



بررسی اثر پارامترهای فرآیند جوشکاری با گاز محافظ تنگستن بر خواص مکانیکی و ریزساختار نانو کامپوزیت زمینه فلزی Al6061/Al₂O₃

صاحبعلی منافی^{*}، مسلم برومند^۱ و ایمان فرح بخش^۲

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود، شاهرود، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۵/۱۱/۲۷، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۶/۰۱/۱۶، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۶/۰۲/۲۶

چکیده

در این پژوهش به بررسی اثر پارامترهای فرآیند جوشکاری با گاز محافظ تنگستن بر خواص مکانیکی و ریزساختار نانو کامپوزیت زمینه فلزی Al6061/Al₂O₃ پرداخته شد. نانو کامپوزیت مورد استفاده از روش متالورژی پودر تهیه و جوشکاری نمونه با استفاده از دستگاه AC/DC با جریان ۴۰۰ آمپر و پالس مسقیم انجام شد. با هدف بررسی مورفولوژیکی، سختی، استحکام کششی و خمشی به ترتیب از آنالیزهای SEM، تست سختی ویکرز و آزمون کشش طبق استاندارد (2013) ASME SEC IX استفاده شده است. بدلیل نرخ حرارت مناسب در جوشکاری TIG ریزساختار به صورت همگن و ذرات آلومینا ریزتر شدند. سختی منطقه جوش به ترتیب ۸۲/۴، ۸۵/۸ و ۸۰/۳ برآورد شد که در نهایت میانگین این مقادیر برابر ۸۲/۸ اندازه گیری شد. این مقادیر برای نقاط ذکر شده در فلز پایه به ترتیب ۶۵/۷، ۷۰/۷ و ۷۲/۴ با میانگین ۶۹/۶ برآورد شد. استحکام در بیشینه بارگذاری ۱/۶ kN نمونه در محدود ۸۱ MPa شروع به ازدیاد طول کرده و در نهایت در نقطه ۱۵۱ MPa دچار شکست شد. بیشینه بارگذاری ۱/۷ kN قطعه از حدود ۸۴ MPa قطعه شروع به ازیاد طول کرده و در نهایت در ۱۵۵ MPa دچار شکست شد.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری TIG، نانو کامپوزیت Al6061/Al₂O₃، سختی، استحکام.

۱- مقدمه

برای کاربردهای پیشرفته ساختاری دارند بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. آلومینیم رایج‌ترین زمینه فلزی برای کامپوزیت‌های زمینه فلزی است. کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی از سال ۱۹۲۰ به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و در سال ۱۹۸۰ صنایع حمل و نقل، توسعه و ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی با تقویت کننده‌های

کامپوزیت‌های زمینه فلزی موادی هستند که از تقویت کننده‌های سرامیکی و یا ترکیبات بین فلزی در یک زمینه انعطاف پذیر از یک فلز یا آلیاژ تشکیل می‌شوند. در حال حاضر این نوع از کامپوزیت‌ها بدلیل پتانسیل بالایی که

* عهده‌دار مکاتبات: صاحبعلی منافی

نشانی: شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، گروه مهندسی مواد

تلفن: ۰۲۳-۳۲۳۹۴۲۸۳، دورنگار: ۰۲۳-۳۲۳۹۴۲۸۳، پست الکترونیکی: a_manafi@iau-shahrood.ac.ir

غیرپیوسته را آغاز کرد. این نوع از کامپوزیت‌ها به خاطر خواص مکانیکی ایزوتروپ و هزینه پایین تر تولید بسیار جذاب هستند. یکی از فرآیندهای نسبتاً جدید در تولید کامپوزیت‌ها روش درجا است که ذرات فازهای تقویت کننده توسط واکنش‌های شیمیایی تشکیل می‌شوند. جوشکاری تحت پوشش گازهای محافظ با الکتروود تنگستن (Tungsten Inert Gas) [۱،۲] در زمره پروسه‌های جوشکاری حالت مذاب می‌باشد. در جوش‌های حالت مذاب برخلاف فرآیندهای حالت جامد که محل اتصال در نتیجه ذوب موضعی دو قطعه و تداخل آنها و عمل انجماد با تشکیل فاز مذاب (Melting phase) انجام می‌شود. منطقه تحت حرارت قرار گرفته (HAZ: Heat Affected Zone) منطقه‌ای که گرم می‌شود و ریزساختار، خواص فیزیکی و مکانیکی آن دستخوش تغییر زیادی می‌شود. ناحیه تحت تاثیر قرار گرفته شده به طور مکانیکی و حرارتی (TMAZ: Thermo Mechanically Affected Zone) این ناحیه هم تحت تاثیر حرارت قرار دارد و هم تغییر فرم پلاستیکی در آن اتفاق می‌افتد. ندرتا در برخی از جوشکاری‌های فشاری سرد، ممکن است TMAZ وجود داشته باشد. به طور کلی جوشکاری تحت پوشش گازهای محافظ با الکتروود تنگستن بر اساس تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی گرمایی استوار است که دو قسمت مورد اتصال را به هم متصل می‌کند [۳-۸].

