



اثر تغییر سرعت دوران ابزار بر میکروسختی، استحکام استاتیکی، رفتار خستگی و بررسی نوع واماندگی در جوش نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-تی در نمونه‌های لبه‌ای برشی

امیررضا شاهانی^{*}، علی فرهی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت:

بازنگری:

پذیرش:

راشه آنلاین:

کلمات کلیدی:

جوش نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی

خستگی

رفتار مکانیکی

تغییر سرعت دوران جوشکاری

چکیده: جوش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-تی بمنظور بررسی تغییر سرعت دوران ابزار جوشکاری در سرعت‌های ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه بصورت تجربی تحلیل شده است. لذا میکرو سختی، استحکام استاتیکی و رفتار خستگی اتصال در هندسه لبه‌ای برشی تعیین و تحلیل شده است. نتایج میکروسختی، تشابه مقدار سختی در نواحی بعد از شانه و تغییرات محسوس در نواحی نزدیک به سوراخ بین و نواحی تحت تاثیر حرارت نشان داده شده است. همچنین با توجه به نتایج آزمایش‌های خستگی و استاتیکی در مقاله حاضر، با افزایش سرعت دوران رفتار اتصال بهتر شده و در نتیجه سرعت دوران ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، رفتاری مناسب‌تر از دیگر حالات نشان داده است. با مقایسه نتایج خستگی حالات مختلف جوشکاری، در سطح بارهای بالا، در یک سطح بار مشخص، اختلاف عمر حالات مختلف چشم‌گیر است ولی در سطح بارهای پایین، حالات مختلف رفتار مشابه‌تری نشان می‌دهند. دو نوع واماندگی متفاوت در سطوح بار مختلف مشاهده گردید. در سطوح بار بالا واماندگی از نوع جدایش دکمه جوش و در سطوح بار پایین جدایش نهایی در ورق مشاهده گردید. همچنین در سطوح بار میانی با اینکه واماندگی نهایی از نوع برش است ولی رشد ترک در ورق خارج از ناحیه اختلاط نیز اتفاق افتاده است.

۱- مقدمه

فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توسط موسسه بین المللی جوش^۱ در سال ۱۹۹۱ بعنوان روش اتصالی در حالت جامد معرفی شد. این فرآیند در ابتدا بعنوان روشی برای اتصال ورق‌های آلومینیومی بکار می‌رفته ولی اکنون برای آلیاژهای دیگر نیز کاربرد دارد [۱]. این فناوری دوستدار محیط زیست است، مقدار انرژی کمتری نسبت به روش‌های دیگر استفاده می‌کند و نیازی به مواد مصرفی همچون الکتروود و گاز پوشاننده ندارد. همچنین از آنجایی که در این اتصال ذوب اتفاق نمی‌افتد، لذا مشکل عدم تطابق در ترکیب و ترک‌های ناشی از سرد شدن بعد از فرآیند وجود ندارد و مقدار تنش پسماند بوجود آمده نیز کمتر است.

با توجه به اینکه کاربرد آلومینیوم در صنایع مختلف رو به افزایش بوده و با در نظر گرفتن مشکلات فرآیندهای جوش مقاومتی نقطه‌ای و پرچ کاری، نیاز به فرآیندی با مصرف انرژی کمتر و عدم استفاده از ماده مصرفی لازم به نظر می‌رسید. لذا در سال ۲۰۰۳ برای اولین بار جوش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای توسط شرکت خودروسازی مزدا معرفی شد و پس از آن رشدی فزاینده در استفاده از این نوع اتصال در صنایع مختلف صورت گرفت. با افزایش چشم‌گیر استفاده از این اتصال، روش‌های متفاوتی برای ایجاد اتصال

نیز همچون جوش مجدد پر شده^۲ و جوش جاروبی^۳ معرفی شدند. ولی همچنان بیشترین استفاده جوش اصطکاکی نقطه‌ای اصطکاکی در صنایع مختلف، جوش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای خالص^۴، روش ابداعی مزدا، است [۲]. مطابق این روش وسیله‌ای چرخان شامل پین به سطح بالایی اتصال فشار داده می‌شود و برای مدت زمان مشخص داخل ماده بمنظور ایجاد حرارت قرار داده می‌شود و دو سطح بالایی و پایینی متصل می‌گردند و پس از خارج شدن پین از اتصال، در سطح بالایی سوراخی بوجود خواهد آمد و سطح پایینی اتصال تقریباً صاف خواهد بود [۳]. با توجه به فرآیند، پارامترهای متعددی در کیفیت اتصال همچون سرعت چرخش پین، مدت زمان توقف پین، عمق نفوذ پین، هندسه پین، هندسه شانه و سرعت ورود و خروج پین به ورق‌ها موثر هستند. با ثابت در نظر گرفتن هندسه ابزار، سرعت چرخش و مدت زمان توقف از اهمیت بیشتری برخوردارند [۴]. اهمیت این دو پارامتر از آن جهت است که با افزایش سرعت و مدت زمان توقف حرارت بیشتری ایجاد شده و در نتیجه در رفتار اتصال بوجود آمده تاثیر می‌گذارد [۵ و ۶].

در بررسی این نوع جوشکاری تعدادی از پژوهش‌ها تمرکز خود را بر بهینه کردن پارامترهای جوشکاری قرار داده‌اند که معمولاً با بررسی ریز

