



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۲۰۷ تا ۲۱۴
Vol. 48, No. 2, Summer 2016, pp. 207-214



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک

AmirKabir Journal of Science & Research
Mechanical Engineering
ASJR-ME

بررسی تاثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی شکل پذیری ورق های ترکیبی آلومینیم

رسول صفدریان^{*۱}

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان

(دریافت: ۱۳۹۴/۳/۲۶ پذیرش: ۱۳۹۴/۸/۳۰)

چکیده

ورق ترکیبی آلومینیم متشکل از دو یا چند نوع ورق آلومینیم است که با یکی از فرایندهای جوشکاری به صورت لب به لب بهم جوش می شود. ورق های ترکیبی آلومینیم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا کاربرد زیادی در صنایع مختلف از جمله صنعت خودروسازی دارند. روش های مختلفی برای جوشکاری ورق های آلومینیم بهم وجود دارد، اما روش های جوشکاری ذوبی به دلیل اینکه سبب تشکیل فازهای ترد در حوضچه مذاب می شوند باعث کاهش استحکام جوش می شوند. یکی از روش های جوشکاری جایگزین، جوشکاری اصطکاکی است. پارامترهای جوشکاری اصطکاکی تاثیر زیادی در کیفیت جوش دارند. در تحقیق حاضر تعدادی از مهمترین پارامترهای جوشکاری مورد بررسی قرار گرفته اند. این پارامترها شامل نوع ابزار جوشکاری اصطکاکی، سرعت دورانی ابزار و سرعت حرکت خطی ابزار است. از آنجائیکه ورق های ترکیبی در فرایندهای شکل دهی تحت فرایندهای شکل دهی خارج از صفحه قرار می گیرند، در تحقیق حاضر از آزمون سنبه سرکروی (اریکسون) برای بررسی کیفیت جوش استفاده می شود. بر همین اساس یک طراحی آزمایش به روش تاگوچی انجام می شود و تعدادی نمونه ورق ترکیبی آلومینیم جوش می شوند. فلزات پایه ورق ترکیبی، آلومینیم ۶۰۶۱ و ۵۱۸۲ هستند. نتایج تحقیق حاضر نشان می دهد که نوع ابزار جوشکاری تاثیر زیادی در کیفیت جوش دارد. افزایش سرعت دورانی ابزار سبب افزایش کیفیت جوش و خاصیت شکل پذیری ورق ترکیبی می شود.

کلمات کلیدی:

ورق ترکیبی آلومینیم، جوشکاری اصطکاکی، آزمون شکل دهی اریکسون، کرنش بیشینه.

۱- مقدمه

یک ورق ترکیبی متشکل، از دو یا چند ورق با ضخامت یا استحکام متفاوت هستند که به هم جوش شده‌اند. طراحان خودرو به دنبال یافتن روش‌هایی جدید برای کاهش وزن خودرو و همچنین کاهش هزینه ساخت هستند تا از این طریق میزان مصرف سوخت را کاهش دهند و در دنیای رقابتی خودرو باقی بمانند. یک راه برای دستیابی به این نیاز ظاهراً متناقض، استفاده از لوح‌های ترکیبی در بدنه خودرو است [۱].

بیشتر تحقیقات انجام‌شده بر روی ورق‌های ترکیبی در زمینه شکل‌دهی و کاربردهای این نوع ورق‌ها در صنایع مختلف است. تعدادی از تحقیقات که مرتبط به موضوع مورد بررسی تحقیق حاضر و در زمینه شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی است در ادامه ارائه می‌شوند. شای و همکاران [۲ و ۳] شرایط بهینه و مناسب برای بدست آوردن جوش مناسبی که شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی را افزایش دهد بررسی کردند. آنها بر اساس آزمایش‌های تجربی پیشنهاد کردند که نسبت حد ضخامت و نسبت حد استحکام نباید بیشتر از حد کرنش ورق نازکتر باشند. چین و همکاران [۴ و ۵] برای پیش‌بینی شروع گلوبی شدن لوح ترکیبی آلومینیم ۵۷۵۴ از معیار دو شاخه‌ای‌شدن استفاده کردند. در تحلیل آنها از یک مدل اجزای محدود همراه با یک مدل تئوری برای پیش‌بینی شکست استفاده شد. چنگ و همکاران [۶] فهمیدند که هر چه نسبت ضخامت بیشتر باشد، منحنی حد شکل‌دهی در سطح پایین‌تری قرار دارد. یافته‌ها نشان می‌دهند که حداقل کرنش بیشینه با افزایش نسبت ضخامت کاهش می‌یابد. صفدریان و همکاران [۷] در تحقیقی به بررسی تاثیر نسبت استحکام ورق‌های ترکیبی جوشکاری‌شده به‌وسیله لیزر بر روی سطح منحنی حد شکل‌دهی پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد با افزایش نسبت ضخامت ورق‌های ترکیبی، سطح منحنی حد شکل‌دهی کاهش می‌یابد. صفدریان و همکاران [۸] در تحقیق دیگری به بررسی تاثیر پارامترهای جوشکاری لیزر بر روی میزان شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی فولادی پرداختند. آنها از آزمون سنبه سر کروی (اریکسون) برای بررسی شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی استفاده کردند. استاسیکند و همکاران [۹] در تحقیقی شکل‌پذیری ورق ترکیبی آلومینیوم را بررسی کردند. آلیاژ 4611-T و 5754-O با استفاده از روش‌های متفاوت جوشکاری لیزر و سرعت‌های متفاوت به هم جوش شدند و سپس شکل‌پذیری آنها با استفاده از آزمون کشش و آزمون شکل‌پذیری OSU بررسی شد. شاکری و همکاران [۱۰] ریزساختار شکست در ورق ترکیبی آلومینیوم که توسط جوشکاری لیزر و پرتوالکترونی در شرایط غیر خلا جوش شده بود را بررسی کردند.

