

مدل سازی و بررسی آماری پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ با استفاده از روش رویه پاسخ

منصور مردعلی زاده^{۱*}، محمدرضا سلیمانی یزدی^۲ و محمدعلی صفرخانیان^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶، اتصال لبه روی هم، روش رویه پاسخ، آنالیز واریانس.</p>	<p>فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی روشی مناسب برای ساخت محفظه‌های تحت فشار و اتصالاتی می‌باشد که تحت تنش قرار دارند. در این پژوهش فرایند اتصال دهی ورقهای آلیاژی آلومینیوم ۵۴۵۶ در حالت لبه روی هم، به گونه‌ای که ورق کار سرد شده H321 با ضخامت ۵ میلی‌متر بر روی ورق آنیل با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر قرار می‌گیرد، صورت پذیرفت و تأثیر همزمان پارامترهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه استقرار ابزار بر متغیرهای نیروی شکست و ارتفاع عیب هوک در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی با استفاده از روش رویه پاسخ مورد تحقیق قرار گرفت. پس از ارزیابی و تحلیل نمونه‌های جوشکاری شده، با استفاده از نتایج داده‌های تجربی، مدل سازی توسط روش رویه پاسخ انجام گرفت و جهت صحت مدل، چندین تست راست آزمایی صورت پذیرفت، که نتایج خواص مکانیکی مدل به طور میانگین با حالت تجربی در حدود ۳/۸۸ درصد خطا داشت. در ادامه آنالیز واریانس، جهت بررسی تأثیر میزان هر کدام از پارامترهای جوشکاری بر روی متغیرهای حالت فرایند جوشکاری مورد استفاده قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که پارامتر سرعت پیشروی ابزار بر تغییرات نیروی شکست و پارامتر سرعت دورانی ابزار بر تغییرات ارتفاع هوک، بیشترین تأثیر را داشته و پارامتر زاویه استقرار ابزار کمترین تأثیر را بر توابع هدف، نسبت به دو پارامتر دیگر داشت.</p>

۱- مقدمه

جوشکاری در حالت جامد، برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم اختراع و ثبت شد. فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی با بستن ورق‌های فلزی روی صفحه‌ای که نگهدارنده نامیده می‌شود آغاز می‌گردد، سپس ورقها باید با نیروی صفحه تقویتی به خوبی مهار شوند تا از حرکت آنها در جهات مختلف حین جوشکاری جلوگیری به عمل آید. سپس یک ابزار چرخان مصرف نشدنی به فصل مشترک قطعات به اندازه پیش بینی شده نفوذ کرده و در این فصل مشترک به حرکت در می‌آید. امروزه، این فرایند نقش کلیدی در

فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی (FSW) روش نسبتاً جدیدی برای جوش حالت جامد آلیاژهای فلزی می‌باشد. این فرایند در سال ۱۹۹۱ توسط موسسه جوشکاری TWI در انگلستان به عنوان یک روش نوین

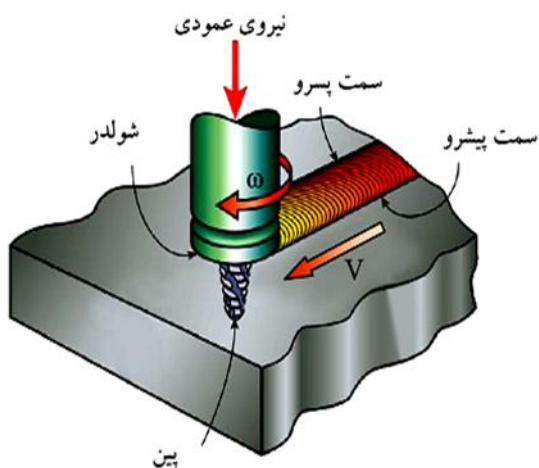
* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mmardalizadeh@hitech.iuim.ac.ir

۱. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی و فناوری های نوین، دانشگاه صنایع و معادن ایران

۲. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین(ع)

۳. استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی ورقهای با ضخامت متفاوت در طرح اتصال لبه روی هم^۴، عیب هوک با ضخامت موثر ورق^۵ رابطه مستقیم داشته و هرگاه ارتفاع عیب هوک به اندازه‌ای باشد که در ناحیه جوش، ضخامت موثر ورق از هر دو سمت یکسان باشد، می‌توان پیش‌بینی کرد که در صورت عدم وجود عیوب دیگر (عیب نقص پیوند تماسی^۶، و عیب تونلی^۷) محل شکست در تست کشش از ناحیه دکمه جوش نخواهد بود [۵].



شکل ۱- تصویر کلی از فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی [۲]

در سال ۲۰۰۳، Kim و همکاران [۶] معادلات آنالیز رگرسیون چندگانه خطی را به خوبی معادلات غیرخطی، برای بیان رابطه پارامترهای فرایند جوشکاری با پارامترهای هندسی جوش در جوشکاری قوسی بکار بردند. در سال ۲۰۰۷، Ganjigatti و همکاران [۷] فرایند جوشکاری MIG^۸ را با استفاده از روش‌های آماری مدل‌سازی کردند. در این بررسی آنها نشان دادند که مدل‌های خطی نسبت به برخی مدل‌های غیرخطی مانند منحنی الخط از دقت بالاتری در پیش‌بینی برخوردار می‌باشد.

