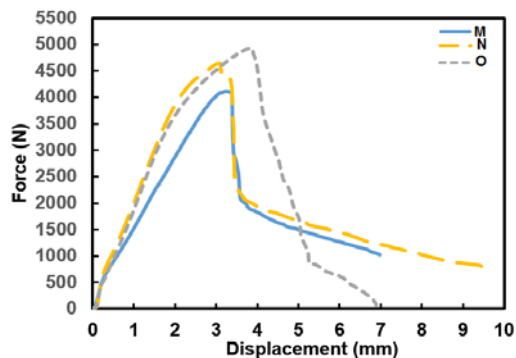
نمودار ۷) منحنی نیرو- جابجایی نمونه‌های جوشکاری‌شده در زمان ۶s و سرعت‌های دوران مختلف

از جدول ۲ مشاهده شد که شکست و پارگی در این نمونه از منطقه هم‌زده اتفاق افتاده است. این منطقه شکست علی‌رغم این که در جوش به عنوان یک نقص تلقی می‌شود، اما به دلیل نفوذ کامل و ایجاد اتصال کامل‌تر از سایر نمونه‌ها مشاهده می‌شود که در این نمونه بیشترین استحکام کششی حاصل شده است. تصویری از نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۰۰۰rpm و زمان دوران ابزار ۶s پس از آزمون کشش- برش در شکل ۸ نشان داده شده است. محل پارگی نمونه در این تصویر به خوبی قابل مشاهده است. از تصویر نمای کناری شکل ۸ نیز قابل مشاهده است که ورق‌ها در اثر کشش دستگاه ابتدا کمی چرخیده و به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که تمام نیرو به مقطع جوش نمونه وارد شده است. در این حالت تسلیم و در ادامه پاره‌شدن ورق در منطقه هم‌زده نمونه و درست در محل بالای منطقه قرارگیری لبه زائده اتفاق افتاده است. به علت فشار لبه زائده بر نمونه و تغییر جهت سیلان مواد در این ناحیه پارگی اتفاق افتاده است. نتایج حاصل از آزمون کشش- برش برای نمونه‌های با زمان دوران ابزار ۱۲s و سرعت دوران ۶۳۰ تا ۲۰۰۰rpm در نمودار ۸ نشان داده شده است.

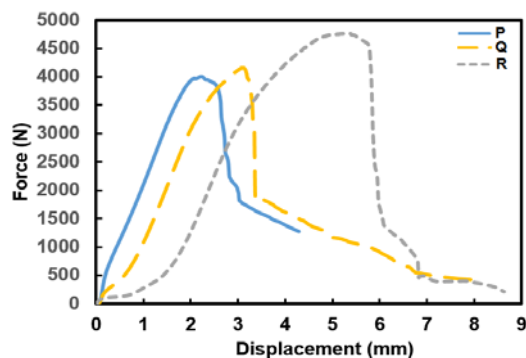
از منحنی‌های نمودار ۸ مشاهده می‌شود بیشترین استحکام مربوط

از منحنی‌های این سه نمونه مشاهده می‌شود با افزایش زمان دوران ابزار استحکام مرتباً افزایش یافته به گونه‌ای که نمونه با زمان دوران ابزار ۱۸s استحکام بسیار بیشتری (تقریباً ۱۰۰۰N) از نمونه با زمان دوران ابزار ۶s دارا است. میزان افزایش طول سه نمونه تا مرحله رسیدن به پیک منحنی تقریباً نزدیک به هم می‌باشد. اما نمونه با زمان دوران ابزار ۱۸s سطح زیر نمودار بزرگتر و در نتیجه چقرمگی شکست بیشتری دارد. با بالارفتن سرعت دوران ابزار، اصطکاک و هم‌زدگی و حرارت ناشی از آن به حدی بالاست که در نمونه نرم‌شدگی ناشی از حرارت و حتی ذوب جزئی اتفاق می‌افتد. در این حالت هرچه زمان دوران بیشتر باشد، هم‌خوردگی به عمق بیشتری از ورق انتقال پیدا کرده و فصل مشترک قوی‌تری حاصل خواهد شد [16].