2 Refill FSSW

3 Swept FSSW

4 Pure FSSW

1 TWI

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: shahani@kntu.ac.ir

اتصال استفاده شده است [۱۷]. ئوماتسو و همکاران [۱۸ و ۱۹] اثر هندسه پین را بمنظور ایجاد اتصال بهینه بررسی کرده است، در این تحقیق ادعا شده است، ابزار بدون پین و با شانه رزوه شده در عملکرد خستگی نقش مفیدی نسبت به حالت معمولی خواهد داشت. لین و همکاران [۲۰] نوع واماندگی اتصال را در نمونه کششی صلیبی تحلیل کرده اند و رفتار خستگی اتصال را به همراه روش تخمین عمر ترک منحرف شده توجیه نموده اند. ونگ و چن [۲۱] نیز بر روی ورق‌های نمونه‌های برشی لبه‌ای آزمایش خستگی انجام داده و مقایسه‌ای بین روش تخمین عمر بر پایه رابطه پاریس و نتایج تجربی انجام داده اند. با تغییر پارامترهای مختلف جوشکاری مقدار حرارت ایجاد شده در اتصال نیز تغییر می‌کند. در نتیجه یکی از مواردی که از تغییر میزان حرارت ایجاد شده متاثر می‌شود، مقدار تنش پسماند ایجاد شده در اتصال است. البته تنش پسماند در جوش اصطکاکی اغتشاشی با توجه به ماهیت نوع اتصال نسبت به دیگر روش‌های جوشکاری مقدار بسیار کمتری دارد [۱ و ۲]. همچنین در پژوهش‌هایی که شبیه‌سازی جوشکاری انجام شده، از اثر تنش پسماند بدلیل ناچیز بودن و آزاد شدن تنش پسماند بعد از تعدادی سیکل با توجه به کوچک بودن نمونه‌ها صرف‌نظر شده است [۲۲-۲۴].

با توضیحات ارائه شده، با اینکه در پژوهش‌هایی عملکرد اتصال با تغییر پارامتر تغییر سرعت به کمک نتایج استحکام استاتیکی بررسی شده، ولی بعضاً نتایج متناقضی گزارش شده است. علاوه بر این بررسی‌های چشم‌گیری بمنظور تعیین رفتار خستگی اتصال فقط با تغییر سرعت دوران ابزار و ثابت بودن دیگر پارامترهای تاثیرگذار، انجام پذیرفته است. همچنین در بررسی خستگی تنها به نوع واماندگی و تحلیل آن اکتفا شده است. در تحقیق حاضر سرعت دوران پین در اتصال بعنوان پارامتری مهم در کیفیت جوش بررسی شده است، لذا برای بررسی رفتار اتصال، میکروسختی در نواحی مختلف اتصال، استحکام استاتیکی و رفتار خستگی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-تی-۶ در سه سرعت دوران ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه آزمایش و تحلیل شده است. همچنین انواع مختلف واماندگی در سطوح بار مختلف خستگی ارائه و تحلیل شده اند، در نتیجه با اینکه در پژوهش‌های دیگر واماندگی اتصال جوش نقطه‌ای اصطکاکی به دو نوع کاملاً متفاوت برش محیطی در ناحیه جوش و واماندگی در جهت عمود بر بارگذاری در ورق خارج از ناحیه جوش تفکیک شده است، در مقاله حاضر نشان داده شد که هر دو نوع واماندگی در اتصال نقش داشته و بطور مشخص در سطوح بار میانی هر دو نوع واماندگی مشاهده گردید. همچنین نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج موجود در زمینه استحکام استاتیکی آلیاژ مربوطه مقایسه شده است.

۲- آزمایش‌ها

در تحقیق حاضر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-تی-۶ با ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است. ترکیبات شیمیایی این آلیاژ مطابق جدول ۱ و خواص مکانیکی آن نیز مطابق جدول ۲ می‌باشد [۲۵]. برای انجام آزمایش‌ها از

ساختار، استحکام استاتیکی و میکروسختی نتیجه گیری کرده اند. ژنگ^۱ و همکاران [۶] ریزساختار و خواص مکانیکی جوش نقطه‌ای معمولی و شبه خطی^۲ را در مدت زمان و سرعت چرخش‌های مختلف بررسی کرده و مدعی شده اند با افزایش سرعت، عملکرد مکانیکی کاهش می‌یابد در حالی که رفتار مکانیکی مستقل از مدت زمان است. راثو^۳ و همکاران [۷] اثر تغییر سرعت چرخش پین و عمق نفوذ را بین آلومینیوم و منیزیم در استحکام استاتیکی بررسی کرده اند. آن‌ها نتیجه‌گیری می‌کنند، با افزایش سرعت دوران، استحکام اتصال کاهش یافته و با افزایش عمق نفوذ شانه، استحکام افزایش می‌یابد. بوزی^۴ و همکاران [۸] اثر سرعت چرخش و عمق نفوذ پین را بررسی و سرعتی بهینه برای استحکام با توجه به تنش پسماند و افزایش ناحیه اختلاط تعیین کرده اند. مرزوق^۵ و همکاران [۹] سرعت دوران پین و سرعت فرورندگی را بر رفتار مکانیکی اتصال بررسی کرده و استحکام بالاتر با ترکیب سرعت دوران کم و سرعت فرورندگی پایین از نتایج ارائه شده توسط آن‌ها است. چادهری^۶ و همکاران [۱۰ و ۱۱] مقایسه‌ای بین رفتار خستگی اتصال جوش نقطه‌ای اصطکاکی بین ورق‌های متفاوت آلومینیوم و منیزیم و همچنین با اتصالی که همراه چسب باشد، انجام داده اند.

همچنین بررسی جوش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نیز انجام شده است. شن و همکاران [۱۲] ریزساختار و رفتار مکانیکی جوش مجدد پر شده و حالات واماندگی مختلف را در دو نمونه کششی صلیبی و برشی لبه‌ای به منظور تعیین سرعت دوران و مدت زمان توقف بهینه بررسی کرده اند. جئون^۷ و همکاران [۱۳] الگوی اختلاط مواد را در اتصال دو آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و آلومینیوم ۵۰۵۲ بررسی کرده و رفتار مکانیکی آن‌ها را بمنظور نشان دادن اتصال مناسب تعیین کرده اند. لین و چن [۱۴] سرعت و مدت زمان توقف بهینه را در استحکام استاتیکی اتصال جوش نقطه‌ای اصطکاکی برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با اندازه‌گیری دما، گشتاور و نیرو تعیین کرده اند. همچنین ئوماتسو^۸ و همکاران [۱۵] مدعی شده اند جوشکاری با حفره ناشی از جوشکاری در بارگذاری سیکلی، مخصوصاً در عمرهای پایین عملکرد بهتری نسبت به جوشکاری با حفره پر شده خواهد داشت، در صورتی که مطابق ادعای نویسندگان در حالت بارگذاری استاتیکی برعکس می‌باشد. ولی ونوکومار^۹ و همکاران [۱۶] بر خلاف نتایج مرجع [۱۵] در مقایسه جوشکاری معمولی و جوشکاری با حفره پر شده بهبود عمر در جوشکاری با حفره پر شده در تمامی سطوح بار را نشان داده اند. علاوه بر این جوش اصطکاکی اغتشاشی شبه خطی بمنظور بهبود عملکرد رفتار مکانیکی

- 1 Zhang
- 2 Walking FSSW
- 3 Rao
- 4 Bozzi
- 5 Merzoug
- 6 Chowdhury
- 7 Jeon
- 8 Uematsu
- 9 Venukumar

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی اسمی آلیاژ آلومینیوم - ۶۰۶۱-تی۶.