اتصال آلیاژهای آلومینیوم گروه ۲۰۰۰، ۵۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۷۰۰۰ ایفا می‌کند [۱ و ۲].

اصلی‌ترین کاربرد این فرایند جوشکاری در صنایع مدرن هوافضا برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم با استحکام بالا می‌باشد. همچنین امروزه این روش به واسطه مزایایی از قبیل عدم استفاده از مواد مصرفی، سازگار با محیط زیست، راندمان انرژی بالا و فراگیر، سرعت بالای تولید و عدم افت استحکام بعد از جوشکاری، در صنایع اتومبیل، ریلی، دریایی و در اتصال برخی آلیاژهای فلزی مانند آلیاژهای آلومینیوم، منیزیم، روی، تیتانیوم و مس که با روش‌های جوشکاری ذوبی به سختی جوشکاری می‌شوند، استفاده می‌شود [۲].

در شکل ۱ تصویری از فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی^۱ نشان داده شده است. در این روش یک ابزار چرخان مصرف‌نشدنی و مقاوم در برابر سایش، متشکل از شانه ابزار^۲ و پین با هندسه خاص، به فصل مشترک قطعات به اندازه پیش‌بینی شده نفوذ می‌کند و مواد تحت جوشکاری را می‌فشارد. همچنین با تماس شانه ابزار با سطح کار در حین چرخش ابزار، حرارت تولید شده و دوران ابزار باعث گرم و نرم شدن دو ماده در تماس با یکدیگر می‌گردد، و سبب تغییر شکل مواد در محل اتصال می‌شود. به این ترتیب همراه با آمیخته شدن مواد از دو قطعه در حال اتصال، و از بین رفتن خط اتصال، تبلور مجدد دینامیکی اتفاق می‌افتد [۲].

در فرایند FSW با طرح اتصال لبه روی هم، در هر دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده ناحیه متأثر از ترمومکانیکال، سطوح بین ورق بالایی و پایینی دچار تغییر شکل شده و در راستای فصل مشترک منحرف می‌شوند، این فصل مشترک‌های منحرف‌شده عیب هوک^۳ نامیده می‌شوند [۳ و ۴].

⁴ Lap joint

⁵ Effective Sheet Thickness (EST)

⁶ Kissing Bond

⁷ Cavity Groove Like Defect

⁸ Metal Inert Gas

¹ Friction Stir Welding (FSW)

² Shoulder

³ Hooking Defect

ساختار عیوب ایجاد شده در ناحیه جوش و تحت تأثیر شرایط حاکم بر جوشکاری ارزیابی و بر اساس استاندارد AWS D17.3 [۱۲] مورد تحلیل قرار گرفت. در ادامه با استفاده از روش رویه پاسخ مدل سازی و تأثیر پارامترها بر متغیرهای فرایند صورت پذیرفت.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه

در این پژوهش، از دو ورق آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ با ضخامت ورق پایه (A) و متصل شونده (B) به ترتیب ۵ و ۲/۵ میلی‌متر که در صنایع هوافضا کاربرد گسترده دارند، استفاده گردید. شایان ذکر است اگرچه هر دو ورق از لحاظ آنالیز عنصری مشابه، ولی از لحاظ تاریخچه عملیات حرارتی صورت گرفته متفاوت بودند؛ به گونه ای که ورق ۵ میلی‌متری کارسرد شده H321، ولی ورق ۲/۵ میلی‌متری آنیل بود. آنالیز کوانتومتری هر دو ورق توسط دستگاه Jobin Yvon صورت پذیرفت. همچنین از آنجا که نوع عملیات حرارتی انجام گرفته بر روی دو ورق متفاوت بود، سختی هر دو ورق به صورت مجزا توسط دستگاه سختی سنج برینل Briviscop با ساچمه کاربید تنگستنی و نیروی ۶۲/۵ کیلوگرم انجام و تست کشش توسط دستگاه Instron M200 با ظرفیت ۲۰ تن، نرخ کرنش ۲ میلی‌متر بر دقیقه و دقت اندازه‌گیری ۰/۱ نیوتن طبق استاندارد DIN EN 1002 صورت پذیرفت. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

۲-۲- تجهیزات

به منظور انجام فرایند جوشکاری، از دستگاه اتوماتیک جوشکاری اصطکاکی اختلاطی مدل LINEAR 400 استفاده گردید. شکل ۲ تصویر دستگاه جوشکاری FSW مذکور را نشان می‌دهد. همچنین با توجه به نوع فرایند،

در سالهای اخیر، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی^۱ به عنوان ابزار مناسبی برای ایجاد مدل‌هایی که رابطه داخلی بین ورودی و خروجی سیستم‌های پیچیده را نشان می‌دهد، مطرح شده است. در سال ۲۰۰۳، Nagesh و همکاران [۸] شبکه عصبی را برای پیش‌بینی هندسه جوش و عمق نفوذ در جوشکاری SMAW^۲ بدون در نظر گرفتن ساختار شبکه عصبی بکار بردند. آنها بیان کردند که شبکه عصبی یک مدل با قابلیت کار مناسب برای پیش‌بینی هندسه جوش و عمق نفوذ تحت یک مجموعه شرایط جوشکاری مشخص می‌باشد.