جوشکاری اصطکاکی می‌تواند یکی از مهمترین فرایندهای جوشکاری برای اتصال ورق‌های آلومینیم باشد. در واقع این فرایند راه حلی برای غلبه بر تعدادی از مشکلات موجود در جوشکاری ذوبی آلیاژهای آلومینیم است [۱۱]. ایچینوری و همکاران [۱۲] در تحقیقی جوشکاری اصطکاکی ورق ترکیبی آلومینیم و منیزیم را مورد بررسی قرار

دادند. در این تحقیق آنها با تغییر دادن سرعت دورانی و سرعت خطی ابزار جوشکاری، کیفیت ظاهری جوش و زبری سطح جوشکاری را بررسی کردند. نمونه‌های آزمایش در آزمون کشش از منطقه جوش دچار شکست شدند. نتایج این تحقیق نشان داد استحکام تسلیم با افزایش سرعت خطی ابزار جوشکاری، کاهش می‌یابد. میلز و همکارانش [۱۳] در تحقیقی سه نوع ورق آلومینیم متفاوت ۵۱۸۲، ۵۷۵۴ و ۶۰۲۲ را به‌وسیله جوشکاری اصطکاکی به هم متصل کردند و خواص مکانیکی آنها را با فلزات پایه مقایسه کردند. نتایج آزمون کشش نشان داد که شکل‌پذیری ورق ترکیبی ۵۷۵۴/۵۱۸۲ نسبت به فلزات پایه آن بیشتر است. این در حالیست که شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی آلومینیم ۶۰۲۲/۵۱۸۲ و ۶۰۲۲/۵۷۵۴ نسبت به فلزات پایه آنها کمتر است. هنربخش و غریبشاهیان [۱۴] در تحقیقی از روش اجزای محدود برای پیش‌بینی میزان حرارت لحظه‌ای ایجادشده در ورق آلومینیم جوشکاری‌شده به روش FSW استفاده کردند. تاثیر پارامترهای فرایند شامل سرعت دورانی و سرعت خطی ابزار مورد بررسی قرار گرفت. قهرمانی مقدم و همکاران [۱۵] تاثیر سرعت دورانی و خطی ابزار جوشکاری را بر روی میکروساختار، سختی سطحی و تنش پسماند ورق آلومینیم ۲۰۲۴ که به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جوش شدند را بررسی کردند. نتایج آزمون سختی‌سنجی نشان داد که افزایش سرعت دورانی و یا کاهش سرعت پیشروی ابزار، سختی را در ناحیه جوشکاری کاهش می‌دهد. علاوه بر این در این تحقیق از روش پراش اشعه ایکس برای اندازه‌گیری تنشهای پسماند استفاده شد. در تحقیقات داخلی به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق ترکیبی با فلزات پایه متفاوت آلومینیم ۶۰۶۱ و ۵۱۸۲ و همچنین بررسی شکل‌پذیری آنها با آزمون اریکسون پرداخته نشده است.

در تحقیق حاضر ورق ترکیبی آلومینیم متشکل از دو نوع ورق آلومینیم ۶۰۶۱ و ۵۱۸۲ است که با جوشکاری اصطکاکی به هم متصل شده‌اند. از آنجائیکه پارامترهای جوشکاری اصطکاکی تاثیر زیادی بر روی شکل‌پذیری این نوع ورق‌ها دارند، در این تحقیق تاثیر این پارامترها بر روی شکل‌پذیری آنها بررسی می‌شود. مهمترین پارامترهای جوشکاری اصطکاکی شامل سرعت دورانی ابزار جوشکاری، سرعت خطی ابزار و نوع ابزار هستند. برای انجام آزمایش‌های تجربی این تحقیق به‌دلیل زیاد بودن پارامترها و سطوح آنها از طراحی آزمایش به روش تاگوچی استفاده می‌شود. برای بررسی شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی از آزمون شکل‌دهی سنبه سرکروی (اریکسون) استفاده شد. استفاده از این آزمون برای بررسی خواص مکانیکی ورق‌های جوشکاری‌شده برای اولین بار در تحقیق حاضر استفاده می‌شود. سایر محققین در بررسی خواص مکانیکی جوش به انجام آزمون کشش تک محوری اکتفا کرده‌اند. اما از آنجائیکه ورق‌های جوش شده اکثراً در فرایندهای شکل‌دهی خارج از صفحه استفاده می‌شوند، بررسی خواص منطقه جوش با استفاده از آزمون اریکسون از اهمیت دارد. بنابراین بررسی تاثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی دو نوع ورق آلومینیم ۵۱۸۲ و ۶۰۶۱ بر روی خواص مکانیکی و شکل‌پذیری آنها با

بهترین فرایندها برای جوشکاری ورق‌های آلومینیم، جوشکاری اصطکاکی است. در این تحقیق نیز از روش جوشکاری اصطکاکی برای اتصال ورق‌ها استفاده شد (شکل ۲). از آنجاییکه نمونه‌ها پس از جوشکاری باید تحت آزمون شکل‌دهی سنبه سرکروی (اریکسون) قرار گیرند، نمونه‌ها به‌گونه‌ای برش خوردند که برای این آزمون مناسب باشند. نمونه لازم برای آزمون اریکسون باید مربعی به ضلع 100mm باشد. چون نمونه نهایی ورق ترکیبی از جوشکاری دو نیمه ورق آلومینیم ۵۱۸۲ و ۶۰۶۱ حاصل می‌شود، از هر ورق نمونه‌های 50mm×100mm برشکاری شدند تا پس از جوشکاری نمونه نهایی حاصل شود. در تمام نمونه‌ها برشکاری به‌گونه‌ای انجام شد که راستای نورد برای هر دو نیمه ورق ترکیبی یکسان و در راستای خط جوش باشد.