فرآیند جوشکاری TIG بهترین روش برای اتصال صفحات و سطوح مختلف با ضخامت ۴-۵ mm است. قطعات ضخیم تر هم با قابلیت چند پاس بودن روش TIG که قابلیت اتصال را دارند البته در این سطوح ایجاد گرمای زیاد منجر به کاهش خواص مکانیکی فلز پایه و اعوجاج در فلز پایه می‌شود. در جوشکاری به روش TIG با کیفیت بالا خواص بدست آمده می‌تواند ناشی از کنترل درجه حرارت بالای جوش در حین ورود حرارت و پرکننده‌ها به طور جداگانه باشد. کامپوزیت‌های پایه فلزی آلومینیمی تقویت شده با ذرات سرامیکی توسط فرآیندهای ذوب کاری به یکدیگر

اتصال داده می‌شوند [۲]. اگر چه روش‌های جوشکاری ذوب سنتی به این گونه مواد آسیب می‌رساند که ناشی از انبساط حرارتی و هدایت گرمایی بالا، ترکیب بالای گاز در حالت مذاب و ایجاد ترک ناشی از ذرات اکسید می‌باشد. وجود ذرات سرامیکی نیز باعث ایجاد مشکلاتی در جوشکاری می‌گردد که می‌توان به بالا بردن ویسکوزیته مذاب، وجود تنش‌های پسماند به خاطر ضریب انبساط حرارتی متفاوت و جدایش ذرات در هنگام سرد شدن اشاره کرد. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در خصوص بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی صورت گرفته است. از این بین Arivarasu و همکاران [۹] خواص کشش عرضی آلیاژ Al6061 جوش داده شده به روش جوشکاری تحت پوشش گازهای محافظ با الکتروود تنگستن و تاثیر عملیات حرارتی روی خواص جوش، قبل از جوش و پس از جوش با عملیات حرارتی محلولی پیر شده با شرایط $(530^{\circ}\text{C}/1\text{h} + 170^{\circ}\text{C}/12\text{h})$ را بررسی نمودند. نتایج بیانگر کاهش استحکام جوش آلیاژ نسبت به فلز پایه بعد از فرآیند جوشکاری بود. Wang و همکاران [۱۰] به منظور بهبود استحکام کششی از دست رفته جوش روی نمونه‌های جوشکاری تحت پوشش گازهای محافظ با الکتروود تنگستن شده عملیات حرارتی انجام دادند $(121^{\circ}\text{C}/24\text{h})$. نتایج عملیات حرارتی (Heat treatment) مجدد نشان داد که استحکام تسلیم در جوش بهبود یافته اما استحکام نهایی دچار کاهش شد. افزایش استحکام تسلیم (Yield strength) نمونه‌های پس از جوشکاری ناشی از افزایش رسوبات سخت شده بود در حالی که کاهش شکل پذیری با افزایش رسوبات سخت شده و توسعه رسوبات آزاد در مرزخانه‌ها مرتبط است [۱۱-۱۷].