در سال ۲۰۰۷، یک مدل شبکه عصبی توسط Wu و همکاران [۹] برای نشان دادن ارتباط پارامترهای هندسی جوش با عمق نفوذ جوش ارائه و در ادامه از این شبکه جهت کنترل عمق نفوذ جوش استفاده گردید.

همچنین اخیراً در تحقیقاتی امکان استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به منظور محاسبه خواص مکانیکی و اندازه دانه در صفحات جوشکاری شده با روش جوشکاری اصطکاکی اختلاطی بررسی گردیده است؛ نتایج این بررسی‌ها نشان داد که روش شبکه عصبی می‌تواند به عنوان یک روش جایگزین در پیش‌بینی نتایج فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی استفاده شود [۱۰ و ۱۱].

در این پژوهش بر پایه آزمایش‌های تجربی انجام گرفته در صنعت، فرایند اتصال دهی ورقهای آلیاژی آلومینیوم ۵۴۵۶ در حالت لبه روی هم، به گونه‌ای که ورق کار سرد شده H321 با ضخامت ۵ میلی‌متر بر روی ورق آنیل با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر قرار می‌گیرد، صورت پذیرفت؛ و تأثیر همزمان پارامترهای اصلی فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی (سرعت دورانی ابزار (ω)، سرعت پیشروی ابزار (v) و زاویه استقرار ابزار (θ)) بر خواص مکانیکی، متالورژیکی و شکل‌گیری عیوب در ناحیه جوش، مورد تحقیق قرار گرفت. در آزمایش‌های تجربی، پس از بازرسی چشمی، سیر تکاملی درشت ساختار و ریز

¹ Artificial Neural Network

² Shield Metal Arc Welding

گرفت و سختی ابزار به میزان HRC ۵۰ رسید. مشخصات ابزار مورد استفاده در شکل ۳ و جدول ۳ آورده شده است.

ابزاری از جنس فولاد گرم کار H13 استفاده گردید. ابزار مورد استفاده پس از طراحی و ماشینکاری جهت رسیدن خواصی مانند سختی بالا، مقاومت به سایش و افزایش استحکام ابزار، تحت عملیات حرارتی سخت سازی قرار

Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Ni (%)	Zn (%)	Ti (%)	Pb (%)	نمونه
باقیمانده	۰/۰۸۴	۰/۲۰۸	۰/۰۱۴	۰/۶۳۰	۴/۹۱۱	۰/۱۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۲۱	۰/۰۳۰	۰/۰۰۱	ورق A (۵ میلی متر)
باقیمانده	۰/۱۱۴	۰/۱۸۶	۰/۰۲۵	۰/۵۷۸	۴/۸۱۳	۰/۰۱۵	۰/۰۰۷	۰/۰۴۳	۰/۰۴۲	۰/۰۰۶	ورق B (۲/۵ میلی متر)

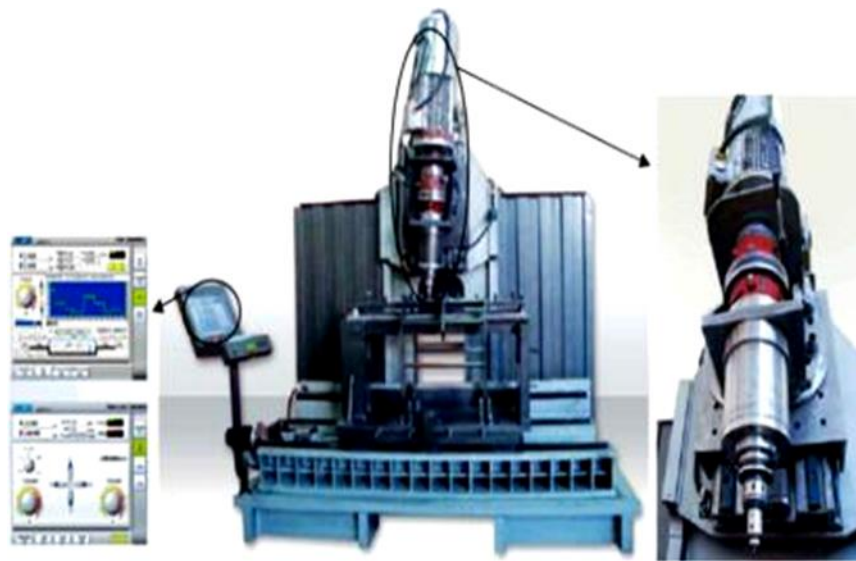
جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورقهای مورد استفاده در این پژوهش