همانطور که قبلاً نیز بیان شد در فرایند جوشکاری اصطکاکی تعدادی پارامتر وجود دارد که مهمترین آنها سرعت دورانی ابزار، سرعت خطی ابزار و هندسه ابزار جوشکاری هستند. در این تحقیق از دو هندسه ابزار سرتخت همراه با پین (هندسه A) و هندسه‌ای که در سر ابزار یک مسیر منحنی برای حرکت مواد به داخل حوضچه جوش در آن ایجاد شده (هندسه B) استفاده شد. هر دو هندسه همراه با پین استفاده شد. شکل ۳ این دو نوع هندسه و همچنین یک هندسه همراه با پین را نشان می‌دهد. پروفیل شانه ابزار علاوه بر تولید گرما، سبب بهبود اتصال بین ابزار و قطعه کار از طریق گیر افتادن مواد پلاستیک در داخل فضای بین دو قطعه در حال جوش می‌شود. شکل ۴ هندسه ابزار ماریچ را از نمای نزدیک نشان می‌دهد. هندسه ابزار A یک شانه دوزنقه‌ای با زاویه ۸ درجه و قطر دایره راس 10mm است. هندسه ابزار B یک شانه دوزنقه‌ای با زاویه ۸ درجه و قطر دایره راس 14mm است. هندسه پین برای هر دو ابزار یکی و دارای قطر 3mm و طول 1mm است. هندسه ماریچ استفاده شده در تحقیق حاضر دارای دو لبه ماریچ در راس مخروط است که مواد را اطراف پین جمع می‌کند و از نوسان ابزار و تشکیل فلش جلوگیری می‌کند. جنس هر دو ابزار استفاده‌شده در تحقیق حاضر فولاد SPK است. سایر پارامترها شامل سرعت دورانی ابزار و سرعت خطی ابزار در سه سطح در نظر گرفته شدند که در جدول ۲ ارائه شده‌اند. بر اساس پارامترها و سطوح گفته شده در جدول ۲ یک طراحی آزمایش به روش تاگوچی انجام شد و با استفاده از آرایه L18 تاگوچی، پارامترهای ۱۸ آزمایش که باید انجام شود مشخص شد و بر اساس آن ۱۸ نمونه جوشکاری شدند. جدول ۳ لیست آزمایش‌ها و پارامترهای آن را نشان می‌دهد.

۴- آزمون شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی

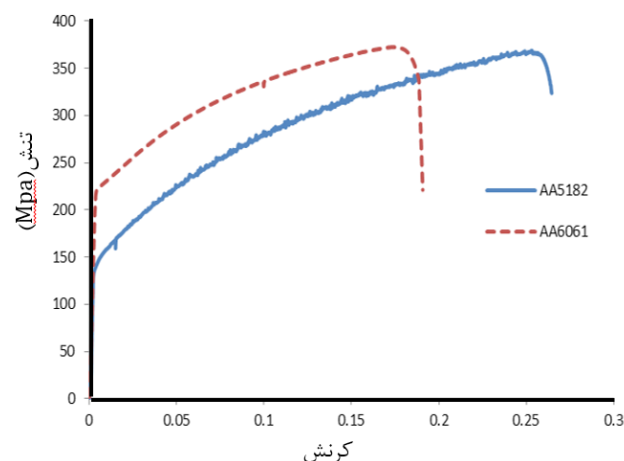
از آنجاییکه ورق‌های ترکیبی در فرایندهای شکل‌دهی تحت شرایط کشش خارج از صفحه قرار می‌گیرند، در این تحقیق از آزمون سنبه سرکروی اریکسون که یک آزمون شکل‌دهی خارج از صفحه است برای بررسی خواص مکانیکی و شکل‌پذیری این نوع ورق‌ها استفاده شد. شکل ۵ نمونه شماتیک و قالب ساخته شده آزمون اریکسون را نشان می‌دهد.

استفاده از آزمون اریکسون نوآوری تحقیق حاضر است. علاوه بر این در تحقیق حاضر با شبکه‌بندی سطح نمونه‌ها، شکل‌پذیری منطقه جوش با استفاده از اندازه‌گیری کرنش‌های منطقه شکست بررسی می‌شود که این مورد نیز نوآوری تحقیق حاضر است.

۲- خواص مکانیکی ورق‌های آلومینیم

از دو نوع ورق آلومینیم ۵۱۸۲ و ۶۰۶۱ که کاربرد زیادی در صنایع خودروسازی و هواپیماسازی دارند در این تحقیق برای تهیه ورق‌های ترکیبی استفاده شد. ورق‌ها دارای ضخامت یکسان 1mm می‌باشند. دلیل استفاده از این ورق‌ها در صنایع مختلف، نسبت استحکام به وزن بالای آنها است.

برای بررسی خواص مکانیکی ورق‌های آلومینیم آزمون کشش تک‌محوری طبق استاندارد ASTM-E8 انجام شد. نتایج آزمون کشش در شکل ۱ آورده شده و خواص مکانیکی این فلزات در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: نتایج آزمون کشش ورق‌های آلومینیم ۶۰۶۱ و ۵۱۸۲

جدول ۱: خواص مکانیکی فلزات پایه آلومینیم

نوع ماده	استحکام تسلیم (Mpa)	استحکام نهایی (Mpa)	درصد افزایش طول
AA5182	۱۵۲	۳۶۸	۲۴/۹
AA6061	۲۱۳	۳۷۰	۱۷/۴

۳- جوشکاری ورق‌های ترکیبی

برای جوشکاری ورق‌های آلومینیم روش‌های مختلف جوشکاری مانند جوشکاری لیزر، جوشکاری اصطکاکی و غیره وجود دارد. اما تشکیل حوضچه مذاب در جوشکاری‌های ذوبی سبب تشکیل فاز ترد در این نوع ورق‌ها می‌شود. تشکیل فاز ترد سبب شکست زود هنگام ورق‌های جوشکاری شده در حین فرایندهای شکل‌دهی می‌شود. بنابراین یکی از