Table 1.

Cr	Mn	Ti	Cu	Zn	Fe	Si	Mg	Al	عنصر
۰/۰۴	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۷	۰/۸	۰/۸	Bal.	درصد

جدول ۲: خواص مکانیکی اسمی آلیاژ آلومینیوم - ۶۰۶۱-تی۶.

Table 2.

مقدار	خاصیت مکانیکی
۰/۳۳	نسبت پواسون
۶۸/۹ GPa	مدول الاستیسیته
۲۷۶ MPa	تنش تسلیم
۳۱۰ MPa	حد نهایی استحکام کششی

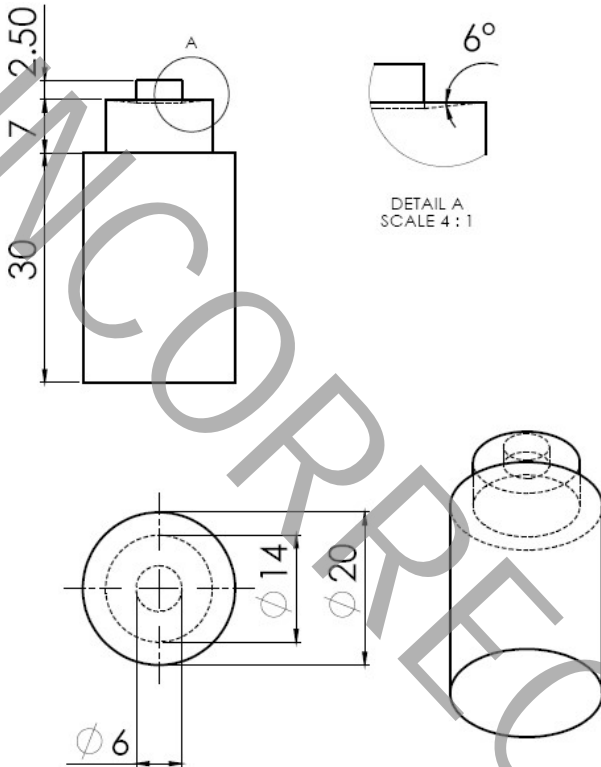


Fig. 2.

شکل ۲: هندسه پین.



Fig. 3.

شکل ۳: مقید کردن ورق ها برای جوشکاری و تعیین نقطه اعمال بار.

سندان فولادی کمک گرفته شده است. در فرآیند جوش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای که بصورت جابجایی کنترل انجام می‌پذیرد، پارامترهای سرعت چرخش پین، مدت زمان توقف پین در نمونه‌ها و عمق نفوذ پین در ورق پایینی بعنوان عوامل موثر بر اتصال معرفی می‌شوند [۴]. به همین منظور، در تحقیق حاضر سرعت چرخش پین، بعنوان پارامتر مورد بررسی، تغییر کرده و دو پارامتر دیگر در تمامی نمونه‌ها ثابت است. نمونه‌های مختلف ساخته

نمونه برشی لبه‌ای با ورق‌هایی به ابعاد ۴۰ در ۱۶۰ میلی‌متر مربع استفاده شده است همچنین طول ناحیه بر هم قرارگیری آن‌ها ۴۰ میلی‌متر است و بمنظور حذف گشتاور پیچشی و اطمینان از اعمال نیرو در ناحیه اتصال دو لقمه^۱ با ابعاد ۴۰ در ۴۰ میلی‌متر مربع در دو انتهای نمونه‌ها بکار گرفته شده است. هندسه و ابعاد نمونه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

ابزار جوشکاری از آلیاژ اچ ۱۳ تهیه شده است، این آلیاژ فولاد ابزار گرمکار است و برای فرآیند ریخته‌گری کاربرد فراوان دارد، ولی از آنجایی که در فرآیند جوشکاری، تحت دما و نیروی بالایی قرار می‌گیرد بایستی سختکاری گردد، لذا با انجام عملیات حرارتی مطابق مرجع [۲۶] سختی مطلوب ۴۵-۴۸ HV حاصل می‌شود. هندسه ابزار جوشکاری از شانه با قطر ۱۴ میلی‌متر و پین با قطر ۶ میلی‌متر مطابق شکل ۲ ساخته شده است. قطر پین بر اساس رابطه پیشنهادی $\sqrt{t} \leq 7$ در نظر گرفته شده که t ضخامت ورق اتصال است. همچنین معمولاً برای اختلاط بهتر مواد اتصال، از شانه مخروطی با تقعر بین ۵ تا ۱۰ درجه استفاده می‌شود، لذا زاویه ۶ درجه برای هندسه شانه انتخاب شد [۲ و ۲۷]. برای انجام فرآیند جوشکاری از دستگاه CNC قائم استفاده شده و نمونه‌ها مطابق شکل ۳ از دو طرف مقید و در زیر آن‌ها نیز از

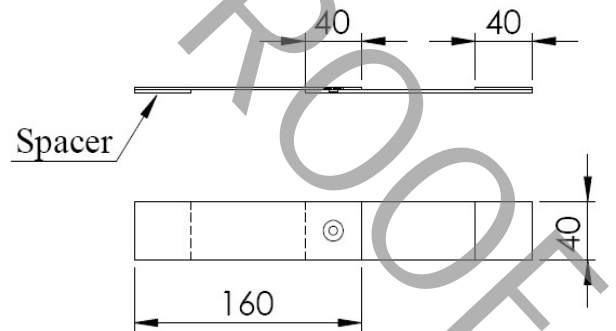


Fig. 1.