استحکام نهایی (Rm) (MPa)	استحکام تسلیم (R0.2%) (MPa)	درصد ازدیاد طول (EL) (%)	سختی (HB)	نمونه
۳۶۰	۲۵۵	۱۲	۹۰	ورق A (۵ میلی متر)
۳۲۵	۲۱۰	۱۶	۸۰	ورق B (۲/۵ میلی متر)

جدول ۲- خواص مکانیکی ورقهای مورد استفاده مطابق استاندارد DIN EN 10002



شکل ۳- ابزار مورد استفاده



شکل ۲- تصویری از دستگاه جوشکاری اصطکاکی اختلاطی

جدول ۳- ابعاد هندسی ابزار مورد استفاده در این پژوهش

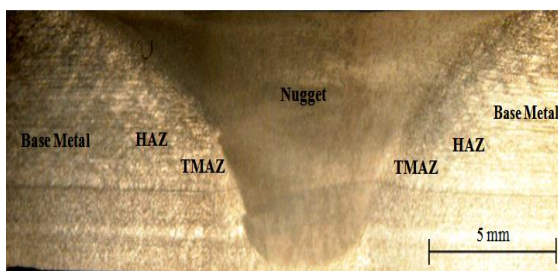
عمق رزوه (میلی متر)	گام رزوه (میلی متر)	ارتفاع پین (میلی متر)	قطر بزرگ پین (میلی متر)	قطر کوچک پین (میلی متر)	قطر شانه (میلی متر)
۰/۳	۰/۸	۷	۷	۴	۲۰

جدول ۴- مقادیر اعمال شده پارامترها جهت طراحی آزمون

پارامترهای جوشکاری	واحد	حداقل	حداکثر
سرعت دورانی ابزار	rpm	۲۵۰	۷۵۰
سرعت پیشروی ابزار	mm/min	۲۵	۷۵
زاویه ابزار با قطعه کار	degree	۲	۴

۳- نتایج

شکل ۴ تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی ناحیه جوش اصطکاکی اختلاطی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است به علت تفاوت در ضخامت ورقهای آلومینیومی جوشکاری شده، و تفاوت در حرارت ورودی، ناحیه جوش نامتقارن و با توجه به تغییرات ریز ساختاری همواره چهار ناحیه دکمه جوش (Nugget)، منطقه متأثر از حرارت (HAZ)، منطقه متأثر از عملیات ترمومکانیکال (TMAZ) و فلز پایه (BM) مشاهده گردید. شکل ۵ تصویر درشت و ریز ساختار میکروسکوپ نوری عیب هوک در نمونه جوشکاری شده تحت پارامترهای $(\omega=750\text{rpm}, V=50\text{ mm/min}, \theta=3^\circ)$ را نشان می‌دهد. در این نمونه ارتفاع هوک در سمت پیش‌رونده $1/0.68$ میلی‌متر و در سمت پس‌رونده $1/1.98$ میلی‌متر مشاهده شد.



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی ناحیه جوش

برای بررسی تأثیر پارامترهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه استقرار ابزار بر روی کیفیت جوش از روش رویه پاسخ^۱ و الگوی آماری مکعب مرکزی^۲ جهت طراحی آزمایش استفاده گردید. همچنین پس از گیره بندی ورقها و تنظیم پارامترها، سعی شد تا جوشکاری همه نمونه‌ها تحت شرایط یکسانی انجام شود. به اینگونه که سرعت ورود ابزار به قطعه کار 20 میلی‌متر بر دقیقه، مدت زمان توقف ابزار قبل از حرکت و جوشکاری 15 ثانیه و میزان نفوذ شانه ابزار 0.2 میلی‌متر بود.

جهت دوران ابزار با توجه به راست گرد بودن رزوه ابزار، پاد ساعتگرد و جهت جوشکاری، عمود بر جهت نورد ورقها لحاظ گردید. در نهایت جهت انجام مطالعات میکروسکوپی از کلیه نمونه‌های جوشکاری شده، نمونه‌ای با ابعاد 40×10 میلی‌متر در راستای عمود بر خط جوش مطابق استاندارد AWS D17.3 تهیه گردید.

به منظور راحتی مطالعات میکروسکوپی، کلیه نمونه‌ها، مانده شده و سطح تمامی نمونه‌ها با سمباده‌های نرم تا مش 2000 صاف و سپس از پودر آلومینای 0.3 میکرون، جهت پولیش استفاده گردید. به منظور پدیدار شدن ناحیه جوش، از محلول اچ حاوی 50 میلی‌لیتر محلول پولتن، 25 میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ و 40 میلی‌لیتر از محلولی که حاوی 3 گرم اسید کرمیک در 10 میلی‌لیتر آب بود، استفاده گردید. لازم به ذکر است که محلول پولتن شامل 12 میلی‌لیتر اسید کلریدریک، 6 میلی‌لیتر اسید نیتریک، 1 میلی‌لیتر اسید فلوئوریک، و یک میلی‌لیتر آب بود [۱۳].

