

بررسی رفتار خستگی اتصال جوش نقطه‌ای مقاومتی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 تحت بارگذاری کششی-برشی

داود افشاری*
فروغ سردارزاده
نیلوفر نورافشان

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
کارشناس، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

چکیده

در این مطالعه سعی شده است با استفاده از آزمون‌های تجربی به بررسی استحکام استاتیکی و خستگی اتصال جوش نقطه‌ای آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 و رابطه آن با ابعاد دگمه جوش پرداخته شود. بدین منظور تعداد زیادی نمونه با شرایط مختلف توسط فرآیند جوش مقاومتی نقطه‌ای ایجاد شده است. برای هر دسته از نمونه‌ها ابعاد دگمه جوش، استحکام نمونه تحت بار استاتیکی در آزمون کششی-برشی و همچنین استحکام خستگی اندازه‌گیری شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزایش قطر دگمه جوش تاثیر مستقیمی بر استحکام اتصال تحت بار استاتیکی دارد و منجر به افزایش آن می‌شود. اما در خصوص استحکام خستگی، هر چند با افزایش قطر دگمه جوش ابتدا استحکام خستگی افزایش پیدا کرده؛ در ادامه بطور محسوسی عمر خستگی اتصال کاهش پیدا می‌کند. بررسی سطح مقطع نمونه‌ها نشان می‌دهد که افزایش قطر دگمه جوش از یک حد معین منجر به تشکیل ترک‌های گرم در ناحیه HAZ شده است. اگرچه این ترک‌ها تاثیری بر استحکام استاتیکی اتصال جوش نقطه‌ای ندارد؛ منجر به کاهش استحکام خستگی اتصال می‌گردد. **واژه‌های کلیدی:** جوش مقاومتی نقطه‌ای، استحکام خستگی، استحکام استاتیکی، دگمه جوش، آزمون کششی-برشی.

Investigation on Fatigue Strength of Aluminum Alloy 6061-T6 Resistance Spot Welded Going under Tensile-Shear test

D. Afshari Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran
F. Sardarzadeh Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran
N. Noorafshan Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Abstract

Resistance spot welding (RSW) is one of the most popular welding methods in joining sheet metals of cars, and etc. In RSW process, a high electric current is passed through two sheets via electrodes, which results in the generation of a melting zone between the sheets, called nugget. The main purpose of this study is experimental investigation on static and fatigue strength of aluminum alloy 6061-T6 with 2 mm thickness. To achieve this goal, many samples were prepared and welded by different RSW's parameters. The mechanical strength of welded samples was examined under tensile-shear test. The results show that, by increasing the nugget size, the static strength is improved. In addition, however at first, the fatigue strength is increased by improving the nugget size; it's decreased significantly after a certain nugget diameter. The micro-structural study indicates the formation of cracks in the HAZ after the certain nugget diameter. However, these liquation cracks have no effect on the static strength of spot welded samples; they cause dramatically changes in the fatigue strength of samples.

Keywords: Resistance Spot Weld, Fatigue Strength, Static Strength, Nugget size, Tensile-Shear Test.

۱- مقدمه

بطور متوسط در بدنه یک خودرو سواری خانوادگی بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ جوش نقطه‌ای استفاده می‌شود [۱]. کیفیت این جوش‌ها بطور مستقیم تاثیر زیادی بر کیفیت و عمر بدنه خودرو دارد و در کاهش یا افزایش صدا در اتاق خودرو بسیار تاثیر گذار هستند. لذا کنترل فرآیند جوش نقطه‌ای جهت دستیابی به محصول با کیفیت مطلوب در صنایع مختلف دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشد. بطور کلی، تحمل نیروی استاتیکی توسط اتصال جوش نقطه‌ای رابطه مستقیمی با ابعاد دگمه جوش دارد و افزایش قطر دگمه جوش منجر به تحمل نیروی بیشتر در اتصال می‌گردد. بنابراین در استانداردهای مختلف برای ورق‌های با ضخامت مختلف، کمینه قطر دگمه جوش برای اطمینان از حصول یک اتصال با کیفیت مطلوب توصیه شده است. هرچند، در زمینه بیشینه قطر

جوش مقاومتی نقطه‌ای یکی از پرکاربردترین روشهای اتصال ورق‌ها می‌باشد. سرعت تولید بالا، سهولت انجام کار، قابلیت اتوماسیون، عدم نیاز به پرکننده، تمرکز بالای حرارت و قابلیت اتصال مواد فلزی مختلف از مهمترین خصوصیات جوش مقاومتی نقطه‌ای می‌باشند. نمونه‌هایی از کاربرد این فرآیند جوشکاری را می‌توان در صنایع کشتی‌سازی، خودروسازی، قطارها، هواپیماها و سازه‌های فضایی مشاهده کرد. در این فرآیند عبور جریان الکتریکی از طریق الکترودها باعث مقاومت الکتریکی در ناحیه اتصال دو ورق منجر به افزایش دما در این ناحیه و تشکیل دگمه جوش می‌گردد. ایجاد دگمه جوش و همزمان با آن اعمال فشار توسط الکترودها منجر به اتصال دو ورق در دگمه جوش می‌گردد.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: dafshari@znu.ac.ir

دگمه جوش مطالب چندانی وجود ندارد و تنها به عدم پاشش مذاب در حین فرآیند جوش نقطه‌ای توصیه شده است.