جدول ۲: سطوح پارامترهای استفاده شده برای جوشکاری نمونه ها

سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	پارامترهای فرایند
-	B	A	هندسه ابزار
۱۲۰۰	۱۰۰۰	۸۰۰	سرعت دورانی ابزار (rpm)
۸۰	۶۰	۴۰	سرعت خطی ابزار (mm/min)

جدول ۳: اطلاعات طراحی آزمایش

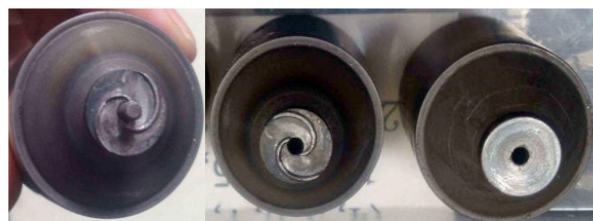
سرعت خطی (mm/min)	سرعت دورانی (rpm)	هندسه ابزار	شماره آزمایش
۴۰	۸۰۰	A	۱
۶۰	۸۰۰	A	۲
۸۰	۸۰۰	A	۳
۴۰	۱۰۰۰	A	۴
۶۰	۱۰۰۰	A	۵
۸۰	۱۰۰۰	A	۶
۴۰	۱۲۰۰	A	۷
۶۰	۱۲۰۰	A	۸
۸۰	۱۲۰۰	A	۹
۴۰	۸۰۰	B	۱۰
۶۰	۸۰۰	B	۱۱
۸۰	۸۰۰	B	۱۲
۴۰	۱۰۰۰	B	۱۳
۶۰	۱۰۰۰	B	۱۴
۸۰	۱۰۰۰	B	۱۵
۴۰	۱۲۰۰	B	۱۶
۶۰	۱۲۰۰	B	۱۷
۸۰	۱۲۰۰	B	۱۸

پس از انجام جوشکاری اصطکاکی نمونه ها، سطح آنها در محل جوش با استفاده از روش حک الکتروشیمیایی شبکه بندی شد تا از این طریق بتوان کرنش قابل تحمل تا زمان شکست را در نمونه ها اندازه گیری کرد. نمونه ها با استفاده از دستگاه حک الکتروشیمیایی با دایره هایی به قطر $2/5\text{mm}$ شبکه بندی شدند تا بتوان پس از تغییر شکل کرنش ها را اندازه گیری کرد. دایره هایی که در معرض تغییر شکل هستند پس از فرایند شکل دهی به شکل بیضی در می آیند. کرنش های اصلی در صفحه ورق بر اساس کرنش های حقیقی بیان شد. کرنش های حقیقی کمینه و بیشینه با اندازه گیری قطر کوچک (b) و بزرگ (a) بیضی ها و مقایسه آن با قطر اولیه دایره (d_0) با استفاده از روابط زیر اندازه گیری شد. این کرنش ها پس از پایان شکل دهی برای هر نمونه و در نزدیکی منطقه شکست اندازه گیری شدند.

$$\varepsilon_{Major} = \ln\left(\frac{a}{d_0}\right), \quad \varepsilon_{minor} = \ln\left(\frac{b}{d_0}\right) \quad (1)$$



شکل ۲: دستگاه جوشکاری اصطکاکی مورد استفاده در آزمایش های تجربی



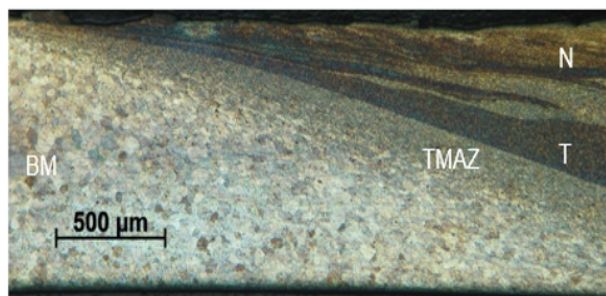
شکل ۳: انواع هندسه ابزار جوشکاری مورد استفاده در آزمایش های تجربی



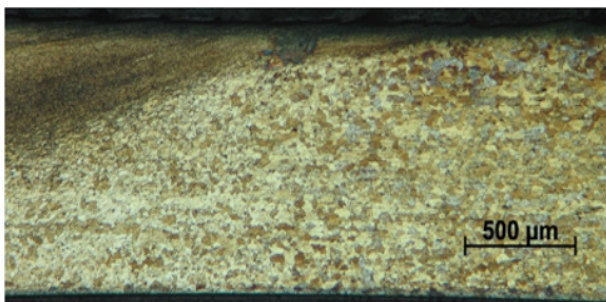
شکل ۴: هندسه ابزار مارپیچ مورد استفاده برای جوشکاری

۵- نتایج و بحث

شکل ۶ یک نمونه ورق ترکیبی شبکه‌بندی شده بعد از آزمون اریکسون را نشان می‌دهد. موقعیت شکست نمونه در نزدیکی راس گنبد و در منطقه جوش قابل مشاهده است. ریزساختار یک نمونه جوش و منطقه اطراف آن در شکل ۶ "الف" و "ب" نشان داده شده است. شکل ۷-الف فلز پایه آلومینیوم ۶۰۶۱ با دانه‌هایی با اندازه حدود ۴۵ میکرومتر را نشان می‌دهد، این در حالیست که در منطقه متأثر از ترمومکانیکالی (TMAZ) این دانه‌ها دچار تغییر شکل پلاستیک بزرگ شده‌اند. شکل ۷-ب فلز پایه آلومینیوم ۵۱۸۲ را نشان می‌دهد. اندازه دانه‌ها در این نیمه جوش ۳۱ میکرومتر است. در شکل ۸ پروفیل سختی ورق ترکیبی آلومینیوم ۵۱۸۲ و ۶۰۶۱ در راستای عمود بر خط جوش نشان داده شده است. سطح پروفیل سختی در منطقه فلز جوش بسیار بالاتر از فلزات پایه قرار دارد. سختی آلومینیوم ۶۰۶۱ کمتر از سختی آلومینیوم ۵۱۸۲ می‌باشد.