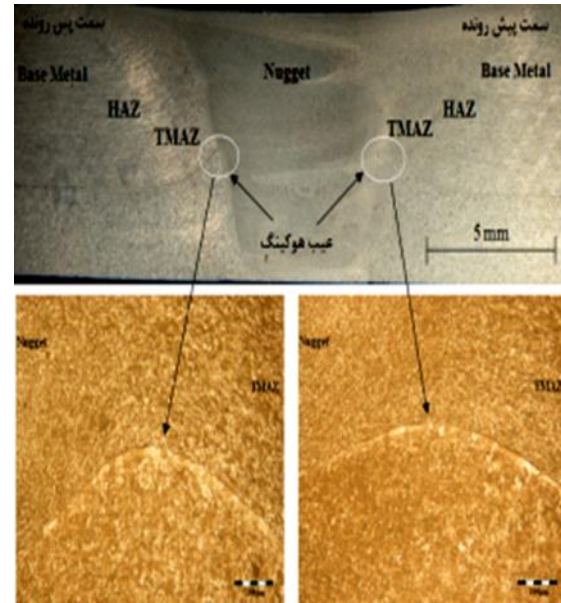
¹ Response surface Method (RSM)

² Central Composite Design (CCD)

عبور ابزار را تحمل می‌کند؛ در حالی که کرنش و گرمای کمتری نسبت به دکمه جوش به این ناحیه وارد می‌شود، ولی ناحیه متأثر از حرارت تحت تأثیر تغییر شکل پلاستیک نمی‌باشد و فقط گرمای حاصل از جوشکاری به این ناحیه وارد می‌گردد [۱۴].

دو عامل ارتفاع هوک و جهت‌گیری فصل مشترک، بر روی خواص مکانیکی ناحیه جوش تأثیرگذارند. در حقیقت ارتفاع هوک، هم تراز با پارامتر ضخامت موثر ورق بوده و حداقل ضخامت ورق اندازه‌گیری شده از طریق اندازه‌گیری کوچکترین فاصله بین فصل مشترک اتصال نیافته و بالای ورق بالایی (پایین ورق پایینی) ضخامت موثر ورق می‌باشد [۱۵].

جهت حرکت فصل مشترک و هوک در هر دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده تابعی از طول پین [۱۶] و یا تقابل راستگرد یا چپگرد بودن شیارهای ابزار با جهت حرکت دورانی ابزار (ساعتگرد یا پادساعتگرد) می‌باشد. در این پژوهش از آنجا که منحرف شدن هوک به سمت بالا بسیار مفید بود، لذا با توجه به راستگرد بودن رزوه پین جهت دوران ابزار پادساعتگرد لحاظ گردید. در نتیجه سیلان عمودی مواد و هوک در هر دو سمت ناحیه جوش همواره به سمت بالا منحرف گردید. در صورتی که اگر با همین ابزار در حالت ساعتگرد جوشکاری انجام می‌گرفت، سبب می‌شود که هوک در هر دو سمت به پایین متمایل شود.



شکل ۵- تصویر درشت و ریز ساختار نوری عیب هوک

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی با طرح اتصال لبه روی هم، در هر دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده ناحیه متأثر از ترمومکانیکال، سطوح بین ورق بالایی و پایینی دچار تغییر شکل شده و در راستای فصل مشترک منحرف می‌شوند، در واقع مواد در ناحیه ترمومکانیکال و مرز ناحیه دکمه جوش با ناحیه متأثر از ترمومکانیکال، می‌توانند به سمت بالا و یا پایین فصل مشترک منحرف شوند. این فصل مشترک‌های منحرف‌شده عیب هوک نامیده می‌شوند [۱۴ و ۳].

عیب هوک فقط در ناحیه متأثر از ترمومکانیکال دیده شده و در ناحیه متأثر از حرارت مشاهده نمی‌گردد، به دلیل اینکه ناحیه متأثر از ترمومکانیکال تغییر شکل ناشی از

جدول ۵- نتایج تجربی بررسی‌های متالوگرافی و مکانیکی انجام‌شده

شماره آزمایش	پارامتر ۱ سرعت دورانی ابزار (ω) rpm	پارامتر ۲ سرعت پیشروی ابزار (V) mm/min	پارامتر ۳ زاویه ابزار (θ) degree	نتیجه ۱ نیروی شکست (T) N	نتیجه ۲ ارتفاع هوک در سمت پیش‌رونده H(AS) mm	نتیجه ۳ ارتفاع هوک در سمت پس‌رونده H(RS) mm
1	750	25	2	18800	1.309	1.85
2	500	50	3	19500	0.518	0.765
3	750	25	4	19300	0.171	0.418
4	250	75	2	15000	0.106	0.157
5	500	25	3	16300	0.592	0.725