در کنار ظرفیت تحمل نیرو استاتیکی توسط اتصال جوش نقطه‌ای، استحکام خستگی اتصال جوش، یکی دیگر از مولفه‌های بسیار مهم در تعیین کیفیت اتصال می باشد. همانند یک خودرو سواری بسیاری از سازه‌های جوشکاری شده توسط فرآیند جوش نقطه‌ای در معرض بارهای دینامیکی باشند. لذا استحکام خستگی اتصال یکی از پارامترهای اولیه ضروری است که در طراحی سازه‌های دینامیکی از منظر ایمنی و قابلیت اعتماد باید مد نظر قرار گیرد و شناسایی و فهم عوامل موثر در استحکام خستگی اتصالات جوش مقاومتی بسیار مهم می باشد. از این رو مطالعه استحکام خستگی اتصال جوش نقطه‌ای تا کنون مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است.

لانگاو همکارانش [۲] در سال ۲۰۰۷ به بررسی تاثیر تنش‌های پسماند و خستگی بر روی تغییر شکل‌های میکروسکوپی در جوش نقطه‌ای ورق فولادی پرداخته‌اند. کانگ و همکارانش [۳] با استفاده از روش‌تنش‌های ساختاری وابسته به مش^۱ با استفاده از یک مدل المان محدود پدیده خستگی را در جوش نقطه‌ای ورق‌های فولادی با استحکام بالا مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که می‌توان از این روش برای ترسیم منحنی استحکام-عمر استفاده کرد. ارتاش و سونمز [۴] در سال ۲۰۰۸ اثر پارامترهای جوش نقطه‌ای بر روی استحکام خستگی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. وانگ و شانگ [۵] با استفاده از روش المان محدود عمر خستگی اتصال جوش نقطه‌ای را بر اساس توزیع سختی در ناحیه اتصال مورد پیش‌بینی قرار داده‌اند. همچنین این نویسندگان [۶] در یک مطالعه دیگر اینبار عمر خستگی را در بارگذاری‌های تصادفی با استفاده از تغییرات فرکانس طبیعی مورد پیش‌بینی قرار داده‌اند. شریعتی و مغربی [۷] در سال ۲۰۱۰ استحکام خستگی در جوش نقطه‌ای یک ورق فولادی را بوسیله آزمون کششی-برشی^۲ اندازه‌گیری کرده‌اند. میر صالحی و کوکبی [۸] نیز با در نظر گرفتن اثر تنش‌های پسماند با استفاده از روش گسترش ترک عمر خستگی در جوش نقطه‌ای را شبیه‌سازی نموده‌اند.

از بین فلزات متداولی که در صنایع خودرو سازی و هوایی به کار می‌روند وزن به عنوان یک مشخصه اساسی، برای انتخاب جنس و آلیاژ همواره مورد توجه قرار می‌گیرد. در صنایع هوا - فضا و خودرو سازی دستیابی به سازه‌های با وزن سبک و استحکام بالا یک اصل اساسی می‌باشد. آلیاژهای متفاوت آلومینیم از جمله فلزاتی هستند که به دلیل خواص منحصر به فرد، از سالیان دور در سازه‌های هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هم‌اکنون نیز این آلیاژها یکی از اصلی‌ترین مواد مورد استفاده در سازه‌های هوایی و فضایی می‌باشند. در صنایع خودروسازی نیز تمایل استفاده از آلیاژهای آلومینیم در خودروهای مختلف هر روز در حال افزایش می‌باشد. اگرچه جوش نقطه‌ای آلیاژهای آلومینیم، به علت خواص حرارتی ویژه آن، مشکل‌تر از فولاد می‌باشد؛ اما این فرآیند همچنان پرکاربردترین روش اتصال ورق‌های آلومینیومی در صنایع مختلف می‌باشد.