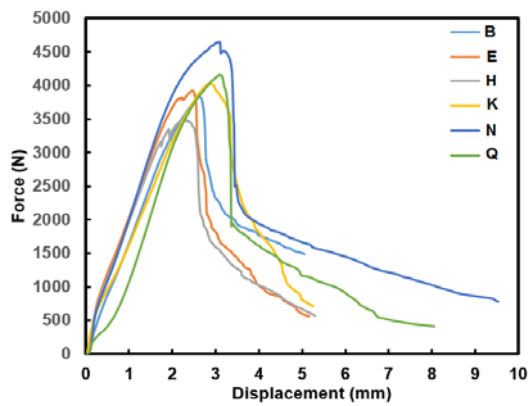
نتایج حاصل از آزمون کشش- برش سه نمونه با سرعت دوران ابزار ۲۰۰۰rpm زمان دوران ابزار ۶ تا ۱۸s در نمودار ۹ نشان داده شده است. در این سه نمونه نیز مانند نمونه‌های با سرعت دوران ابزار ۱۶۰۰rpm، با افزایش زمان دوران ابزار استحکام افزایش یافته است. تفاوت این نمودار با نمودار ۵ در میزان افزایش طول نمونه‌ها می‌باشد به گونه‌ای که در نمونه‌های با سرعت دوران ابزار ۲۰۰۰rpm، میزان تغییرات طول با افزایش زمان دوران ابزار بسیار زیاد می‌باشد. در نمونه با زمان دوران ابزار ۱۸s، افزایش طول نمونه بسیار زیاد بوده و سطح زیر نمودار نیرو بر حسب افزایش طول نیز بسیار زیاد می‌باشد که نشان‌دهنده چقرمگی و انرژی شکست بسیار بالای این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد.



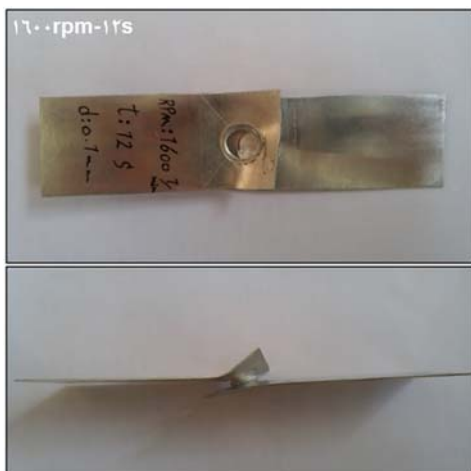
نمودار ۹) منحنی نیرو- جابجایی نمونه‌های جوشکاری‌شده در سرعت دوران ۱۶۰۰rpm و زمان‌های دوران مختلف



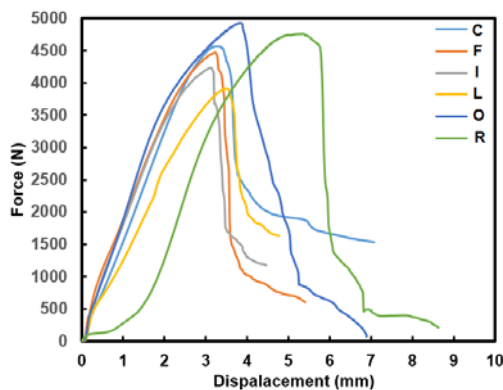
نمودار ۱۰) منحنی نیرو- جابجایی نمونه‌های جوشکاری‌شده در سرعت دوران ۲۰۰۰rpm و زمان‌های دوران مختلف



نمودار ۸) منحنی نیرو- جابجایی نمونه‌های جوشکاری شده در زمان دوران ۱۲s و سرعت‌های دوران مختلف



شکل ۹) تصویر ماکروسکوپی از نمونه جوشکاری شده در سرعت دوران ۱۶۰۰rpm و زمان دوران ۱۲s بعد از آزمون کشش برش



نمودار ۹) منحنی نیرو- جابجایی نمونه‌های جوشکاری شده در زمان دوران ۱۸s و سرعت‌های دوران مختلف