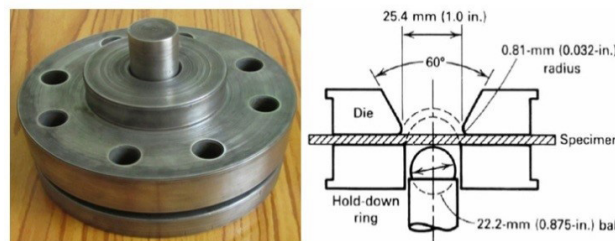


(الف)



(ب)

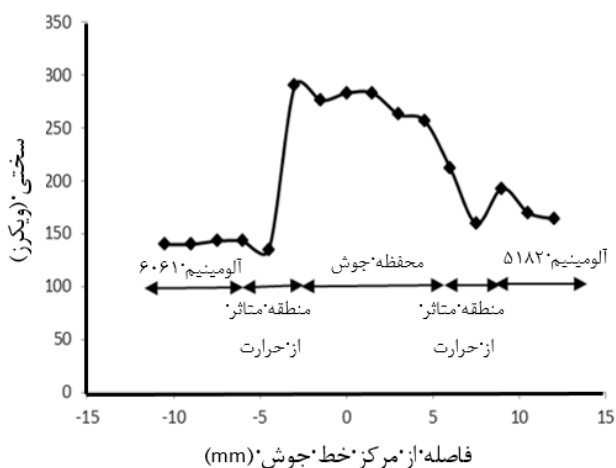
شکل ۷: ریزساختار یک ورق ترکیبی آلومینیوم جوش شده (الف) نیمه آلومینیوم ۶۰۶۱، (ب) نیمه آلومینیوم ۵۱۸۲



(ب)

(الف)

شکل ۵: قالب آزمون شکل‌پذیری ورق با سنبه سرکروی (الف) طرح شماتیک (ب) نمونه استفاده شده برای انجام آزمون‌ها



شکل ۸: پروفیل سختی در راستای عمود بر خط جوش

طراحی آزمایش تاگوجی انجام شده بود، نشان می‌دهد. یکی از ستون‌های این جدول نیروی شکل‌دهی است. نیروی شکل‌دهی در واقع حداکثر نیرویی است که نمونه تا لحظه شکست تحمل می‌کند. در دو ستون دیگر کرنش بیشینه و کرنش کمینه نشان داده شده است. این کرنش‌ها از طریق اندازه‌گیری اندازه شبکه‌ها پس از آزمون شکل‌دهی در منطقه جوش محاسبه شده‌اند. در واقع این دو ستون حداکثر میزان کرنشی که نمونه‌ها تا لحظه شکست تحمل می‌کنند را نشان می‌دهند. مقدار این کرنش‌ها در واقع نشان‌دهنده میزان شکل‌پذیری نمونه‌ها است. هرچه مقدار کرنش‌های تحمل‌شده در نمونه تا لحظه شکست بیشتر باشد، میزان شکل‌پذیری بیشتر بوده و این خود نشان‌دهنده کیفیت بهتر جوش است. تحلیل واریانس پرکاربردترین نوع تحلیل برای بررسی اثر متغیرهای ورودی بر پاسخ فرایند است. این تحلیل با فرض نرمال بودن توزیع



شکل ۶: نمونه شکل داده شده بوسیله آزمون اریکسون با شبکه‌بندی انجام شده در خط جوش

برای مقایسه خواص مکانیکی فلزات پایه با خواص مکانیکی منطقه جوش، یک نمونه کشش از منطقه جوش طبق استاندارد ASTM-E8 استخراج شد و مورد آزمون کشش قرار گرفت. شکل ۹ نمونه‌های کشش را نشان می‌دهد. نتایج آزمون کشش در شکل ۱۰ ارائه شده است. همانطور که از این شکل مشخص است میزان تنش شکست منطقه جوش از فلزات پایه آلومینیوم ۶۰۶۱ و ۵۱۸۲ کمتر است. تغییر طول نمونه منطقه جوش در لحظه شکست بسیار کمتر از فلزات پایه است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شکل‌پذیری ورق ترکیبی آلومینیوم از فلزات پایه کمتر است. جدول ۴ نتایج حاصل از آزمون شکل‌دهی سنبه سرکروی را برای ۱۸ نمونه جوشکاری شده طبق اطلاعات جدول ۳ که بر اساس

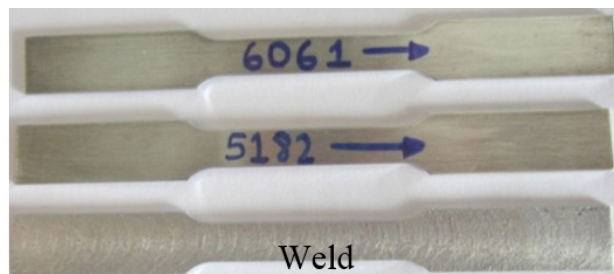
جدول ۴: نتایج آزمون شکل دهی اریکسون برای ۱۸ آزمایش