همانطور که اشاره شد مطالعات بسیاری تاکنون در زمینه استحکام خستگی آلیاژهای مختلف فولادی صورت گرفته است؛ اما متأسفانه مطالعه این پدیده در اتصال جوش نقطه‌ای آلیاژهای آلومینیومی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هرچند این توجه در سالهای اخیر با افزایش تمایل استفاده از این آلیاژها در صنایع خودرو سازی رو به افزایش نهاده است. بعنوان مثال حسنی فرد و همکارانش [۹] در سال ۲۰۱۰ اثر تنش‌های پسماند بر روی استحکام خستگی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ را با استفاده از روش المان محدود مورد مطالعه قرار داده‌اند. همچنین در سال ۲۰۱۲ فضل‌الله خان و همکارانش [۱۰] با استفاده از روش پاسخ سطح استحکام مکانیکی اتصال جوش نقطه‌ای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ را تحت بار کششی-برشی پیش‌بینی نموده‌اند.

مرور مطالعات صورت گرفته در زمینه استحکام اتصال جوش نقطه‌ای نشان می‌دهد که هر دو مولفه استحکام استاتیکی و خستگی اتصال در کیفیت سازه جوش کاری شده بسیار تاثیر گذار می‌باشند. در این مطالعه نیز سعی شده است بررسی این دو مولفه در آزمون کششی - برشی برای اتصال جوش نقطه‌ای آلومینیوم 6061-T6 مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین تلاش شده است رابطه مابین قطر دگمه جوش و استحکام استاتیکی و خستگی مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور مجموعه‌ای از نمونه‌های جوشکاری شده توسط فرآیند جوش نقطه‌ای مقاومتی آماده شده و با استفاده از آزمون‌های تجربی مختلف به بررسی این پدیده‌ها پرداخته شده است. همچنین برای درک بهتر رفتار خستگی نمونه‌ها، سطح مقطع هر نمونه مورد بررسی قرار گرفته است.

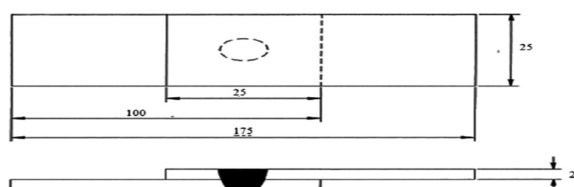
۲- آزمون‌های تجربی

در این مطالعه برای بررسی استحکام اتصال جوش نقطه‌ای از ورق آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 با ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده ارائه شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6

عنصر شیمیایی	Al	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Cr
درصد وزنی	بالای ۹۷	۰/۶	۱/۰	۰/۱	۰/۵	۰/۲	۰/۱

برای جوشکاری نمونه‌ها ابتدا محل جوش در هر نمونه بوسیله سنباده زنی آماده شده و سپس فرآیند جوشکاری با استفاده از ماشین NIMAK مدل DGS PMP11 با توان نامی 200 kva توسط الکترودهای مسی انجام شده است. ابعاد نمونه‌های آماده شده در شکل ۱ نمایش داده شده است.

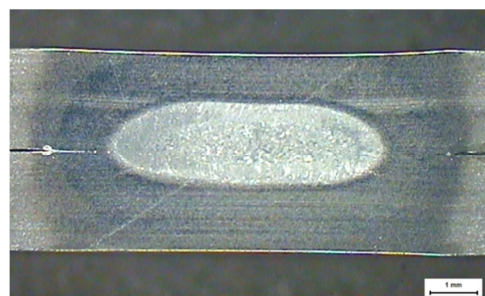


شکل ۱- ابعاد نمونه‌های جوشکاری شده (ابعاد به میلی‌متر می‌باشند)

با توجه به لزوم بررسی رابطه استحکام مکانیکی اتصال با قطر دگمه جوش، نمونه‌های جوشکاری شده با قطرهای مختلف دگمه جوش در

1 Mesh-intensive structural stress approach
2 Tensile-Shear test

این مطالعه مورد نیاز بود. بدین منظور ابتدا با امتحان پارامترهای مختلف جوشکاری ابعاد دگمه جوش در نمونه های مختلف اندازه گیری شده اند. اندازه گیری قطر دگمه جوش با استفاده از یک میکروسکپ نوری متصل به یک سیستم کامپیوتری انجام شده است. بدین منظور هر نمونه بعد از انجام فرآیند جوش نقطه ای از محل اتصال بریده شده و پس از آماده سازی قطر دگمه جوش اندازه گیری شده است. شکل ۲ دگمه جوش یک نمونه جوشکاری شده را نمایش می دهد.



شکل ۲- دگمه جوش در ناحیه اتصال دو ورق

با مشخص شدن قطر دگمه جوش نمونه ها، با استفاده از ماشین آزمون کششی (شکل ۳) هر نمونه تحت بارگذاری استاتیکی کششی-برشی با سرعت ثابت ۱ mm/min قرار گرفته و استحکام استاتیکی هر نمونه مورد اندازه گیری قرار گرفت. همچنین در این مطالعه اندازه گیری استحکام خستگی هر نمونه نیز تحت بارگذاری کششی-برشی صورت گرفته است. برای این منظور از بارهای ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ نیوتنی با بسامد ۱۰ Hz و نسبت ثابت بارگذاری صفر (R=0) استفاده شده است.