James و Mahoney [۱۸] به بررسی تنش‌های باقیمانده در Al-Li، Al7050 و Al2219 جوش داده شده به روش جوشکاری تحت پوشش گازهای محافظ با الکتروود تنگستن پرداختند. طبق نتایج آنها تنش‌های باقیمانده در تمام جوشکاری‌های تحت پوشش گازهای محافظ با الکتروود

محل جوش انجام شد. به منظور سختی‌سنجی سطح جوش نیز آزمون سختی‌سنجی به روش ویکرز انجام شده است.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد

آلومینیم به کار گرفته شده در این تحقیق از گروه ۶۰۰۰ و شمش آلومینیمی ۶۰۶۱ بوده و ترکیب شیمیایی این نمونه در جدول ۱ نشان داده شده است. آلومینای مورد استفاده با مش‌بندی ۳ میکرون و به مقدار ۲۰ درصد وزنی در نظر گرفته شد. ابعاد در نظر گرفته شده برای ورق‌های آلومینیمی تقویت شده با آلومینا برابر با $100 \times 50 \times 5$ mm³ می‌باشد که دارای ضخامت ۵ mm بود.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی شمش آلومینیمی ۶۰۶۱ [۱۲].

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
۰/۶۵	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۹۵	۰/۰۰۹	۰/۰۳	۰/۱۸

۲-۲- نحوه جوشکاری نانو کامپوزیت

در این پژوهش جهت انجام جوشکاری از دستگاه جوش آرگون مدل AC/DC با توان ۴۰۰ آمپر استفاده شده است. به این صورت که پس از جدا نمودن قطعه از وسط با استفاده از قیچی مخصوص برش قطعه به دو قسمت تقسیم شد و در ادامه با استفاده از جریان مستقیم با الکتروود منفی و سیم جوش SW100S NiMoCr عملیات جوشکاری انجام شد. در این حالت، گرمای بیشتری وارد قطعه کار شده و در نتیجه نرخ ذوب افزایش پیدا می‌کند و منجر به اتصال قطعات جدا شده می‌شود. نمونه‌هایی از قطعات جوشکاری شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

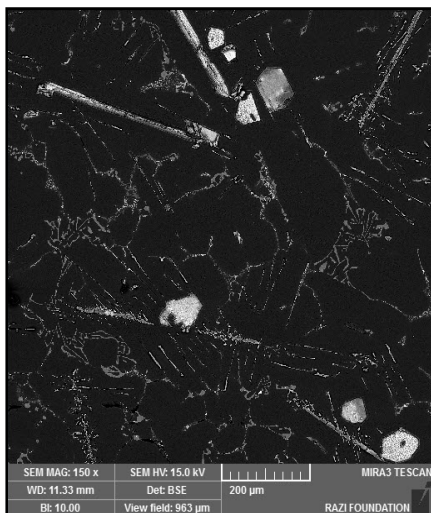
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی‌های مورفولوژیکی

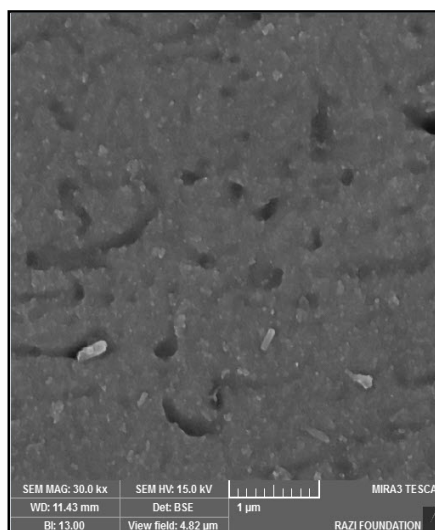
به منظور بررسی مورفولوژی قطعه جوش داده شده و نحوه