شماره آزمایش	حداکثر نیروی شکل دهی (kN)	کرنش بیشینه	کرنش کمینه
۱	۳/۵	۰/۳۳۴۴۷۲	۰/۱۴۰۴۵۷
۲	۳/۵	۰/۲۶۲۳۶۴	۰/۱۸۲۳۲۲
۳	۴/۵	۰/۴۰۵۴۶۵	۰/۲۲۳۱۴۴
۴	۵	۰/۴۰۵۴۶۵	۰/۲۶۲۳۶۴
۵	۵	۰/۳۰۰۶۹۷	۰/۱۸۲۳۲۲
۶	۳/۵	۰/۳۳۴۴۷۲	۰/۲۶۲۳۶۴
۷	۵	۰/۴۷۰۰۰۴	۰/۳۳۶۴۷۲
۸	۴	۰/۴۰۵۴۶۵	۰/۲۶۲۳۶۴
۹	۵	۰/۵۳۰۶۲۸	۰/۲۲۲۸۲۴
۱۰	۵/۵	۰/۵۵۸۹۳	۰/۲۶۲۳۶۴
۱۱	۵/۵	۰/۳۶۴۴۴۳	۰/۱۸۲۳۲۲
۱۲	۵/۵	۰/۴۰۵۴۶۵	۰/۳۳۶۴۷۲
۱۳	۵/۵	۰/۴۰۵۴۶۵	۰/۲۲۳۱۴۴
۱۴	۵	۰/۴۰۵۴۶۵	۰/۲۶۲۳۶۴
۱۵	۶	۰/۴۳۹۲۸۷	۰/۱۸۲۳۲۲
۱۶	۴/۷	۰/۳۳۴۴۷۲	۰/۲۲۲۸۲۴
۱۷	۵/۵	۰/۵۰۱۵۰۲	۰/۲۲۳۱۴۴
۱۸	۵/۵	۰/۳۳۴۴۷۲	۰/۰۹۵۳۱

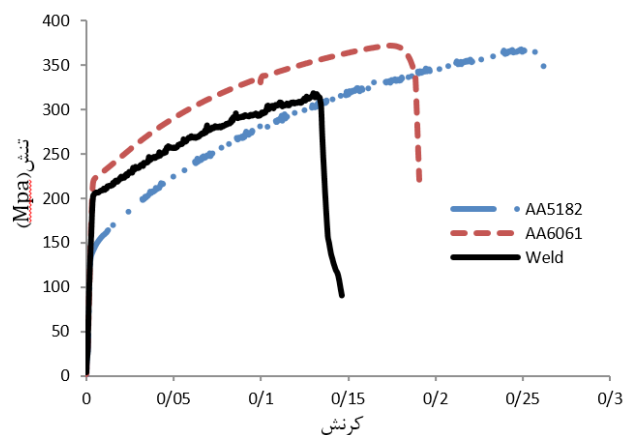
ورق آلومینیم به داخل منطقه اتصال و ایجاد اتصالی با استحکامی بالاتر و همچنین خاصیت شکل پذیری بیشتر می شود. تاثیر سرعت دورانی ابزار بر روی کرنش بیشینه نیز در شکل ۱۲ (بالا سمت راست) نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است با افزایش سرعت دورانی ابزار جوشکاری، کرنش بیشینه ناشی از آزمون اریکسون در منطقه جوش افزایش می یابد. این افزایش را می توان اینگونه توجیه نمود که با افزایش سرعت دورانی ابزار، اصطکاک بین ابزار و سطح ورق به خصوص در منطقه اتصال افزایش یافته و این امر سبب افزایش حرارت ناشی از تماس ابزار با ورق می شود. افزایش حرارت سبب خمیری شدن مواد شده، نفوذ مواد داخل منطقه اتصال را افزایش داده و سبب افزایش استحکام جوش می شود. تاثیر سرعت حرکت خطی ابزار جوشکاری بر روی کرنش بیشینه منطقه جوش در شکل ۱۲ نشان داده شده است. روند تغییرات کرنش بر اثر افزایش سرعت حرکت خطی ابزار یکنواخت نیست. ابتدا کرنش کاهش و سپس افزایش می یابد. بنابراین با این نمودار به طور قطعی نمی توان سرعت حرکت خطی مناسب که سبب افزایش کرنش بیشینه منطقه جوش می شود را تشخیص داد و انتخاب سرعت خطی مناسب باید در نمودار شکل ۱۳ بررسی شود.

شکل ۱۳ تاثیر پارامترهای جوشکاری بر روی میزان نیروی قابل تحمل تا لحظه شکست در آزمون اریکسون را نشان می دهد. به وضوح مشخص است که استفاده از ابزار نوع B سبب افزایش میزان نیروی قابل تحمل نمونه ها تا لحظه شکست می شود. افزایش سرعت دورانی ابزار جوشکاری نیز تا حدودی سبب افزایش نیروی قابل تحمل نمونه های ورق ترکیبی آلومینیم می شود. نمودار سمت راست شکل ۱۳ نشان می دهد که

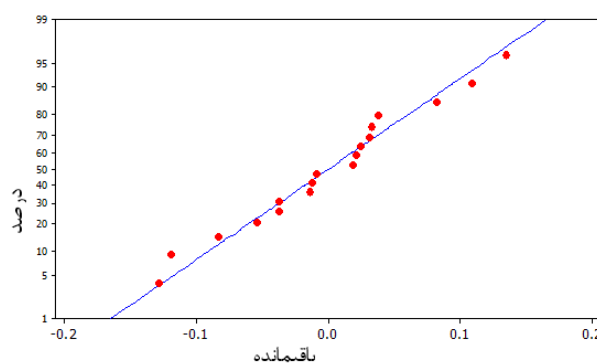
خطا، ثابت بودن واریانس و استقلال آن انجام می شود. نرمال بودن توزیع خطا توسط نمودار احتمال نرمال مقادیر باقیمانده که در شکل ۱۱ برای پاسخ کرنش بیشینه نشان داده شده است، بررسی می شود. پراکندگی روند توزیع نقاط اطراف خط راست مورب، نشان دهنده نرمال بودن توزیع مقادیر باقیمانده یا همان خطاها است.