شکل ۳- آزمون کششی - برشی نمونه های آماده شده

در این مطالعه برای درک بهتر از رفتار خستگی نمونه های جوشکاری شده؛ سطح مقطع هر نمونه با استفاده از یک میکروسکپ نوری مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور پس از جوشکاری و اتصال هر نمونه، برشی در ناحیه اتصال ایجاد شده و با استفاده از مانت گرم، نمونه ها برای مطالعه در زیر میکروسکپ آماده شده اند. نمونه های مانت شده در طی چندین مرحله پولیش شده و سپس با استفاده از یک

محلول شیمیایی (10ml HF، 60ml HNO₃ و 70ml H₂O) اچ شده اند. مرحله پایانی آماده سازی نمونه ها شستشو و خشک کردن پیش از مطالعه ریز ساختار با استفاده از میکروسکپی می باشد.

۳- نتایج

جهت بررسی رابطه استحکام استاتیکی و خستگی اتصال با قطر دگمه جوش، نیاز به جوشکاری نمونه ها با پارامترهای مختلف جوشکاری جهت دستیابی به قطرهای متفاوت دگمه جوش می باشد. بدین منظور لازم است که کمینه و بیشینه قطر دگمه جوش برای ورق با ضخامت ۲ میلی متر تعیین شود. در این مطالعه انتخاب کمینه قطر دگمه جوش بر اساس توصیه استاندارد AWS [۱۱] برای ورق های با ضخامت ۲ میلی متری، ۵/۷ میلی متر در نظر گرفته شده است. همچنین انتخاب بیشینه قطر دگمه جوش نیز با توجه به اجتناب از پاشش مذاب در فرآیند جوشکاری، ۸/۵ میلی متر تعیین شده است [۱۲].

با توجه به محدوده قابل قبول قطر دگمه جوش، پارامترهای مختلف جوش نقطه ای جهت دستیابی به قطرهای دگمه جوش در نظر گرفته شده مورد بررسی قرار گرفت. هر نمونه جوشکاری شده بعد از انجام فرآیند جوش از محل اتصال بریده شده و قطر دگمه جوش اندازه گیری شده است و بر مبنای این اطلاعات پارامترهای جوش نقطه ای جهت دستیابی به قطر دگمه جوش مورد نظر تصحیح شده است. در پایان ۷ سری نمونه جوشکاری شده با پارامترهای مختلف جوش نقطه ای برای بررسی در این مطالعه انتخاب شده اند. جدول ۲ پارامترهای جوش اعمال شده برای هر سری از نمونه ها همراه با اندازه قطر دگمه جوش را ارائه کرده است.

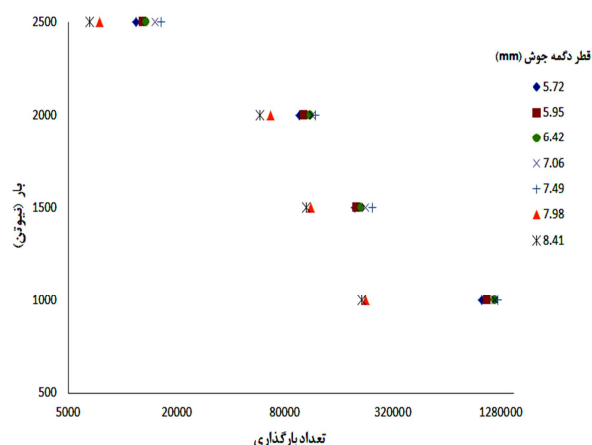
جدول ۲- پارامترهای جوش نقطه ای اعمال شده برای تهیه نمونه ها

سری	شدت جریان (kA)	زمان جوش (ms)	قطر دگمه جوش (mm)
۱	۳۶	۸۰	۵/۷۲
۲	۳۹	۶۰	۵/۹۵
۳	۳۷	۸۰	۶/۴۲
۴	۳۸	۸۰	۷/۰۶
۵	۳۹	۸۰	۷/۴۹
۶	۴۰	۸۰	۷/۹۸
۷	۳۷	۱۴۰	۸/۴۱

لازم به ذکر است که برای تمامی نمونه های ارائه شده در جدول ۲، نیروی الکتروود و زمان پیش جوش ثابت و به ترتیب ۴۰۰۰ نیوتن و ۲۰ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، برای هر سری از پارامترهای جوش ارائه شده در جدول شماره ۲، ۹ نمونه آماده گردید و در مجموع ۶۳ نمونه برای بررسی استحکام استاتیکی و خستگی اتصال جوش مورد بررسی قرار گرفته است.