تنگستن در قیاس با بقیه جوشکاری‌های ذوبی کمتر برآورد شد. همچنین تحول بین تبلور مجدد کامل و قسمتی از نواحی تبلور مجدد بوده، تنش‌های باقیمانده در نواحی جوش مشاهده شد. جانت و همکاران [۱۹] به مقایسه تکنیک‌های جوشکاری قوس تنگستن تحت پوشش گاز محافظ (TIG)، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) و جوشکاری تحت پوشش گاز محافظ با الکتروود مصرفی (MIG) و تاثیر هر فرآیند بر خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژهای آلومینیم ۶۰۶۱ و ۵۰۸۳ پرداختند. نتایج نشان داد که خواص کششی اتصال‌های جوش آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ و ۶۰۶۱ توسط تکنیک جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی نسبت به سایر روش‌های ذوبی ذکر شده بالاتر می‌باشد. اتصالات تهیه شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، خواص مکانیکی و متالورژیکی نسبتاً عالی در مقایسه با تکنیک‌های TIG و MIG از خود نشان داد. میکروسختی در منطقه متأثر از حرارت (HAZ) تا حدودی کمتر و در منطقه جوش بیشتر گزارش شد. میزان میکروسختی در منطقه جوش اتصال FSW، نسبت به جوش در روش‌های MIG و TIG، مقدار بیشتری از خود نشان داد. در این پژوهش کامپوزیت مورد استفاده از روش متالورژی پودر تولید شده است. در این روش، پودرهای آلیاژی یا خالص فلزی با نانوذرات مخلوط می‌گردند و سپس با پرس کردن ذرات پودر در داخل قالب و تف‌جوشی، ذرات پودری به یکدیگر متصل می‌شوند و با کاهش درصد حفره‌ها، چگالی افزایش می‌یابد. روش متالورژی پودر در مقایسه با روش ریخته‌گری دارای مزایای زیر می‌باشد: در حالت جامد-جامد، واکنش بین فاز دوم و زمینه به حداقل مقدار ممکن می‌رسد. امکان کنترل دقیق حجم فاز دوم به این روش ممکن است. امکان کنترل ضریب انبساط حرارتی و مدول کامپوزیت متناسب با کاربرد آن در این روش وجود دارد. در حالت جامد-جامد، واکنش بین فاز دوم و زمینه به حداقل مقدار ممکن می‌رسد [۱۲-۱۵].

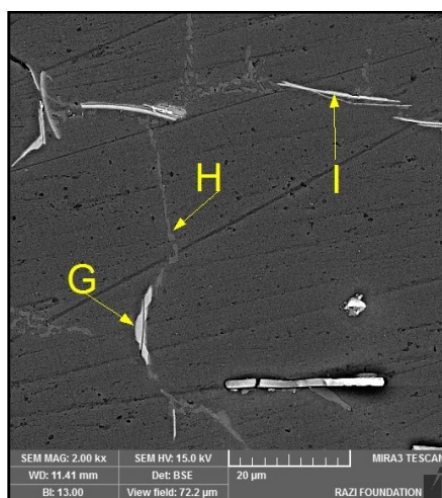
با هدف بررسی مقاومت جوش، آزمون کشش و خمش روی



شکل ۲: تصویر SEM پراکندگی ذرات آلومینا در زمینه.



شکل ۳: SEM نانوکامپوزیت جوشکاری شده با بزرگنمایی بالا.



شکل ۴: تصویر SEM منطقه HAZ و TAMZ.



شکل ۱: قطعه جوشکاری شده.

پراکنده شدن ذرات آلومینا در زمینه نانوکامپوزیتی از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ نوری (OM) جوش بدست آمده نشان می‌دهد که در ناحیه مرکزی جوش بدلیل تمرکز دما نسبت به دیگر نواحی افزایش یافته و شرایط برای انحلال ذرات آلومینا فراهم شده است.

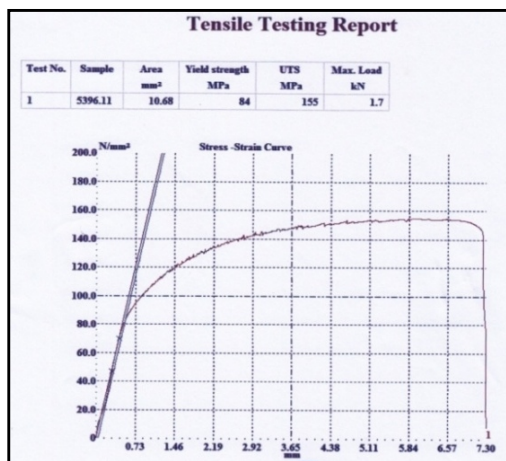
با توجه به وجود شرایط تبلور مجدد، در این ناحیه دانه‌های جدید با اندازه بسیار ریزتر از دانه‌های فلز پایه متبلور می‌شوند که باعث توزیع همگن ذرات تقویت کننده در زمینه شده است، در شکل ۲ ناحیه جوش به علت افزایش دما نسبت به دیگر نواحی و به وجود آمدن تبلور مجدد شرایط برای انحلال ذرات آلومینا فراهم شده است.