شکل ۱: هندسه نمونه‌ها.

1 Spacer

۳- نتایج

۳-۱- آزمایش کشش

آزمایش کشش برای هر حالت در سه نمونه تعیین گردید و میانگین آن‌ها به عنوان استحکام استاتیکی اتصال تعیین شد. مطابق شکل ۴ استحکام استاتیکی ۳ حالت آزمایش شده، با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین دستگاه آزمایش به همراه نمونه در حال آزمون در شکل ۵ نشان داده شده است.

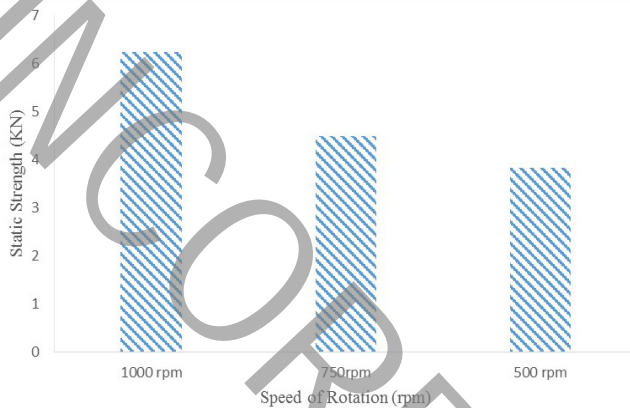


Fig. 4.

شکل ۴: مقایسه استحکام استاتیکی حالات مختلف جوشکاری.

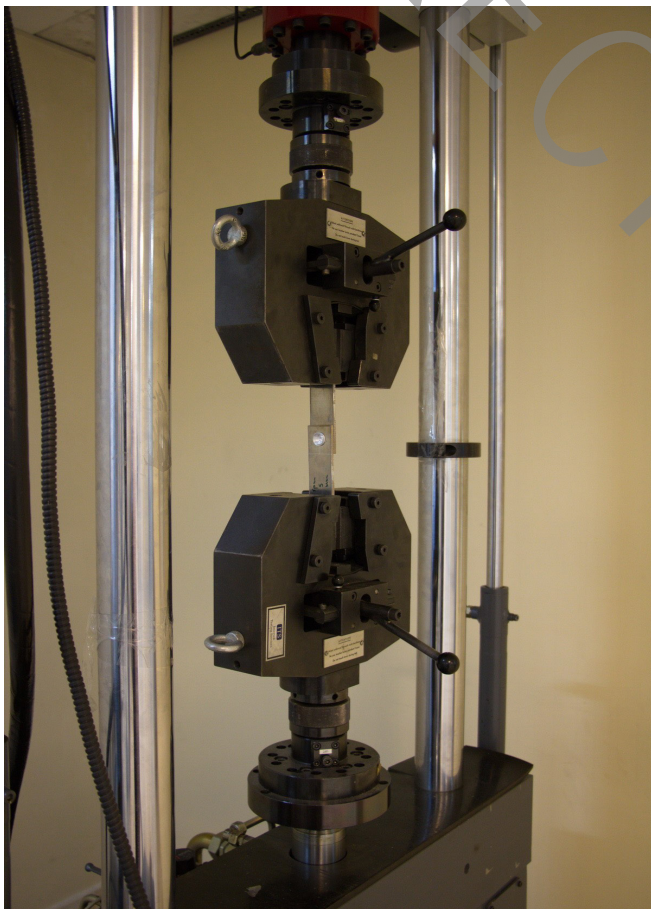


Fig. 5.

شکل ۵: نمونه آزمایش در دستگاه زوئیک/روئل.

شده مطابق جدول ۳ گزارش می‌شوند که مدت زمان توقف ۴ ثانیه و عمق نفوذ ۳ میلی‌متر در تمامی نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین سرعت فرورودگی ۱۰ و سرعت بالارودگی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه لحاظ می‌شود و در تمامی نمونه‌ها جهت چرخش پین بصورت ساعتگرد اعمال می‌شود.

آزمایش‌های کشش برای تعیین استحکام استاتیکی اتصال در حالات مختلف توسط دستگاه زوئیک/روئل^۱ با نرخ بارگذاری ۲ میلی‌متر بر دقیقه در دمای اتاق انجام می‌پذیرد. بارگذاری تا جایی که جدایش در اتصال اتفاق بیفتد ادامه می‌یابد، نیرو و جابجایی ضبط و گزارش می‌شود. برای انجام آزمایش‌های خستگی نیز با توجه به اینکه برای جوش نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی هیچگونه استاندارد روشنی برای نحوه آزمایش‌های مکانیکی وجود ندارد، لذا از استاندارد ای/ان/اس/ایزو ۱۴۳۲۴^۲ برای تعیین رفتار استاتیکی و خستگی استفاده شده است [۲۸]. در هر حالت جوشکاری آزمایش‌های خستگی در ۶ سطح بار مختلف با نسبت بار ۰/۱ و فرکانس ۲۰ هرتز انجام می‌پذیرد. همچنین شرایط پایان آزمایش جدایش نهایی اتصال در نظر گرفته می‌شود. با این توضیح که در سطح بارهای پایین اگر ترکی مشهود نباشد نمونه در ۱۲۰۰۰۰۰ سیکل متوقف شده و همان بعنوان عمر معرفی می‌شود. برای آماده‌سازی نمونه‌های میکروسختی، نیز نمونه‌ها بصورت عرضی برش خورده، سطح آن صیقلی و لایه‌برداری شیمیایی^۳ انجام می‌شود. آزمایش نیز مطابق استاندارد ASTM E384 [۲۹] توسط دستگاه اچ‌ام‌وی-جی ۲۰ اس‌تی^۴ با نیروی ۱۰۰ گرم و مدت زمان ۱۰ ثانیه انجام می‌شود. نقاط اندازه‌گیری ۰/۵ میلی‌متر پایین‌تر از مرز مشترک دو صفحه^۵ و با فاصله ۰/۵ میلی‌متر از یکدیگر تعیین می‌شوند. همچنین برای مقایسه ریزساختار حالت‌های مختلف جوشکاری از میکروسکوپ نوری آی‌ام‌ام-۴۲۰^۶ شرکت صالیران استفاده می‌شود. برای لایه‌برداری شیمیایی در آزمایش‌های میکروسختی و ریزساختار از ترکیب لایه‌بردار شیمیایی کلر^۷ استفاده شده است.