پس از مشخص شدن نمونه های جوشکاری شده و قطر دگمه جوش در هر سری از نمونه ها، ۳ نمونه از هر سری از نمونه برای آزمون کششی-برشی جهت تعیین استحکام استاتیکی نمونه ها مورد اندازه گیری قرار گرفته اند. شکل ۴ رابطه میان استحکام استاتیکی اتصال جوش و قطر دگمه جوش را نمایش می دهد. لازم به ذکر است که بیشترین بار تحمل شده ارائه شده در شکل ۴ مربوط به میانگین بیشترین بار تحمل شده

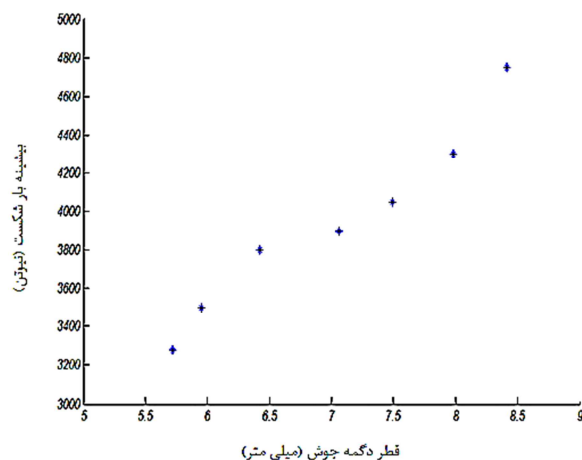
اتصال جوش پیش از شکست اتصال در ۳ نمونه آزمون شده برای هر سری از نمونه ها می باشد.



شکل ۶ - نمودار عمر خستگی نمونه های جوشکاری شده

همانطور که در شکل شماره ۶ مشخص است، با افزایش بار وارد بر نمونه جوشکاری شده، عمر خستگی برای هر سری از نمونه ها کاهش پیدا کرده است. نکته مهم در این نمودارها تفاوت محسوس عمر خستگی اتصال در نمونه ها با قطر ۷/۹۸ و ۸/۴۱ میلی متر با سایر نمونه ها می باشد. با افزایش قطر دگمه جوش از ۵/۷۲ میلی متر به ۷/۴۹ میلی متر، مانند استحکام استاتیکی، استحکام خستگی نمونه های جوش داده شده افزایش پیدا کرده است. برای این سری از نمونه ها، کاهش عمر خستگی برای بار ۱۰۰۰ نیوتنی به ۱۵۰۰ نیوتنی بسیار محسوس می باشد. برای این سری از نمونه ها، در حالیکه عمر خستگی اتصال برای بار ۱۰۰۰ نیوتنی در محدوده ۱ میلیون دور می باشد، برای بار ۱۵۰۰ نیوتنی عمر خستگی اتصال جوش به محدوده 2×10^5 دور سقوط کرده است. این روند چشمگیر کاهش عمر خستگی در مقایسه میان بار ۲۰۰۰ نیوتنی با بار ۲۵۰۰ نیوتنی نیز مشاهده می شود. در حالیکه عمر خستگی نمونه ها تحت بار ۲۰۰۰ نیوتنی، در محدوده 10^5 دور قرار دارد، برای بار ۲۵۰۰ نیوتنی عمر خستگی اتصال جوش به محدوده 10^4 افت پیدا کرده است. برای نمونه های با قطر ۷/۹۸ و ۸/۴۱ میلی متر نیز افزایش بار منجر به کاهش عمر خستگی اتصال جوش نقطه ای شده است. اما عمرهای خستگی ثبت شده برای این سری نمونه ها بطور کامل متفاوت از نمونه های پیشین می باشد. با افزایش قطر دگمه جوش از ۷/۴۹ میلی متر به ۷/۹۸ میلی متر، بر خلاف استحکام استاتیکی اتصال جوش، استحکام خستگی اتصال به شدت کاهش پیدا کرده است. در حالیکه عمر خستگی نمونه با قطر ۷/۴۹ تحت بار ۱۰۰۰ نیوتنی 1230050 دور می باشد؛ برای نمونه با قطر ۷/۹۸ این مقدار به 225880 دور کاهش پیدا کرده است. این کاهش عمر خستگی نمونه جوشکاری شده در تمامی بارگذاری ها مشاهده می شود.

نظیر این رفتار در نمونه با قطر ۸/۴۱ میلی متری نیز مشاهده می شود. با افزایش قطر دگمه جوش از ۷/۹۸ میلی متر به ۸/۴۱ میلی متر، روند کاهش عمر خستگی ادامه پیدا کرده است. مقایسه میان عمر خستگی تحت بارگذاری های مختلف نشان می دهد که برای تمامی بارهای اعمال شده عمر خستگی در نمونه با قطر ۸/۴۱ میلی متری کمتر از عمر خستگی در نمونه با قطر ۷/۹۸ میلی متری می باشد.