شکل ۹: نمونه های آزمون کشش ورق های پایه آلومینیم ۶۰۶۱، ۵۱۸۲ و منطقه جوش



شکل ۱۰: نتایج آزمون کشش برای فلزات پایه و منطقه جوش



شکل ۱۱: نمودار احتمال نرمال مقادیر باقیمانده برای کرنش بیشینه

شکل ۱۲ تاثیر سه پارامتر متغیر نوع ابزار جوشکاری، سرعت دورانی ابزار و سرعت حرکت خطی ابزار را بر روی کرنش بیشینه در محل جوش نشان می دهد. همانطور که از شکل ۱۲ (بالا سمت چپ) مشخص است استفاده از ابزار نوع B سبب افزایش کرنش بیشینه در محل جوش ورق ترکیبی آلومینیم می شود. ابزار نوع B ابزاری بود که در راس آن از یک هندسه ماریپچ استفاده شد. این هندسه سبب جمع آوری مواد از روی سطح

۶- نتیجه گیری

بدلیل نسبت استحکام به وزن بالای ورق‌های آلومینیم این ورق‌ها کاربرد زیادی در صنایع مختلف از جمله صنایع خودروسازی دارند. یکی از موارد استفاده از ورق‌های آلومینیم در ساخت ورق‌های ترکیبی است. از آنجائیکه استفاده از روش‌های جوشکاری ذوبی برای جوش ورق‌های آلومینیم سبب تشکیل فازهای ترد شده و استحکام جوش را کاهش می‌دهد، استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی برای جوش ورق‌های آلومینیم کاربرد زیادی دارد.

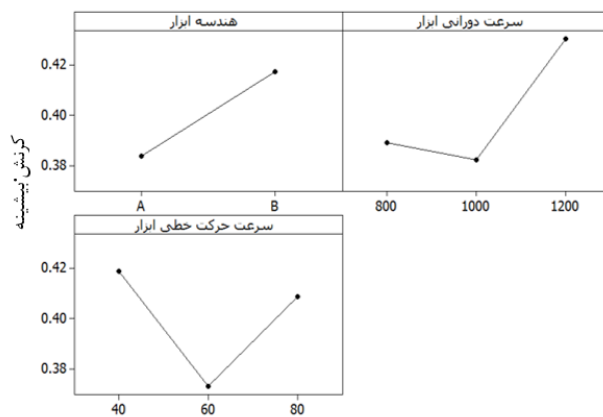
در تحقیق حاضر تاثیر تعدادی از مهمترین پارامترهای جوشکاری اصطکاکی بر روی استحکام و میزان شکل‌پذیری ورق‌های ترکیبی آلومینیم ۶۰۶۱ و ۵۱۸۲ بررسی شد. نوع ابزار جوشکاری، سرعت دورانی ابزار و سرعت حرکت خطی ابزار جوشکاری مهمترین پارامترهای این فرایند هستند که در این تحقیق بررسی شدند. بدلیل اینکه ورق‌های ترکیبی اکثراً در فرایندهای شکل‌دهی خارج از صفحه استفاده می‌شوند، از آزمون اریکسون یا همان سنبه سرکروی که یک آزمون خارج از صفحه است برای بررسی کیفیت جوش استفاده شد.

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که استفاده از ابزار دارای هندسه ماریچج در راس آن (ابزار نوع B) باعث افزایش استحکام، خاصیت شکل‌پذیری ورق ترکیبی، افزایش کرنش بیشینه و افزایش نیروی قابل تحمل تا لحظه شکست نمونه‌ها می‌شود. دلیل بهبود خاصیت شکل‌پذیری با ابزار B، بهبود اتصال بین ابزار و قطعه کار از طریق گیر افتادن مواد پلاستیک در داخل فضای بین دو قطعه در حال جوش، جلوگیری از نوسان ابزار و تشکیل فلش است. بررسی تاثیر این نوع هندسه ابزار جوشکاری بر روی شکل‌پذیری ورق‌های جوشکاری شده آلومینیم برای اولین بار انجام می‌شود. افزایش سرعت دورانی ابزار جوشکاری سبب افزایش میزان حرارت ناشی از اصطکاک بین ابزار و منطقه جوش شده و نفوذ مواد به داخل شیار اتصال را راحت‌تر کرده، استحکام جوش و کرنش بیشینه ناشی از آزمون اریکسون را افزایش می‌دهد. روند تغییرات کرنش بیشینه ناشی از آزمون اریکسون بر اثر افزایش سرعت حرکت خطی ابزار یکنواخت نیست. در واقع افزایش بیش از اندازه سرعت خطی ابزار جوشکاری باعث کاهش امکان نفوذ شده و کیفیت جوش را کاهش می‌دهد. از طرفی کاهش بیش از اندازه سرعت جوشکاری نیز سبب افزایش حرارت در منطقه جوش شده و امکان تشکیل فازهای ترد را افزایش می‌دهد و استحکام جوش را کاهش می‌دهد.

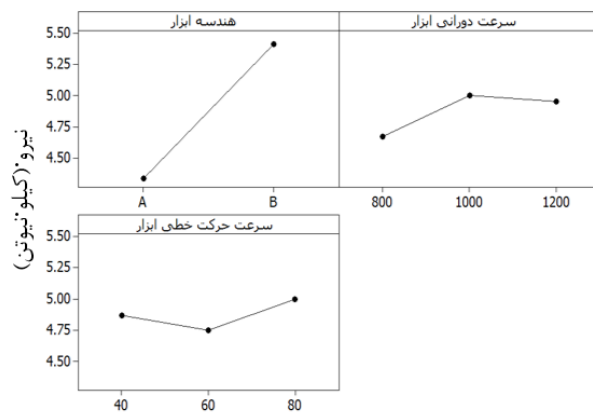
نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که ابزار B با سرعت دورانی 1200rpm و سرعت خطی 80mm/min بدلیل اینکه بیشترین نیرو را در لحظه شکست تحمل می‌کنند و همچنین بیشترین کرنش در منطقه جوش ایجاد می‌شود، بهترین پارامترها برای جوشکاری ورق ترکیبی آلومینیم ۶۰۶۱ و ۵۱۸۲ است.