جدول ۳: پارامترهای جوشکاری در نمونه‌های مختلف.

Table 3.

شماره نمونه	عمق نفوذ (mm)	مدت زمان توقف (s)	سرعت دوران (rpm)
۰۱	۳	۴	۵۰۰
۰۲	۳	۴	۷۵۰
۰۳	۳	۴	۱۰۰۰

- 1 ZWICK/Roell
- 2 EN/BS/ISO 14324
- 3 Etch
- 4 HMV-G 20st
- 5 Interface
- 6 IMM-420
- 7 Keller

۴- بحث بر روی نتایج

مطابق نتایج آزمایش‌های کشش بدست آمده از شکل ۴، سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه بیشترین مقدار استحکام استاتیکی را از خود نشان می‌دهد و روند بهبود استحکام استاتیکی از ۷۵۰ به ۱۰۰۰ دور بر دقیقه افزایش چشم‌گیری نسبت به حالت ۵۰۰ به ۷۵۰ دور بر دقیقه داشته‌است.

در نتایج خستگی اتصال با توجه به شکل ۶ نیز می‌توان مشاهده نمود که با افزایش سرعت از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ دور بر دقیقه روند کلی مناسبی برای عمر خستگی در سطح بارهای مختلف برقرار است. همچنین می‌توان بهبود چشم‌گیر عملکرد خستگی را بین سرعت‌های ۷۵۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه مشاهده نمود در صورتی که بین دو حالت ۵۰۰ و ۷۵۰ دور بر دقیقه تفاوت کمتری مشاهده می‌شود. علاوه بر این، با دقت در شیب نمودارها می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در دو حالت ۵۰۰ و ۷۵۰ دور بر دقیقه، شیب نمودارها نیز بسیار به یکدیگر شباهت دارند در صورتی که شیب نمودار در حالت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه افزایش چشم‌گیری داشته‌است. به بیان دیگر، برای سرعت‌های مختلف جوشکاری، در تعداد سیکل برابر، هر چه نمودار به سمت تعداد سیکل‌های بیشتر سوق پیدا می‌کند اختلاف بین حالات مختلف کمتر

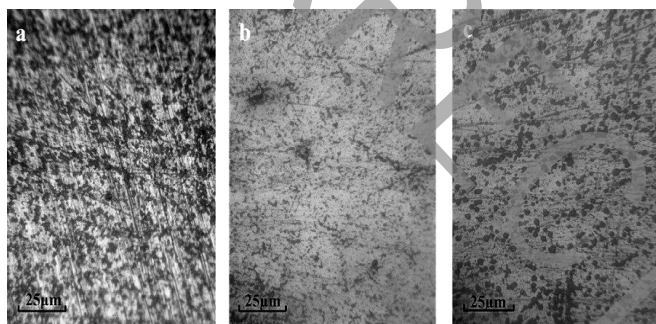


Fig. 9.

شکل ۹: مقایسه ریزساختار در سه حالت مختلف جوشکاری (a) ۵۰۰rpm، (b) ۷۵۰rpm و (c) ۱۰۰۰rpm.

جدول ۴: مقایسه استحکام استاتیکی پژوهش‌های مختلف بر روی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-تی۶

Table 4.

استحکام استاتیکی (kN)	سرعت دوران (rpm)	ضخامت (mm)	پژوهش
۷/۱ تا ۵/۱	۱۵۰۰، ۱۸۰۰، ۲۱۰۰	۲	[۱۲]
۳/۵	-	۲	[۱۵]
۷	۹۰۰، ۱۸۰۰	۲	[۱۶]
۸ تا ۶	۹۰۰، ۱۱۲۰، ۱۴۰۰، ۱۸۰۰	۲	[۱۷]
۵ تا ۲/۲	۱۰۰۰، ۳۰۰۰	۲	[۱۹]
۶/۱۵ تا ۴/۱	۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰	۲	تحقیق حاضر

۳-۲- آزمایش خستگی

آزمایش‌های خستگی برای هر حالت در ۶ سطح بار مختلف با توجه به استحکام استاتیکی، انجام شده‌است و نتایج آن مطابق شکل ۶ نشان داده شده‌است.

۳-۳- آزمایش میکروسختی و ریزساختار

نتایج آزمایش میکروسختی نیز برای یک نیمه از مقطع عرضی نمونه‌ها در نقاط مشخص شده مطابق شکل ۷ گزارش می‌شود. با توجه به تقارن فرآیند در دو نیمه مقطع عرضی نتایج میکروسختی فقط برای یک نیمه مطابق شکل ۸ تعیین می‌شود. همچنین برای مقایسه ریزساختار سه حالت مختلف جوشکاری نقاطی بین سوراخ پین تا ترک مطابق شکل ۷ (ناحیه A) انتخاب می‌شوند و در شکل ۹ ریزساختار آن‌ها نمایش داده می‌شود.

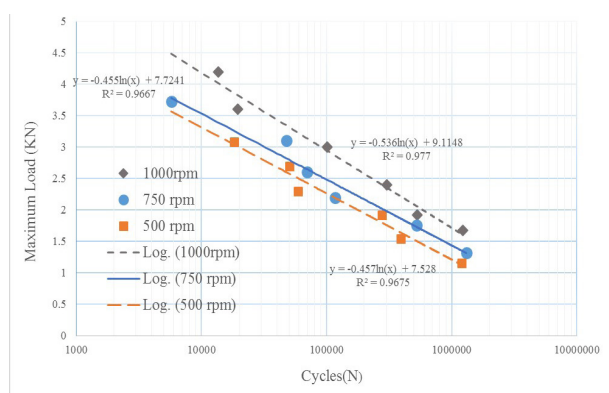


Fig. 6.