همان‌طور که از نمودار ۹ مشاهده می‌شود بیشترین میزان استحکام مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت دوران ابزار ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰rpm و کمترین آن مربوط به نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۲۵۰rpm است. در نمونه با سرعت دوران ابزار ۲۰۰۰rpm، میزان افزایش طول تا مرحله رسیدن به استحکام حداکثری و پس از آن بسیار بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد. همین میزان افزایش طول سبب جذب انرژی بسیار بیشتر این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها خواهد شد. در نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۲۵۰rpm به نظر می‌رسد

به نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۶۰۰rpm و کمترین استحکام مربوط به نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۰۰۰rpm می‌باشد. جالب توجه است که در نمودار ۷ بیشترین استحکام کشش- برش مربوط به نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۰۰۰rpm می‌باشد، اما در نمودار ۸ کمترین استحکام مربوط به نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۰۰۰rpm می‌باشد. از تصاویر شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده شد که پارگی در نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۰۰۰rpm و با زمان دوران ابزار ۶s از منطقه هم‌زده و از بالای محل لبه زائده اتفاق افتاده است و در نمونه با همین سرعت دوران ابزار و با زمان دوران ابزار ۱۲s محل پارگی در منطقه هم‌زده و در نزدیک محل مرکز ابزار می‌باشد. به نظر می‌رسد که در این نمونه در اثر کشش ورق و در هنگام تغییر جهت محل اتصال ورق‌ها در امتداد جهت نیروی کششی اتصال دو ورق از هم تا منطقه کوچکی در مرکز دایره جوش جدا شده و با کاهش سطح مقطع، اتصال تنش کششی زیادی به بخش کوچکی وارد شده و پارگی اتفاق افتاده است. همین امر سبب افت استحکام این نمونه شده است. در واقع در این زمان دوران ابزار، نفوذ و هم‌خوردگی و در نتیجه آن اتصال در مقطع کوچکی از نمونه اتفاق افتاده است. در نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۶۰۰rpm و زمان دوران ابزار ۱۲s که بیشترین استحکام و همین‌طور بیشترین میزان افزایش طول تا نقطه پیک استحکام را داشته است، محل پارگی و شکست نمونه محیط دایره جوش می‌باشد. همان‌طور که از تصویر این نمونه پس از آزمون کشش- برش مشاهده می‌شود (شکل ۹)، نمونه در ابتدا در امتداد جهت نیروی کششی تغییر جهت داده و به دلیل اینکه کل سطح جوش و اتصال استحکام مناسبی داشته، تسلیم و پارگی از محیط دایره جوش که به دلیل براده‌برداری و نفوذ ابزار ضخامت کمتری دارد اتفاق افتاده است. در این نمونه به دلیل اتصال مناسب دو ورق تغییر طول تا مرحله گلوئی شدن ورق از سایر نمونه‌ها بیشتر بوده است. در منحنی‌های بعضی از نمونه‌ها مشاهده می‌شود در محدوده پیک نمودار دنده‌دار و اراه‌شدن اتفاق افتاده است. آن ممکن است به این دلیل باشد که در این نمونه‌ها ابتدا اتصال بخشی از جوش نمونه جدا شده و نیرو به یک‌باره افت می‌کند، سپس با ادامه آزمون، نیرو کمی افزایش یافته و شکست نهایی رخ می‌دهد. نتایج حاصل از آزمون کشش- برش نمونه‌های با زمان دوران ابزار ۱۸s و سرعت دوران ۶۳۰ تا ۲۰۰۰rpm در نمودار ۹ نشان داده شده است.



شکل ۸) تصویر ماکروسکوپی از نمونه جوشکاری شده در سرعت دوران ۱۰۰۰rpm و زمان دوران ۶s بعد از آزمون کشش برش



همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین استحکام کشش- برش مربوط به نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۶۰۰rpm و زمان دوران ابزار ۱۸S و کمترین میزان آن مربوط به نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۰۰۰rpm و زمان دوران ابزار ۱۲S می‌باشد. به‌طور کلی بیشترین استحکام در هر سرعت دوران ابزار ثابت مربوط به نمونه با زمان دوران ابزار ۱۸S و در هر زمان دوران ابزار ثابت مربوط به نمونه با سرعت دوران ابزار بالا می‌باشد. در جدول ۳ نیز مشاهده می‌شود که بیشترین میزان افزایش طول نمونه مربوط به سرعت دوران ابزار ۲۰۰۰rpm و زمان دوران ابزار ۱۸S و کمترین آن مربوط به نمونه با سرعت دوران ابزار ۲۰۰۰rpm و زمان دوران ابزار ۶S می‌باشد. طبق این گزارش مشاهده می‌شود که افزایش سرعت دوران ابزار و زمان دوران ابزار سبب افزایش میزان افزایش طول می‌شود. شایان ذکر است نمونه‌های با زمان دوران ابزار ۱۸S بیشترین میزان افزایش طول را در هر سرعت دوران ابزار نشان داده‌اند.