پروفیل سختی ویکرز که به صورت عرضی از سطح جوش و ورق‌های پایه اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که سختی در منطقه فلز جوش بسیار

با افزایش سرعت دورانی ابزار از ۸۰۰ به ۱۰۰۰ نیروی شکست افزایش می‌یابد ولی از ۱۰۰۰ به ۱۲۰۰ تقریباً ثابت است. اما از طرفی در شکل ۱۲ که تاثیر سرعت دورانی بر کرنش بیشینه بررسی شد دیده شد که در سرعت ۱۲۰۰، کرنشی را که نمونه در لحظه شکست تحمل می‌کند بسیار بیشتر از سرعت دورانی ۱۰۰۰ است. بنابراین با مقایسه این دو نمودار سرعت دورانی ۱۲۰۰ برای ابزار (ابزار B که مناسب تشخیص داده شد) مناسب است. همانطور که از نمودار پایین شکل ۱۳ مشخص است افزایش سرعت خطی ابزار سبب افزایش نیروی قابل تحمل در لحظه شکست و یا به عبارتی افزایش استحکام جوش می‌شود. بنابراین سرعت خطی 80mm/min به عنوان سرعت خطی مناسب پیشنهاد می‌شود. بنابراین ابزار B با سرعت دورانی 1200rpm و سرعت خطی 80mm/min بدلیل اینکه بیشترین نیرو را در لحظه شکست تحمل می‌کنند و همچنین بیشترین کرنش در منطقه جوش ایجاد می‌شود، بهترین پارامترها برای جوشکاری ورق ترکیبی آلومینیم ۶۰۶۱ و ۵۱۸۲ است.



شکل ۱۲: تاثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی بر کرنش بیشینه منطقه جوش در آزمون اریکسون



شکل ۱۳: تاثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی بر حداکثر نیروی قابل تحمل نمونه‌های ورق ترکیبی آلومینیم در آزمون اریکسون

Laser Technology 51 (0), pp. 24-31.

- [8] Safdarian, R., Moslemi Naeini, H., Sabaghzadeh, J., Torkamany, M. J., 2012. "Effect of Laser Welding Parameters on Forming Behavior of Tailor Welded Blanks". *Journal of Advanced Materials Research (AMR)*, 445, pp. 406-411.
- [9] Stasikand, M. C., Wagoner, R. H., 2012. "Forming of Tailor-Welded Aluminum Blanks", *General Motors NAO Manufacturing Center*, Warren, Michigan.
- [10] Shakeri, H.R., Bušte, A., Worswick, M.J., Clarke, J.A., Feng, F., Jain, M., Finn, M., 2002. "Study of damage initiation and fracture in aluminum tailor welded blanks made via different welding techniques", *Journal of Light Metals 2*: pp. 95-110.
- [11] Kumbhar, N. T., Bhanumurthy, K., 2008. "Friction Stir Welding of Al 6061 Alloy", *Asian J. Exp. Sci.*, 22(2), pp. 63-74.
- [12] Ichinori, S., Yong-Jai, K., Saito, N., 2009. "Dissimilar Friction Stir Welding for Tailor-Welded Blanks of Aluminum and Magnesium Alloys", *Materials Transactions*, 50 (1), pp. 197-203.
- [13] Miles, M.P., Melton, D.W., Nelson, T.W., 2005. "Formability of Friction-Stir-Welded Dissimilar-Aluminum-Alloy Sheets", *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A*, V. 36A.

[۱۴] هنربخش رئوف، عباس؛ غریبشاهیان، احسان؛ " شبیه سازی المان محدود جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی و تاثیر پارامترهای موثر بر آن در آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیم"، مجله مدل سازی در مهندسی، سال یازدهم، شماره ۳۵، زمستان ۱۳۹۲.

[۱۵] قهرمانی مقدم، دانیال؛ فرهنگ دوست، خلیل؛ رستگار، علی؛ رضانی مقدم، محمد؛ " بررسی اثر سرعت ابزار بر سختی و تنش پسماند در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیم 2024-T351 با روش تجربی و شبیه سازی عددی"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۵، شماره ۲، صفحه ۶۱-۷۱، اردیبهشت ۱۳۹۴.

بالتر از فلزات پایه قرار دارد. سختی آلومینیم ۶۰۶۱ کمتر از سختی آلومینیم ۵۱۸۲ می باشد.

۷- مراجع

- [1] Kinsey, B., Song, N., Cao, J., 1999. "Analysis of Clamping Mechanism for Tailor Welded Blank Forming". *Society of Automotive Engineering*.
- [2] Shi, M.F., Pickett, K.M., Bhatt, K.K., 1993. "Formability issues in the application of tailor welded blank sheet". *In Proceedings of the Sheet Metal and Stamping Symposium*, pp. 27-35.
- [3] Shi, M.F., Eisenmenger, M., Bhatt, K.K., 1995. "Influence of laser welding parameters on formability and robustness of blank manufacturing: an application to a body side frame". *SAE technical paper*, Paper No. 950922.
- [4] Chien, W.Y., Pan, J., Friedman, P.A., 2003. "Failure Prediction of Aluminum Laser-Welded Blanks". *International Journal of Damage Mechanics*, 12, pp. 193-223.
- [5] Chien, W.Y., Pan, J., Tang, S.C., 2004. "A Combined Necking and Shear Localization Analysis for Aluminum Sheets under Biaxial Stretching Condition". *International Journal of Plasticity*, 20, pp.1953-1981.
- [6] Cheng, C. H., Chan, L. C., Chow, C. L., 2007. "Weldment properties evaluation and formability study of tailor-welded blanks of different thickness combinations and welding orientations". *J Mater Sci*, 42, pp. 5982-5990.
- [7] Safdarian Korouyeh, R., Moslemi Naeini, H., Torkamany, M.J., Liaghat, G., 2013. "Experimental and theoretical investigation of thickness ratio effect on the formability of tailor welded blank". *Optics &*