شکل ۴- نمودار رابطه میان قطر دگمه جوش و استحکام استاتیکی اتصال

همانطور که در این شکل مشخص است؛ رابطه مستقیمی میان استحکام استاتیکی اتصال جوش و قطر دگمه جوش در هر سری از نمونه ها وجود دارد. با افزایش قطر دگمه جوش بیشترین بار تحمل شده توسط نمونه پیش از شکستن اتصال جوش افزایش پیدا کرده است. در این آزمون کمترین بار تحمل شده توسط اتصال جوش ۳۲۸۰ نیوتن برای کمینه قطر دگمه جوش (۵/۷ میلی متر) و بیشترین بار تحمل شده ۴۷۵۰ نیوتن برای بیشینه قطر دگمه جوش (۸/۴۱ میلی متر) ثبت شده است. نکته مهم در این آزمون، شکست اتصال جوش نقطه ای از محل جوش برای تمامی نمونه ها می باشد. با وجود افزایش بیشترین بار تحمل شده توسط اتصال برای نمونه های با قطر دگمه جوش بزرگتر، همچنان تنها این نوع شکست در نمونه ها مشاهده گردید (شکل ۵).

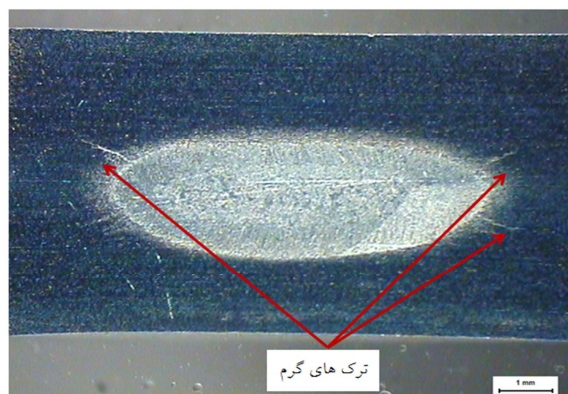
پس از اندازه گیری استحکام استاتیکی اتصال جوش نقطه ای، نمونه های باقی مانده جهت اندازه گیری استحکام خستگی مورد استفاده قرار گرفتند. در این مطالعه در مجموع ۴۲ نمونه مورد آزمون استحکام خستگی قرار گرفته است. از ۲۸ نمونه جوشکاری شده برای بررسی استحکام خستگی تحت بارهای ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ نیوتن استفاده شده و آزمون خستگی تحت بار ۲۰۰۰ نیوتنی برای مقایسه بهتر میان استحکام خستگی هر سری از نمونه ها ۳ بار تکرار شده است. شکل شماره ۶ نمودار حاصل از آزمون خستگی برای هر سری از نمونه ها را نمایش داده است. لازم به ذکر است که برای کلیه نمونه های تحت بارگذاری خستگی نیز تنها شکست از محل اتصال نمونه ها و بصورت بین صفحه ای مشاهده گردید.



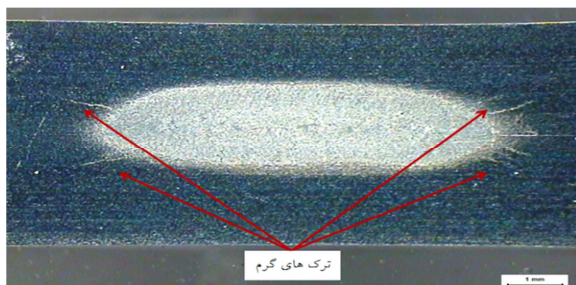
شکل ۵- شکست نمونه های جوشکاری شده از ناحیه اتصال

است با افزایش گرمای ورودی به ناحیه اتصال (افزایش قطر دگمه جوش) ترک های گرم اطراف دگمه جوش نیز افزایش پیدا کرده است.