شکل ۶: نتایج خستگی بار بیشینه بر حسب تعداد سیکل.

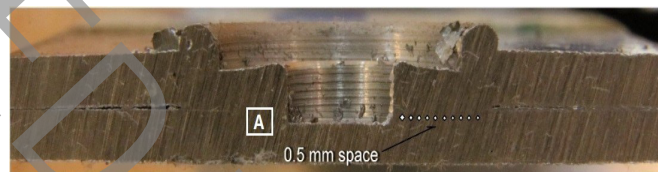


Fig. 7.

شکل ۷: مقطع عرضی اتصال و نقاط مشخص شده برای تعیین میکروسختی و ناحیه بررسی ریزساختار.

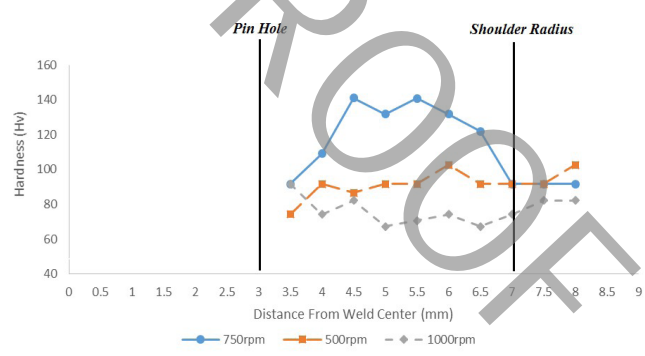
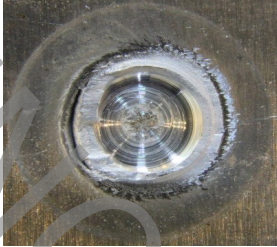


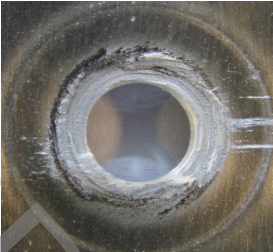

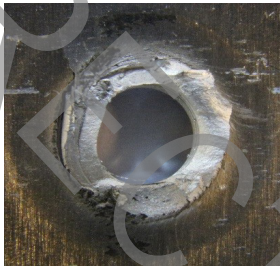
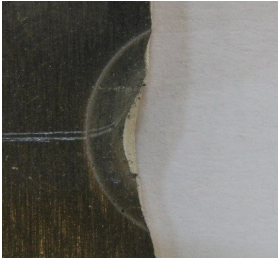







Fig. 8.

شکل ۸: توزیع میکروسختی در حالات مختلف جوشکاری.

جدول ۵: مقایسه واماندگی در سطوح بار مختلف برای حالت جوشکاری با سرعت دوران ۱۰۰۰ دور بر دقیقه.

Table 5.

سطوح شکست		درصد نسبت به استحکام استاتیکی (%)	بیشینه بار اعمالی (kN)
ورق پایینی اتصال	ورق بالایی اتصال		
		۷۰	۴/۲
		۶۰	۳/۶
		۵۰	۳
		۴۰	۲/۴
		۳۰	۱/۹۲
		۲۵	۱/۶۸

جدول ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است در سطوح بار بالا نوع واماندگی مشخصا از نوع برش دکمه جوش است و در سطوح بار پایین نیز تنها واماندگی اتفاق افتاده از نوع رشد در ورق است ولی در سطوح بارهای میانی هر دو نوع واماندگی همزمان در حال عمل کردن هستند بدین معنا که با مشاهده سطوح شکست با اینکه واماندگی نهایی از نوع برش و بیرون آمدن دکمه جوش است ولی همزمان ترک در ورق نیز رشد کرده است. لذا هرچه سطح بار کمتر می شود مقدار بیرون آمدن دکمه جوش نیز در ورق پایینی اتصال افزایش می یابد. در شکل ۱۰، سطح واماندگی سطح بار معادل ۵۰ درصد استحکام استاتیکی در حالت جوشکاری با سرعت دوران ۱۰۰۰ دور بر دقیقه نشان داده شده است، لذا علاوه بر اینکه بصورت عمودی در ورق ترک رشد داشته ولی واماندگی نهایی از نوع برش و بیرون آمدن دکمه جوش است.

نتایج میکروسختی نیز از سوراخ پین تا بعد از محل فرورفتن شانه گزارش شده است و همانطور که از شکل ۸ مشخص است اختلاف حالات مختلف از ناحیه ترک تا محل شانه زیاد است اما بعد از شانه اختلافها کاملا کمتر شده و مقادیر سختی بسیار به یکدیگر نزدیک می شوند. زیرا در ناحیه سوراخ پین تا ناحیه فروروندگی شانه سیلان مواد در یکدیگر، ایجاد اتصال اتفاق می افتد و همچنین نواحی متأثر از حرارت و عملیات ترمومکانیکال وجود دارند لذا در نواحی دورتر از شانه که کمتر تحت تاثیر حرارت قرار گرفته اند توزیع سختی نیز در حالات مختلف مشابه است. همچنین رفتار هر یک از حالات را نیز می توان بدان گونه توجیه نمود که در حالت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه با توجه به اینکه حرارت تولید شده مقدار بسیار زیادی نسبت به حالات دیگر است اتصال بین دو ورق بخوبی انجام پذیرفته است ولی با انتقال حرارت زیاد در اکثر نواحی جوش تا ناحیه فروروندگی شانه، ماده نرم شده و پایین تر از دیگر حالات قرار می گیرد. در حالت ۵۰۰ دور بر دقیقه نیز با توجه به اینکه میزان حرارت تولید شده در حین فرآیند فروروندگی و چرخش کم است لذا حرارت آنچنان در نواحی مختلف منتقل نشده است و تغییر زیادی در رفتار ماده دیده نمی شود ولی برخلاف دو حالت ذکر شده در سرعت دوران ۷۵۰ دور بر دقیقه بیشترین تاثیر بر نواحی مختلف اعمال شده است و حرارت در نواحی اتصال تا قبل از شانه موجب افزایش سختی شده است، ولی در هر سه حالت پس از شانه سختی ها به یکدیگر میل می کنند و در واقع سختی نزدیک به ماده پایه از خود نشان می دهند. همچنین با نتایج حاصل از ریزساختار مطابق شکل ۹ مشخص است که می توان بر اساس تراکم و چینش و اندازه ذرات Mg_2Si که از مهم ترین رسوبات آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-تی ۶ هستند، رفتار سختی حالات مختلف را توجیه نمود. بدیت ترتیب در حالت ۵۰۰ دور بر دقیقه، با توجه به کم بودن حرارت ایجاد شده، این رسوبات حل نشده اند. با این حال در حالت ۷۵۰ دور بر دقیقه این ذرات حل شده ولی در کریستالیزه شدن مجدد، کمتر تولید شده اند ولی در حالت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه با توجه به حرارت بسیار بیشتر تولید شده نسبت به دو حالت دیگر، این ذرات حل شده و مجددا در کریستالیزه شدن تبلور پیدا کرده است ولی در مقایسه با حالت ۵۰۰