افزایش دمای ناحیه جوشکاری منطقه متأثر از حرارت (HAZ) نیز تاثیرگذار است. در این ناحیه با افزایش دما شرایط برای رشد رسوبات موجود در ساختار مهیا است. با توجه به این که منطقه HAZ به منطقه‌ای اطلاق می‌شود که دانه‌ها حد وسط بین دو ناحیه فلز جوش و فلز پایه می‌باشند، در تصاویر به خوبی هر دو ناحیه مشخص می‌باشد. همچنین با استفاده از پارامترهای مناسب جوشکاری TIG ناحیه مخلوط نشده به طور کامل حذف شد.

۳-۲- خواص مکانیکی

جهت بررسی سختی سنجی از آزمون سختی سنجی به روش ویکرز (VH) استفاده شد. در این آزمون از دستگاه موجود

در نهایت مشخص شد بعد از فرآیند جوشکاری میزان سختی به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. در این آزمون از دستگاه موجود در بنیاد علوم کاربردی رازی و طبق استاندارد (2013) ASME-SEC IX استفاده شده است. با توجه به منحنی شکل ۵ که مربوط به نمونه قطعه نانو کامپوزیتی جوشکاری شده است. مشخص شد مقدار استحکام در بیشینه بارگذاری ۱/۶ kN نمونه در محدود ۸۱ MPa شروع به ازدیاد طول کرده و در نهایت در نقطه ۱۵۱ MPa دچار شکست شد. در نمودار نمونه شماره ۲ که مربوط به منطقه جوش بود با توجه منحنی تنش- کرنش مربوط به قطعه در بیشینه بارگذاری ۱/۷ kN قطعه از حدود ۸۴ MPa شروع به ازدیاد طول کرده و در نهایت در ۱۵۵ MPa دچار شکست شده است. این موضوع بیانگر این واقعیت است که منطقه جوش نسبت به نانو کامپوزیت یا فلز پایه دارای استحکام نسبتاً بالاتری است که این موضوع به واسطه افزایش دانسیته و کاهش تخلخل‌ها در این منطقه است.



شکل ۵: منحنی تنش-کرنش مربوط به نمونه نانو کامپوزیت جوش داده شده.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش ریزساختار نانو کامپوزیت زمینه فلزی Al6061/Al₂O₃ با استفاده از گاز محافظ TIG مورد بررسی

به روش میکروویکیترز (VH) و طبق استاندارد ISO 65075-1 (2005) انجام شده است. سختی از مرکز جوش تا فاصله ۱۰ mm در دو طرف جوش اندازه گیری شده است، که سختی دو طرف جوش (۶۹/۶ VH) و سختی در مرکز جوش (۸۲/۸ VH) می باشد. علت این است که در کلیه جوش‌ها، سختی در نواحی تحت تاثیر حرارت و ترمومکانیکال نسبت به فلز پایه شروع به کاهش کرده تا این که در ناحیه جوش مقدار سختی شروع به افزایش می کند. علت افزایش سختی در ناحیه جوش ناشی از اندازه دانه و کارسختی باقیمانده می باشد. وانگ نیز در گذشته نشان داده بود که کمترین سختی در مرکز ناحیه جوش قرار ندارد بلکه در ۱۰ mm از مرکز جوش واقع است. آریوراسو و همکارانش [۱۰] میکروسختی در منطقه متاثر از حرارت (HAZ) تا حدودی کمتر و در منطقه جوش بیشترین مقدار سختی را گزارش دادند. این ناحیه دارای دانسیته پایینی از ذرات درشت و دانسیته بالایی از ذرات ریز می باشد. به منظور بررسی میزان کشش از نمونه فلز پایه و جوش داده شده آزمون کشش به عمل آمد که نتایج در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: سختی سنجی مربوط به فلز پایه و جوش داده.

ردیف	موقعیت سختی سنجی	عدد سختی (HV)		
		نقطه ۱	نقطه ۲	نقطه ۳
۱	جوش	۸۲/۴	۸۵/۸	۸۰/۳
۲	پایه	۶۵/۷	۷۰/۷	۷۲/۴

با توجه به جدول ۲، در سه نقطه از فلز پایه و منطقه جوش آزمون سختی سنجی ویکرز انجام شد. با توجه به بررسی های انجام شده در نقاط ۱، ۲ و ۳ عدد سختی بدست آمده برای منطقه جوش به ترتیب ۸۲/۴، ۸۵/۸ و ۸۰/۳ VH برآورد شد که در نهایت میانگین این مقادیر برابر ۸۲/۸ VH اندازه گیری شد. این مقادیر برای نقاط ذکر شده در فلز پایه به ترتیب ۶۵/۷، ۷۰/۷ و ۷۲/۴ VH با میانگین ۶۹/۶ VH برآورد شد.