بررسی رفتار نمونه های جوشکاری شده تحت آزمون کششی-برشی نشان می دهد که وجود ترک های ناحیه HAZ تأثیری بر استحکام استاتیکی اتصال جوش نقطه ای ندارد. مشابه این نتیجه در اتصال جوش نقطه ای فولادهای دوفازی نیز مشاهده شده است [۱۴]. این درحالیست که وجود این ترکها در نمونه های ۶ و ۷ منجر به افت محسوس استحکام خستگی اتصال جوش نقطه ای شده است و نشان می دهد که عامل بسیار مهمی در استحکام خستگی اتصال جوش نقطه ای می باشند. نتایج نشان می دهد که افزایش این ترک ها در نمونه ۷ نسبت به نمونه ۶ منجر به کاهش بیشتر استحکام خستگی اتصال جوش نیز شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۸- ترک های گرم در اطراف دگمه جوش الف: نمونه شماره ۶
ب: نمونه شماره ۷

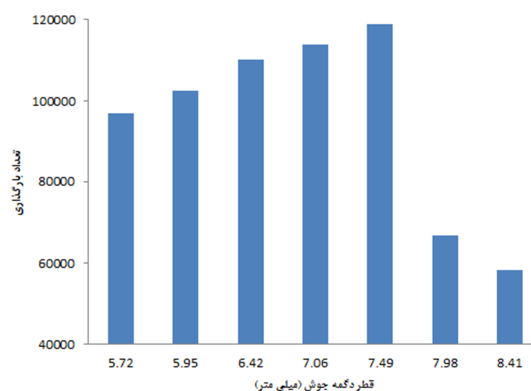
۴- جمع بندی

در این مطالعه استحکام استاتیکی و خستگی اتصال جوش نقطه ای مقاومتی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 با ضخامت ۲ میلی متر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین رابطه میان قطر دگمه جوش و استحکام مکانیکی اتصال جوش نقطه ای مطالعه شده است. نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می دهد که قطر دگمه جوش تأثیر مستقیمی بر استحکام استاتیکی اتصال جوش نقطه ای دارد و افزایش آن منجر به افزایش استحکام استاتیکی اتصالی می گردد.

هرچند که افزایش قطر دگمه جوش منجر به افزایش استحکام استاتیکی اتصال جوش می گردد؛ برای استحکام خستگی اتصال جوش نقطه ای این گزینه صادق نیست. نتایج این مطالعه نشان می دهد که برای ورق آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 با ضخامت ۲ میلی متر افزایش قطر دگمه جوش به بیش از ۷/۵ میلی متر منجر به کاهش استحکام خستگی

شکل شماره ۷ مقایسه میان عمر خستگی برای هر سری از نمونه ها تحت بار ۲۰۰۰ نیوتنی می باشد. لازم به ذکر است که عمر خستگی نشان داده شده در این نمودار میانگین عمر خستگی ۳ نمونه در هر سری از نمونه ها می باشد. شکل شماره ۷ رفتار خستگی اتصال جوش نقطه ای نمایش داده شده در شکل شماره ۶ را تأیید می کند. در حالیکه با افزایش قطر دگمه جوش از ۵/۷۲ میلی متر به ۷/۴۹ میلی متر، مانند استحکام استاتیکی، استحکام خستگی نمونه های جوش داده شده افزایش پیدا کرده است؛ با افزایش قطر دگمه جوش از ۷/۴۹ میلی متر به ۷/۹۸ میلی متر، بر خلاف استحکام استاتیکی اتصال جوش، استحکام خستگی اتصال کاهش پیدا کرده است و این روند کاهشی برای نمونه با قطر ۸/۴۱ میلی متر نیز قابل مشاهده می باشد.

برای درک بهتر رفتار خستگی نمونه های جوشکاری شده، سطح مقطع نمونه ها در ناحیه اتصال مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که در بررسی سطح نمونه ها، برای تمامی نمونه های جوشکاری شده هیچ ترک سطحی در دو طرف اتصال مشاهده نشده است. اما بررسی سطح مقطع جوش نشان می دهد که هر چند برای نمونه های ۱ تا ۵ هیچ ترکی در ناحیه اتصال وجود ندارد؛ برای نمونه های ۶ و ۷ در اطراف دگمه جوش ترک هایی در ناحیه تحت تأثیر دما (HAZ) مشاهده می شود. شکل ۸ تصویر سطح مقطع جوش را در نمونه های ۶ و ۷ نمایش می دهد. در واقع ترکهای اطراف دگمه جوش که در شکل ۸ نشان داده شده اند، از نوع ترکهای گرم بوده و ترکهای گداخته^۱ نامیده می شوند.



شکل ۷- عمر خستگی نمونه های جوشکاری شده تحت بار ۲۰۰۰ نیوتنی به نظر می رسد با افزایش گرمای وارد شده به ناحیه اتصال در حین فرآیند جوش نقطه ای و در نتیجه افزایش قطر دگمه جوش احتمال ایجاد این ترک ها افزایش پیدا کرده است. مطالعات صورت گرفته پیشین [۱۳ و ۱۴] نیز نشان داده اند که میزان انرژی گرمایی وارد شده به ناحیه اتصال مهمترین پارامتر ایجاد این نوع ترکهای می باشند. این مطالعات نشان داده اند که این ترکها در حین فرآیند جوش نقطه ای در ناحیه ای که بطور کامل ذوب نشده است، تشکیل می شوند. نکته جالب در مورد این ترک ها زاویه تقریباً یکسان آنها و گسترش آنها به بیرون دگمه جوش و در راستای ورق می باشد. همانطور که در شکل ۸ نیز مشخص