می شود و بالعکس، یعنی هر چه نمودار به سمت تعداد سیکل های کمتر می رود عملکرد ۱۰۰۰ دور بر دقیقه بهتر می شود. البته همانطور که ذکر شد با توجه به شیب یکسان بین ۵۰۰ و ۷۵۰ دور بر دقیقه، تفاوتی بین عملکرد آنها در سیکل های بالا و پایین مشاهده نمی شود. چنین رفتاری را می توان با توجه به نوع واماندگی در سطوح بار بالا و پایین در نمونه ها توجیه نمود. زیرا در سطوح بار بالا و پایین نوع واماندگی، در همه سرعت های جوشکاری، متفاوت است بدین معنا که در سطوح بار بالا (عمدتا بیش از ۵۰ درصد استحکام استاتیکی) نوع واماندگی بصورت برش در محل اتصال می باشد. ولی در سطوح بار پایین (بطور مشخص در سطوح بار کمتر از ۴۰ درصد استحکام استاتیکی) واماندگی بدین صورت اتفاق می افتد که ابتدا ترک منحرف شده و خود را به سطوح اتصال می رساند و پس از آن در مود یک و عمود بر جهت بارگذاری در ورق اتصال رشد می کند و از آنجایی که خواص آن نواحی از ورق کمتر تحت تاثیر حرارت فرآیند جوشکاری قرار گرفته است، خواص مشابه تری نسبت به نواحی تحت تاثیر حرارت دارند لذا رفتار حالات مختلف در این مرحله از رشد، مشابه یکدیگر است و مقدار تفاوت بین عمر در حالات مختلف جوشکاری بیشتر ناشی از رشد ترک منحرف شده تا رسیدن به سطوح اتصال می باشد زیرا در این نواحی توزیع تنش پسماند و حرارت ایجاد شده متفاوت می باشد، همچنین با توجه به کوچک بودن نمونه ها و آزاد شدن تنش پسماند بعد از تعدادی سیکل، تنش پسماند اثر خود را تنها در مراحل اولیه رشد ترک می گذارد و در قسمت عمده رشد ترک در حالات مختلف جوشکاری تفاوت عمده ای وجود ندارد. لذا با توضیحات ارائه شده اختلاف عمر در سطوح بار پایین ناشی از اختلاف در مراحل اولیه رشد است و همانطور که مشاهده می شود در این نواحی عمر نمونه ها مشابه تر شده و شیب کلی نمودارها نیز تغییر می کند. تفاوت سطوح شکست و نوع واماندگی در سطوح بار مختلف در حالت جوشکاری با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه در



Fig. 10.

شکل ۱۰: رشد ترک در ورق و واماندگی نهایی برشی در سطح بار ۵۰ درصد در حالت جوشکاری ۱۰۰۰ دور بر دقیقه.

- (2012) 350-357.
- [5] Y. Tozaki, Y. Uematsu, K. Tokaji, Effect of processing parameters on static strength of dissimilar friction stir spot welds between different aluminium alloys, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 30(2) (2007) 143-148.
- [6] Z. Zhang, X. Yang, J. Zhang, G. Zhou, X. Xu, B. Zou, Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy, *Materials & Design*, 32(8) (2011) 4461-4470.
- [7] H. Rao, W. Yuan, H. Badarinarayan, Effect of process parameters on mechanical properties of friction stir spot welded magnesium to aluminum alloys, *Materials & Design* (1980-2015), 66 (2015) 235-245.
- [8] S. Bozzi, A. Helbert-Etter, T. Baudin, V. Klosek, J. Kerbiguet, B. Criqui, Influence of FSSW parameters on fracture mechanisms of 5182 aluminium welds, *Journal of Materials Processing Technology*, 210(11) (2010) 1429-1435.
- [9] M. Merzoug, M. Mazari, L. Berrahal, A. Imad, Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys, *Materials & Design*, 31(6) (2010) 3023-3028.
- [10] S. Chowdhury, D. Chen, S. Bhole, X. Cao, P. Wanjara, Lap shear strength and fatigue life of friction stir spot welded AZ31 magnesium and 5754 aluminum alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 556 (2012) 500-509.
- [11] S. Chowdhury, D. Chen, S. Bhole, X. Cao, P. Wanjara, Lap shear strength and fatigue behavior of friction stir spot welded dissimilar magnesium-to-aluminum joints with adhesive, *Materials Science and Engineering: A*, 562 (2013) 53-60.
- [12] Z. Shen, X. Yang, S. Yang, Z. Zhang, Y. Yin, Microstructure and mechanical properties of friction spot welded 6061-T4 aluminum alloy, *Materials & Design* (1980-2015), 54 (2014) 766-778.
- [13] J. Chi-Sung, H. Sung-Tae, K. Yong-Jai, C. Hoon-Hwe, H.N. Han, Material properties of friction stir spot welded joints of dissimilar aluminum alloys, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22 (2012) s605-s613.
- [14] Y.-C. Lin, J.-N. Chen, Influence of process parameters on friction stir spot welded aluminum joints by various threaded tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 225 (2015) 347-356.
- [15] Y. Uematsu, K. Tokaji, Y. Tozaki, T. Kurita, S. Murata, Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behaviour of friction stir spot welded joints in Al-Mg-

دور بر دقیقه تفاوتی از نظر اندازه ذرات و چپش آن‌ها وجود دارد. لذا مطابق نتایج بدست آمده از میکروسختی در شکل ۸ مقدار سختی گزارش شده در دو حالت ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کمتر از ۷۵۰ دور بر دقیقه است [۳۰].