مقدار انرژی وارده به جوش تا لحظه شکست جوش، انرژی شکست نامیده می‌شود. انرژی شکست در واقع همان چقرمگی است. سطح زیر منحنی نیرو- جابجایی یا تنش- کرنش تا نقطه حداکثر نیرو بیانگر انرژی شکست جوش‌های نقطه‌ای می‌باشد. این نوع انرژی برای همه جوش‌ها به روش محاسبه عددی از منحنی‌های نیرو- جابجایی محاسبه شد که در جدول ۳ گزارش شده است.

همان‌طور که از جدول ۳ مشاهده می‌شود بیشترین انرژی شکست مربوط به نمونه با سرعت دوران ابزار ۲۰۰۰rpm و زمان دوران ابزار ۱۸S و کمترین آن مربوط به نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۰۰۰rpm و زمان دوران ابزار ۱۲S می‌باشد. در نمونه با سرعت دوران ابزار ۱۰۰۰rpm و زمان دوران ابزار ۱۲S طبق نمودارهای ۳ و ۸ نیز مشاهده گردید که استحکام نهایی کشش- برش و افزایش طول حین انجام تست از سایر نمونه‌ها با در نظر گرفتن یک پارامتر یکسان بسیار کمتر بوده است. با توجه به این که انرژی شکست در واقع سطح زیر نمودار نیرو بر حسب افزایش طول می‌باشد، میزان انرژی شکست کم این نمونه قابل توجه است. در نمونه با سرعت دوران ابزار ۲۰۰۰rpm و زمان دوران ابزار ۱۸S طبق نمودارهای ۶ و ۹ مشاهده شد که استحکام نهایی کشش- برش و افزایش طول نمونه تا زمان رسیدن به پیک استحکام بسیار بیشتر از سایر نمونه‌ها است. بنابراین انرژی شکست بسیار زیاد این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها منطقی و قابل توجیه علمی می‌باشد. مشاهده می‌شود که به‌طور کلی با افزایش زمان دوران ابزار در هر سرعت دوران ابزار ثابت، انرژی شکست افزایش یافته است. البته در دو نمونه این روند اتفاق نیافتاده که احتمال دارد به دلیل خطای تست اتفاق افتاده باشد. در واقع با افزایش زمان دوران ابزار مدت زمان نگهداری در دمای بالا ناشی از دوران ابزار و هم‌خوردگی بیشتری اتفاق می‌افتد، لذا اتصال جوش کامل‌تر بوده و منطقه اتصال نیز بزرگتر می‌باشد. در نتیجه آن میزان افزایش طول نمونه تا زمان رسیدن به حداکثر استحکام و همچنین میزان حداکثر استحکام (به‌طور کلی) افزایش خواهد یافت و افزایش میزان انرژی شکست نیز نتیجه این پدیده می‌باشد.

که شرایط به گونه‌ای بوده است که در اثر دوران ابزار و براده‌برداری آن و تجمع مواد در محیط دکمه جوش به دلیل نرم‌شدگی و چسبیدن به ابزار، ضخامت ورق بالایی در محل اتصال کم شده و تنش افزایش پیدا کرده است، لذا افت استحکام زیادی حاصل شده است. بر خلاف آن، در نمونه‌های با سرعت دوران ابزار ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰rpm، به نظر می‌رسد اتصال جوش در حدی کامل و بی‌نقص بوده که در دو نمونه پارگی از دایره جوش اتفاق افتاده و دو ورق کاملاً از یکدیگر جدا شده‌اند. همان‌طور که از تصاویر پس از شکست این دو نمونه در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در هر دو نمونه بخش دکمه جوش ورق بالایی جدا شده و روی ورق پایین باقی مانده است (اتصال جوش حفظ شده است). حداکثر میزان استحکام کشش- برش و افزایش طول نمونه در نقطه پیک منحنی در نمودار نیرو بر حسب افزایش طول و انرژی شکست در جدول ۳ گزارش شده است.