0.442	0.211	16200	4	50	500	6
0.783	0.101	13200	4	75	250	7
0.543	0.318	17000	3	75	500	8
0.769	0.475	18100	2	75	750	9
0.656	0.327	17200	4	75	750	10
0.271	0.127	15000	3	50	250	11
0.855	0.606	19100	2	50	500	12
0.575	0.382	19700	2	25	250	13
1.198	1.068	20700	3	50	750	14
0.765	0.518	19500	3	50	500	15
0.971	0.775	20700	4	25	250	16

۴- مدل سازی فرایند و بررسی تأثیر پارامترها

جهت تجزیه و تحلیل نتایج، کلیه نتایج تجربی حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته، مطابق جدول ۵ وارد نرم‌افزار گردید. پس از ورود نتایج ابتدا بهترین مدل آماری با استفاده از نرم‌افزار DESIGN EXPERT انتخاب و معادله رگرسیون مربوط به هر تابع هدف تعیین گردید، سپس نتایج آماری آنالیز رگرسیون استخراج گردید که در جدول ۶ قابل مشاهده می‌باشد. جهت محاسبه و اطمینان از میزان دقت مدل سازی، توسط یک سری داده از آزمایش‌های دیگر، عملکرد آن تست شد؛ به این صورت که مدل، داده‌های این آزمایش‌ها را گرفته و مقدار نیروی شکست و ارتفاع هوک در هر دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده را پیش‌بینی کرد. سپس این مقادیر با مقادیر واقعی جهت راست آزمایی مدل مقایسه گردید و خطای مدل سازی آماری بدست آمد که در جداول (۷، ۸ و ۹) نشان داده شده است. در جدول ۷ نتایج نیروی شکست بدست آمده از مدل آماری با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی نیروی شکست مقایسه گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مدل آماری به طور میانگین حدود ۳/۸۸ درصد با حالت تجربی اختلاف دارد. همچنین در جداول ۸ و ۹ نتایج ارتفاع هوک بدست آمده از مدل آماری با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی ارتفاع هوک در هر دو

سمت پیش‌رونده و پس‌رونده مقایسه گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود مدل آماری در پیش‌بینی نتایج ارتفاع هوک به طور میانگین حدود ۹/۹۵ درصد با حالت تجربی اختلاف دارد.

شکل ۶ تصویر محل شکست نمونه جوشکاری شده تحت پارامترهای ($\omega=250 \text{ rpm}$, $V=25 \text{ mm/min}$, $\theta=3^\circ$) و شکل ۷ تصویر محل شکست نمونه جوشکاری شده تحت پارامترهای ($\omega=750 \text{ rpm}$, $V=50 \text{ mm/min}$, $\theta=4^\circ$) را که از فصل مشترک شکسته شده اند، نشان می‌دهد.

مطابق این شکل‌ها، شکست در داخل دکمه جوش اتفاق افتاده است؛ به گونه‌ای که دو ورق به طور کامل در راستای فصل مشترک از هم جدا شده‌اند. دلیل این شکست وجود عیب نقص پیوند تماسی در صفحه فصل مشترک می‌باشد. عیب نقص پیوند تماسی، در حقیقت با کاهش سطح مقطع جوش، اثری مخرب بر روی خواص مکانیکی دارد. در واقع عیب نقص پیوند تماسی باعث کاهش عرض ناگت و مقاومت شده و در نتیجه شکست از ناحیه فصل مشترک اتفاق افتاده است.

شکل ۸ تصویر محل شکست نمونه جوشکاری شده تحت پارامترهای ($\omega=500 \text{ rpm}$, $V=25 \text{ mm/min}$, $\theta=4^\circ$) را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در این نمونه شکست از فلز پایه ورق ۲/۵ میلی‌متر اتفاق افتاده است. این نمونه علاوه بر اینکه دارای ارتفاع هوک مناسب بود، ضخامت موثر ورق بالایی نیز در این نمونه

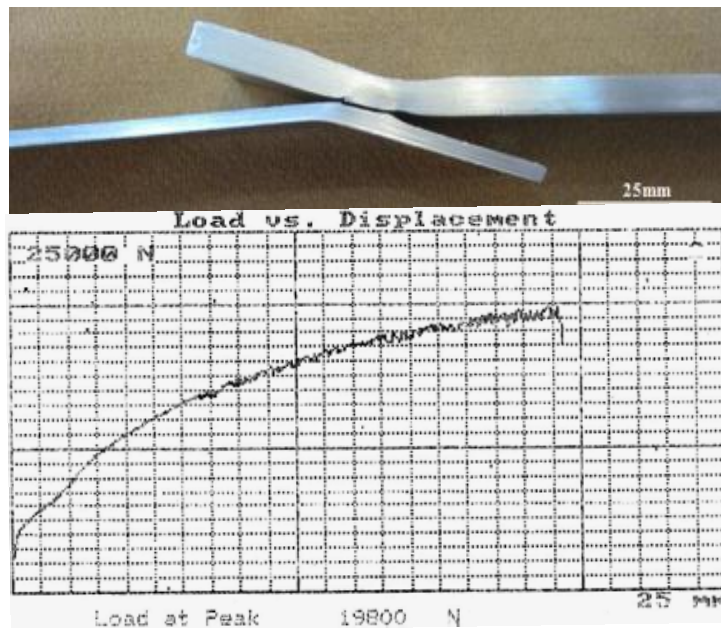
کافی و مناسب جهت تحمل نیروی کششی بود. همچنین شیب ملایم عیب هوک نیز سبب گردید که در این نمونه، شکست از ناحیه جوش اتفاق نیفتد؛ و از آنجا که استحکام ورق آنیل و نازک ۲/۵ میلی متری، کمتر از ورق ۵ میلی متری کار سرد شده بود، لذا نمونه از فلز پایه ورق ۲/۵ میلی متری آنیل دچار شکست شد.