1 Liquation crack

- [11] ANSI/AWS/SAE/1997 Weld button criteria, recommended practice for test methods for evaluating the resistance spot welding behavior of automotive sheet steel metal, American National Standard, 1997.
- [12] Afshari D., Sedighi M., Barsoum Z., and Peng R. L., An approach in prediction of failure in resistance spot welded aluminum 6061-T6 under quasi-static tensile test, *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 226, no. 6, pp. 1026–1032, 2012.
- [13] Sankra J., and Zhang H., Cracking in spot welding aluminum alloy AA5754, *Welding Journal*, vol. 79, no. 7, pp. 194–201, 2000.
- [14] Saha D. C., Chang I., and Park Y. D., Heat-affected zone liquation crack on resistance spot welded TWIP steels, *Materials Characterization*, Vol. 93, pp. 40–51, 2014.

اتصال جوش داده شده می گردد. اگرچه سطح تمامی نمونه ها عاری از ترک می باشد؛ بررسی سطح مقطع ناحیه اتصال نشان میدهد که با افزایش قطر دگمه جوش به بیش از ۷/۵ میلی متر، ترکهای گرم در اطراف دگمه جوش و در منطقه تحت تاثیر دما بوجود آمده است. این ترکها می تواند بدلیل افزایش گرما در ناحیه اتصال بوجود آمده باشند. هرچند که این ترکها تاثیری بر استحکام استاتیکی نمونه های جوشکاری شده ندارد؛ وجود این ترکها منجر به افت محسوس استحکام خستگی اتصال جوش شده است. بنابراین کنترل پارامترهای جوش نقطه ای جهت ممانعت از بوجود آمدن این ترکها در اتصال بسیار مهم می باشد. نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می دهد با توجه به اینکه سازه های جوشکاری شده بطور معمول در معرض بارهای دینامیکی قرار می گیرند، لازم است که جهت اطمینان از کیفیت اتصال جوش ها رفتار خستگی اتصال جوش مورد بررسی دقیق قرار گرفته و پارامترهای جوش نقطه ای بهینه جهت دستیابی به بیشینه استحکام استاتیکی و خستگی برای اتصال تعیین گردد.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله وظیفه خود می دانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از دانشکده مهندسی خودرو دانشگاه صنعتی سلطنتی سوئد جهت فراهم آوردن امکانات لازم و اجازه دسترسی به ماشین ها و ابزارهای مورد نیاز در این مطالعه را ابراز نمایند. همچنین از آقای مهندس منصور خورشید برای همراهی در انجام آزمون ها تشکر می شود.

۶- مراجع

- [1] Sun X., Stephens E. V., and Khaleel M. A., Effect of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high strength steel spot welds under lap shear loading conditions, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 15, No. 4, pp. 356–367, 2008.
- [2] Longa X., Khanna S. J., and Allard B. L. F., Effect of fatigue loading and residual stress on microscopic deformation mechanisms in a spot welded joint, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 454–455, No. 25, pp. 398–406, 2007.
- [3] Kang H. T., Dong P., and Hong J. K., Fatigue analysis of spot welds using a mesh-intensive structural approach, *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp. 1546–1553, 2007.
- [4] Ertas A. H., and Sonmez F. O., A parametric study on fatigue strength of spot weld joints, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 31, No. 9, pp. 766–776, 2008.
- [5] Wang R. J., and Shang D., Low cycle fatigue life prediction of spot welds based on hardness distribution and finite element analysis, *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, pp. 508–514, 2009.
- [6] Wang R. J., and Shang D., Fatigue life prediction based on natural frequency changes for spot welds under random loading, *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, pp. 361–366, 2009.
- [7] Shariati M., and Maghrebi M. J., Experimental study of crack growth behavior and fatigue life, *Journal of Applied Science*, Vol. 9, No. 3, pp. 438–448, 2009.
- [8] Mirsalehi S. E., and Kokabi A. H., Fatigue life estimation of spot welds using a crack propagation-based method with consideration of residual stresses effect, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 23, pp. 6359–6363, 2010.
- [9] Hassanifard S., Zehsaz M., and Esmaeili F., Spot weld arrangement effects on the fatigue behavior of multi-spot welded joints, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 3, pp. 647–653, 2011.
- [10] Faseeulla Khan M. D., Dwivedi D. K., and Sharma S., Development of response surface model for tensile shear strength of weld-bonds of aluminium alloy 6061 T651, *Materials and Design*, Vol. 34, pp. 673–678, 2012.