شکل ۱۰) تصویر ماکروسکوپی از نمونه‌های جوشکاری شده در زمان دوران ۱۸S و سرعت‌های دوران ۱۶۰۰rpm و ۲۰۰۰rpm

جدول ۳) مقادیر تنش پیک، تغییرات طول و انرژی شکست بعد از آزمون کشش برش نمونه‌های جوشکاری شده در شرایط مختلف

پارامتر جوشکاری	تنش پیک (kN)	تغییرات طول (mm)	انرژی شکست (J)
6 s- 1600 rpm	4/1	2/9	4/8
12 s- 1600 rpm	3/8	2/6	3/5
18 s- 1600 rpm	4/5	3/2	6/6
6 s- 1800 rpm	4	2/4	4/2
12 s- 1800 rpm	3/9	2/5	3/9
18 s- 1800 rpm	4/5	3/2	5/2
6 s- 1000 rpm	4/4	2/9	4/9
12 s- 1000 rpm	3/5	2/4	3/1
18 s- 1000 rpm	4/2	3/6	5/3
6 s- 1200 rpm	3/8	3/3	3/8
12 s- 1200 rpm	4	2/9	5
18 s- 1200 rpm	3/9	3/4	6
6 s- 1600 rpm	4/1	3/3	5/2
12 s- 1600 rpm	4/5	3/2	5/6
18 s- 1600 rpm	4/9	3/8	7
6 s- 2000 rpm	3/9	2/3	3/9
12 s- 2000 rpm	4/2	3/1	6/3
18 s- 2000 rpm	4/7	5	12/3

## ۴- نتیجه‌گیری

ارزیابی مکانیکی جوشکاری هم‌زن اصطکاکی زائده‌ای نقطه‌ای، نشان داد این روش به منظور جوشکاری ورق‌های آلومینیوم ۵۰۵۳ مناسب بوده و ضمن دارا بودن خواص مکانیکی مطلوب از کیفیت ظاهری بالایی نیز برخوردار است.

شکست در همه نمونه‌ها محیطی بوده و به‌طور کلی با افزایش سرعت و زمان دوران ابزار محل شکست از منطقه جوش به فلز پایه انتقال یافته است. نتایج حاصل از آزمون کشش-برش نشان داد که با افزایش زمان دوران ابزار و همچنین با افزایش سرعت دوران ابزار استحکام کششی نمونه‌ها افزایش یافته است. بیشترین استحکام کشش-برش مربوط به نمونه جوشکاری شده در ۱۶۰۰rpm و ۱۸s و ۴/۹kN) و کمترین برای نمونه ۱۰۰۰rpm و ۱۲s و ۳/۵kN) به‌دست آمده شد.

نتایج مکانیکی نشان دادند که تغییر زمان دوران ابزار بر استحکام کشش برش اثر بیشتری نسبت به سرعت دوران ابزار دارد و با افزایش سرعت و زمان دوران ابزار میزان افزایش طول نمونه‌ها تا زمان رسیدن به حداکثر نیرو (پیک نمودار) افزایش یافته است. در این مورد نمونه با سرعت دوران ابزار ۲۰۰۰rpm و زمان دوران ابزار ۱۸s، افزایش طول بسیار بیشتری از سایر نمونه‌ها داشته است (۵mm).