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر میکروسختی نواحی مختلف، استحکام استاتیکی و رفتار خستگی جوش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-تی-۶ در سه سرعت دوران ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه آزمایش و تحلیل شده و مناسب‌ترین حالت آن‌ها تعیین شده‌است.

با توجه به پروفیل سختی بدست آمده در حالات مختلف، با فاصله گرفتن از مرکز جوش مقادیر سختی به یکدیگر نزدیک‌تر شده و در نقاط بعد از شانه این اختلاف بسیار ناچیز می‌شود.

بر اساس نتایج بدست‌آمده در استحکام استاتیکی و خستگی اتصال در این پژوهش، از بین سه سرعت تحلیل شده، سرعت دوران ۱۰۰۰ دور بر دقیقه بهترین عملکرد را از خود نشان داده‌است. همچنین روند بهبود عملکرد در حالت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه چه در استحکام استاتیکی و چه در رفتار خستگی بسیار چشم‌گیر بوده‌است.

در تمامی حالات مختلف جوشکاری، واماندگی در حالت بارگذاری استاتیکی بصورت برش و جدایش از ناحیه دکمه جوش است ولی واماندگی در بارگذاری خستگی در سطح بارهای بالا بصورت جدایش از ناحیه دکمه جوش و در سطح بارهای پایین ترک منحرف شده تا سطح ورق و سپس گسترش در ورق بصورت عمود بر جهت بارگذاری است و در سطح بارهای متوسط هر دو مکانیزم رشد ترک وجود دارد، ولی واماندگی نهایی برش دکمه جوش است.

شیب نمودار خستگی حالت جوشکاری ۱۰۰۰ دور بر دقیقه با دیگر حالات متفاوت است و در سیکل‌های کمتر عملکرد بهتری نشان می‌دهد که با توجه به مکانیزم واماندگی در سطوح بار بالا قابل توجیه است. با توجه به پژوهش‌های مشابه انجام شده بر روی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ شرایط جوشکاری اعمال شده در این تحقیق نتایج مناسبی نشان می‌دهند.

منابع

- [1] <http://www.twi-global.com/capabilities/joining-technologies/friction-processes/friction-stir-welding/>.
- [2] R.S. Mishra, Z. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50(1) (2005) 1-78.
- [3] M.m. release, Mazda develops world's first aluminum joining technology using friction heat, <http://www.mazda.com/publicity/release/0227e.html>, (2003).
- [4] Y.-C. Lin, J.-J. Liu, B.-Y. Lin, C.-M. Lin, H.-L. Tsai, Effects of process parameters on strength of Mg alloy AZ61 friction stir spot welds, *Materials & Design*, 35

- strength of spot & weld joints, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 31(9) (2008) 766-776.
- [23] S. Mirsalehi, A. Kokabi, Fatigue life estimation of spot welds using a crack propagation-based method with consideration of residual stresses effect, *Materials Science and Engineering: A*, 527(23) (2010) 6359-6363.
- [24] S.R. Ahmadi, S. Hassanifard, M.M. Pour, Fatigue life prediction of friction stir spot welds based on cyclic strain range with hardness distribution and finite element analysis, *Acta Mechanica*, 223(4) (2012) 829-839.
- [25] Handbook, Vol2: Properties and Selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials, ASM International, Materials, Park, OH, (1990).
- [26] Handbook, Vol 4: Heat treating, ASM International, Materials Park, OH, (1991).
- [27] Standard, BS EN ISO 14273: Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot, seam and embossed projection welds, in, London, 2001.
- [28] Standard, in: BS/EN/ ISO 14324: Resistance spot welding-Destructive tests of welds-Method for fatigue testing of spot welded joints, British Standard, 2003.
- [29] Standard, ASTM E384, Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2000).
- [30] Handbook, Vol 9: Metallography and Microstructures, ASM International, Materials Park, OH, (2004).
- Si alloy, *International Journal of Fatigue*, 30(10) (2008) 1956-1966.
- [16] S. Venukumar, S. Muthukumaran, S.G. Yalagi, S.V. Kailas, Failure modes and fatigue behavior of conventional and refilled friction stir spot welds in AA 6061-T6 sheets, *International Journal of Fatigue*, 61 (2014) 93-100.
- [17] S. Venukumar, B. Baby, S. Muthukumaran, S.V. Kailas, Microstructural and Mechanical Properties of Walking Friction Stir Spot Welded AA 6061-T6 Sheets, *Procedia Materials Science*, 6 (2014) 656-665.
- [18] Y. Uematsu, K. Tokaji, Y. Tozaki, Y. Nakashimac, Fatigue behaviour of dissimilar friction stir spot weld between A6061 and SPCC welded by a scrolled groove shoulder tool, *Procedia Engineering*, 2(1) (2010) 193-201.
- [19] Y. Uematsu, T. Kakiuchi, Y. Tozaki, Fatigue behavior of dissimilar friction stir spot welds between A6061 and AZ31 fabricated by a scroll grooved tool without probe, in: *Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding: Osaka, Japan, 6-8 November 2013*, Woodhead Publishing, 2014, pp. 213.
- [20] P.-C. Lin, Z.-M. Su, R.-Y. He, Z.-L. Lin, Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in cross-tension specimens of aluminum 6061-T6 sheets, *International Journal of Fatigue*, 38 (2012) 25-35.
- [21] D.-A. Wang, C.-H. Chen, Fatigue lives of friction stir spot welds in aluminum 6061-T6 sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, 209(1) (2009) 367-375.
- [22] A.H. Ertas, F.O. Sonmez, A parametric study on fatigue