جدول ۶- معادلات آنالیز رگرسیون

ردیف	هدف	معادله رگرسیون
۱	نیروی شکست	$T = 34405 - 34.7 * \omega - 728.5 * V + 775 * \theta + 1.662 * \omega * V - 25.5 * V * \theta + 6.408 * V^2 - 0.01464 * \omega * V^2$
۲	ارتفاع هوک سمت پیش رونده	$H(AS) = 1.01 + 0.000608 * \omega - 0.00985 * V - 0.111 * \theta$
۳	ارتفاع هوک سمت پس رونده	$H(RS) = 0.2571 + 3.7894e-3 * \omega - 0.0847 * V + 0.7078 * \theta + 9.296e-5 * \omega * V - 2.366e-3 * \omega * \theta - 1.5e-3 * V * \theta + 1.422e-6 * \omega^2 + 8.95e-4 * V^2 + 1.92e-5 * \omega * V * \theta - 1.619e-6 * \omega * V^2$

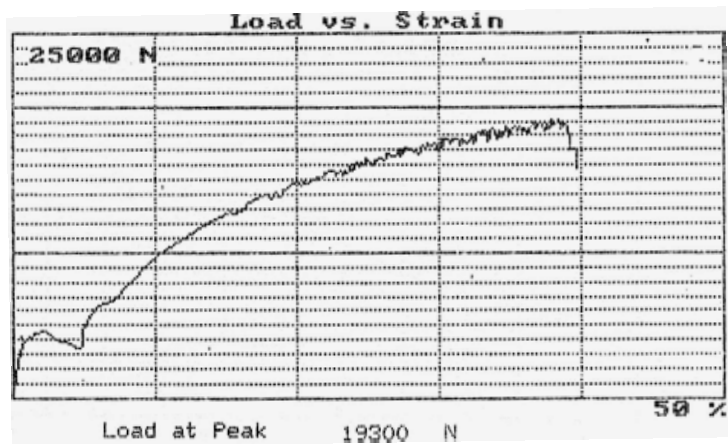
جدول ۷- مقایسه نتایج مدل آماری رگرسیون با مقادیر واقعی نیروی شکست

ردیف	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	زاویه استقرار (°)	نتایج تجربی T(N)	نتایج مدل آماری T(N)	خطا (%)
1	250	25	3	19800	20035	1.19
2	500	25	2	20100	19323	3.86
3	500	25	4	20500	19599	4.39
4	750	50	4	19300	20471	6.06

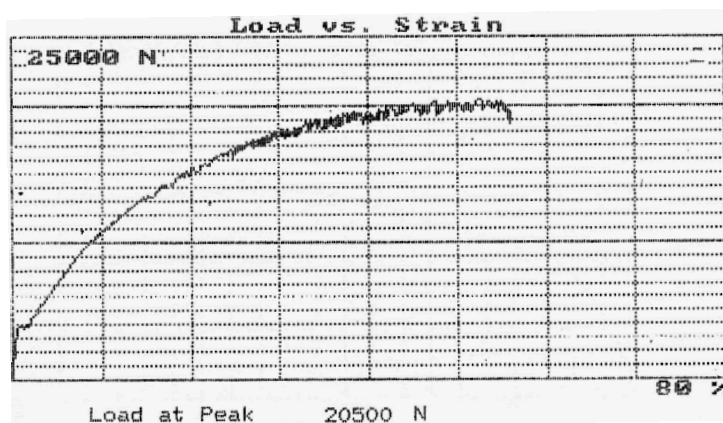


شکل ۶- شکست نگاری محل شکست در نمونه تحت پارامترهای ($\omega=250 \text{ rpm}$, $V=25 \text{ mm/min}$, $\theta=3^\circ$)





شکل ۷- شکست نگاری محل شکست در نمونه تحت پارامترهای ($\omega=750$ rpm, $V=50$ mm/min, $\theta=4^\circ$)



شکل ۸- شکست نگاری محل شکست در نمونه تحت پارامترهای ($\omega=500$ rpm, $V=25$ mm/min, $\theta=4^\circ$)