بیشترین انرژی شکست مربوط به نمونه جوشکاری شده در ۲۰۰۰rpm و ۱۸s (۱۲/۳) و کمترین آن مربوط به نمونه جوشکاری شده در ۱۰۰۰rpm و ۱۲s (۳/۱) می‌باشد. در واقع با افزایش سرعت و زمان دوران، به دلیل دمای بالا ناشی از دوران ابزار و هم‌خوردگی بیشتر منطقه جوش، اتصال جوش کامل‌تر و منطقه اتصال نیز بزرگتر می‌باشد. در نتیجه، میزان افزایش طول نمونه تا زمان رسیدن به حداکثر استحکام و همچنین میزان حداکثر استحکام (به‌طور کلی) افزایش خواهد یافت.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**تعارض منافع:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**سهم نویسندگان:** حسین محمدنیا (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۶۰٪)؛ سیدمصطفی موسوی‌زاده (نویسنده دوم)، روش‌شناس (۲۰٪)؛ حمیدرضا عزت‌پور (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/نگارنده بحث (۲۰٪)

**منابع مالی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

## منابع

- friction stir spot welding. *Marine Structures*. 2019;65:197-214.
- 3- Feng Z, Santella ML, David SA, Steel RJ, Packer SM, Pan T, et al. Friction stir spot welding of advanced high-strength steels-a feasibility study. *SAE Transactions*. 2005;114:592-598.
- 4- Pouranvari M, Marashi SPH, Mousavizadeh SM. Dissimilar resistance spot welding of DP600 dual phase and AISI 1008 low carbon steels: Correlation between weld microstructure and mechanical properties. *Ironmaking & Steelmaking*. 2011;38(6):471-480.
- 5- Baek SW, Choi DH, Lee CY, Ahn BW, Yeon YM, Song K, et al. Structure-properties relations in friction stir spot welded low carbon steel sheets for light weight automobile body. *Materials Transactions*. 2010;51(2):399-403.
- 6- Tavasolizadeh A, Marashi SP, Pouranvari M. Mechanical performance of three thickness resistance spot welded low carbon steel. *Materials Science and Technology*. 2011;27(1):219-224.
- 7- Wang DA, Lee SC. Microstructures and failure mechanisms of friction stir spot welds of aluminum 6061-T6 sheets. *Materials Processing and Technology*. 2007;186(1-3):291-297.
- 8- Pouranvari M, Marashi SPH. Critical review of automotive steels spot welding: Process, structure and properties. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2013;18(5):361-403.
- 9- Choi DH, Lee CY, Ahn BW, Choi JH, Yeon YM, Song K, et al. Frictional wear evaluation of WC-Co alloy tool in friction stir spot welding of low carbon steel plates. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2009;27(6):931-936.
- 10- Sun YF, Fujii H, Takaki N, Okitsu Y. Microstructure and mechanical properties of mild steel joints prepared by a flat friction stir spot welding technique. *Materials & Design*. 2012;37:384-392.
- 11- Uematsu Y, Tokaji K, Tozaki Y, Kurita T, Murata S. Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behaviour of friction stir spot welded joints in Al-Mg-Si alloy. *International Journal of Fatigue*. 2008;30(10-11):1956-1966.
- 12- Khodabakhshi F, Kazeminezhad M, Kokabi AH. Mechanical properties and microstructure of resistance spot welded severely deformed low carbon steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;529:237-245.
- 13- Pouranvari M, Marashi SPH. On the failure of low carbon steel resistance spot welds in quasi-static tensile-shear loading. *Materials & Design*. 2010;31(8):3647-3652.
- 14- Dourandish S, Mousavizade SM, Ezatpour HR, Ebrahimi GR. Microstructure, mechanical properties and failure behaviour of protrusion friction stir spot welded 2024 aluminium alloy sheets. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2018;23(4):295-307.
- 15- Zarghani F, Mousavizade SM, Ezatpour HR, Ebrahimi GR. High mechanical performance of similar Al joints produced by a novel spot friction welding technique. *Vacuum*. 2018;147:172-186.
- 16- Farmanbar N, Mousavizade SM, Ezatpour HR. Protrusion friction stir spot welding: A simple novel method to produce dissimilar joints of galvanized steel/aluminum sheets with high mechanical performance. *Materials Research Express*. 2018;6(2):026575.

1- Shahrabadi AR, Mousavizade SM, Ezatpour HR, Pouranvari M. Achieving high mechanical performance in protrusion friction stir spot welding (PFSSW) of DQSK steel compared to other techniques. *Materials Research Express*. 2018;5(10):106519.

2- Farmanbar N, Mousavizade SM, Ezatpour HR. Achieving special mechanical properties with considering dwell time of AA5052 sheets welded by a simple novel