مراجع

- و مقایسه قرار گرفت. مهمترین نتایج این بررسی به صورت خلاصه در زیر آورده شده است:
- ۱- با استفاده از پارامترهای مناسب جوشکاری TIG ناحیه مخلوط نشده به طور کامل حذف شد.
 - ۲- بدلیل نرخ حرارت مناسب در جوشکاری با گاز محافظ تنگستن (TIG) ریزساختار به صورت همگن و ذرات آلومینا ریزتر شدند.
 - ۳- عدد سختی بدست آمده برای منطقه جوش به ترتیب ۸۲/۴، ۸۵/۸ و ۸۰/۳ VH برآورد شد که در نهایت میانگین این مقادیر برابر ۸۲/۸ VH اندازه گیری شد. این مقادیر برای نقاط ذکر شده در فلز پایه به ترتیب ۶۵/۷، ۷۰/۷ و ۷۲/۴ VH با میانگین ۶۹/۶ VH برآورد شد.
 - ۴- در ناحیه مرکزی جوش بدلیل تمرکز دما نسبت به دیگر نواحی افزایش یافته و شرایط برای انحلال ذرات آلومینا فراهم شده است.
 - ۵- مشخص شد مقدار استحکام در بیشینه بارگذاری ۱/۶ kN نمونه در محدود ۸۱ MPa شروع به ازدیاد طول کرده و در نهایت در نقطه ۱۵۱ MPa دچار شکست شد.
- [1] S.K. Mazumdar, "Composites manufacturing materials, product and process engineering", CRC Press LLC, 2002.
- [2] N. Chawla, K.K. Chawla, "Metal matrix composites", Springer, place, 2006.
- [3] S. Basavarajappa, G. Chandramohan, K. Mukund, M. Ashwin, M. Prabu, "Dry sliding wear behavior of Al2219/SiCp-Gr hybrid metal matrix composites", ASM. Int. 15 (2006) 668-674.UK: Cambridge University Press; 1995.
- [4] J.K. Shang, R.O. Ritchie, *Acta Metall.*, **37**, 1989, 2267.
- [5] J.K. Shang, R.O. Ritchie, *Mater. Sci.*, **102**, 1988, 181.
- [6] W.A. Lodgson, *Eng Fract Mech.*, **24**, 1986, 737.
- [7] D.F. Watt, X.Q. Xu, D. Lloyd, *Acta Mater.*, **44**, 1996, 789.
- [8] M. Papakyriacou, H.R. Mayer, S.E. Tschegg-Stanzl, M. Grosch, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, **18**, 1995, 477.
- [9] M. Arivarasu, K.D. Ramkumar, N. Arivazhagan, *Procedia Engineering*, **97**, 2014, 871.
- [10] Z. Wang, F.H. Wohlber, *Key Engineerng Materials*, **107**, 1995, 765.
- [11] S. Kumai, E.J. King, J.F. Knott, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, **13**, 1990, 511.
- [12] M. Fonte, F. Romeiro, *Int. J. Fatigue*, **29**, 2007, 1971.
- [13] S. Dinda, D. Kujawski, *Engineering Fracture Mechanics*, **71**, 2004, 1779.
- [14] M.A. Fonte, S.E. Stanzl-Tschegg, B. Holper, E.K. Tschegg, A.K. Vasudevan, *Int. J. Fatigue*, **23**, 2001, 311.
- [15] M. Da-Fonte, F. Romeiro, M. de-Freitas, S.E. Stanzl-Tschegg, E.K. Tschegg, *Int. J. Fatigue*, **25**, 2003, 1209.
- [16] F.S. Silva, *Int. J. Fatigue*, **26**, 2004, 241.
- [17] F.S. Silva, *Int. J. Fatigue*, **27**, 2005, 1441.
- [18] M. James, M. Mahoney, "Residual Stress Measurements in Friction Stir Welded Aluminum Alloys", 1st International Friction Stir Welding Symposium, 14-16 June, 1999.
- [19] S. Jannet, P.K. Mathews, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **61**, 2013, 181.