جدول ۸- مقایسه نتایج مدل آماری رگرسیون با مقادیر واقعی ارتفاع هوک در سمت پیش‌رونده

ردیف	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	زاویه استقرار ($^\circ$)	نتایج تجربی H(mm)	نتایج مدل آماری H(mm)	خطا (%)
1	250	25	3	0.611	0.582	4.63
2	500	25	2	0.913	0.846	7.33
3	500	25	4	0.558	0.624	11.82
4	750	50	4	0.592	0.529	10.55

جدول ۹- مقایسه نتایج مدل آماری رگرسیون با مقادیر واقعی برای ارتفاع هوک در سمت پس رونده

ردیف	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	زاویه استقرار (°)	نتایج تجربی H(mm)	نتایج مدل آماری H(mm)	خطا (%)
1	250	25	3	0.712	0.658	7.58
2	500	25	2	1.126	1.058	6.04
3	500	25	4	0.723	0.613	15.21
4	750	50	4	0.766	0.662	13.57

پس از مدل سازی آماری و آنالیز رگرسیون، جهت تعیین میزان اهمیت هر یک از پارامترهای ورودی فرایند (سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه استقرار ابزار) و تأثیرات متقابل آنها بر توابع هدف (نیروی شکست و ارتفاع هوک) در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی از روش آنالیز واریانس استفاده و مقدار F که نسبت واریانس پارامتر به واریانس خطا می باشد با توجه به بازه اطمینان، ۹۵ درصد ($\alpha=0.05$) لحاظ گردید. نمودار رگرسیون هر هدف در شکل های ۹ و ۱۰، و نتایج حاصل از تحلیل آنالیز واریانس در جداول ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۹ و جدول ۱۰ مشاهده می شود، سرعت پیشروی ابزار در مقایسه با سرعت دورانی و زاویه استقرار ابزار، بر نیروی شکست تأثیر بیشتری داشته و تأثیرش بر نیروی شکست کاهنده می باشد. با توجه به اینکه شکل گیری عیوب (عیب تونلی و عیب نقص پیوند تماسی) متأثر از سرعت پیشروی ابزار بوده و با تغییرات نیروی شکست رابطه مستقیم دارد، لذا سرعت پیشروی ابزار تأثیر بیشتری بر تغییرات نیروی شکست خواهد داشت. همچنین سرعت پیشروی زیاد، مخصوصاً در اتصال لبه روی هم، سبب ایجاد ترک هایی در فصل مشترک می شود که این امر سبب افت شدید خواص مکانیکی مخصوصاً در تست کشش می گردد [۱۷].

در حقیقت در سرعت پیشروی زیاد، به دلیل اینکه مدت زمان تماس ابزار با سطح قطعه کار به شدت کاهش می یابد، اصطکاک و گرمای کافی تولید نمی شود و به همین دلیل، مواد نمی توانند به اندازه کافی توسط پین سیلان پیدا کنند. در نتیجه منجر به شکل گیری عیب

تونلی در سمت پیش رونده می گردد. که در تطابق با تحقیقات انجام گرفته توسط Cao و Jahazi [۱۸] می باشد. همچنین افزایش بیش از حد سرعت پیشروی باعث گردید، در سرعت های دورانی زیاد، عیب نقص پیوند تماسی در سمت پس رونده شکل گیرد. به گونه ای که دو ورق به طور کامل در راستای فصل مشترک از هم جدا شدند.

با توجه به شکل ۹ و جدول ۱۰، سرعت دورانی ابزار پس از سرعت پیشروی بر نیروی شکست موثر و تأثیر آن افزایش می باشد. دلیل افزایش نیروی شکست با زیاد شدن سرعت دورانی ابزار، این می تواند باشد که با افزایش سرعت دورانی سیلان مواد و حرارت ورودی فرایند افزایش یافته و باعث افزایش دمای ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی می شود؛ از آنجا که عیب هوک نیز در این ناحیه تشکیل می گردد، لذا ارتفاع هوک نیز در هر دو سمت پیش رونده و پس رونده افزایش می یابد و با توجه به ضخامت متفاوت طرح اتصال، قرار گرفتن ورق ضخیم تر (۵ میلی متر) در بالا و جهت گیری هوک به سمت بالا، لذا ضخامت موثر هر دو ورق تقریباً یکسان شده و باعث شکست از فلز پایه (ورق ۲/۵ میلی متر) گردید. همچنین با توجه به شکل ۹ و جدول ۱۰، زاویه استقرار ابزار بدیل تأثیر کم بر حرارت و سیلان مواد، بر میزان نیروی شکست کمترین تأثیر را داشت.

در شکل ۱۰ و جدول ۱۱ تأثیر پارامترهای فرایند بر تغییرات ارتفاع هوک نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، تأثیر پارامتر سرعت دورانی بر تغییرات ارتفاع هوک نسبت به پارامترهای سرعت پیشروی و زاویه

کاهنده دارد. در اینجا نیز زاویه استقرار ابزار چندان بر روی تغییرات ارتفاع هوک موثر نمی‌باشد.

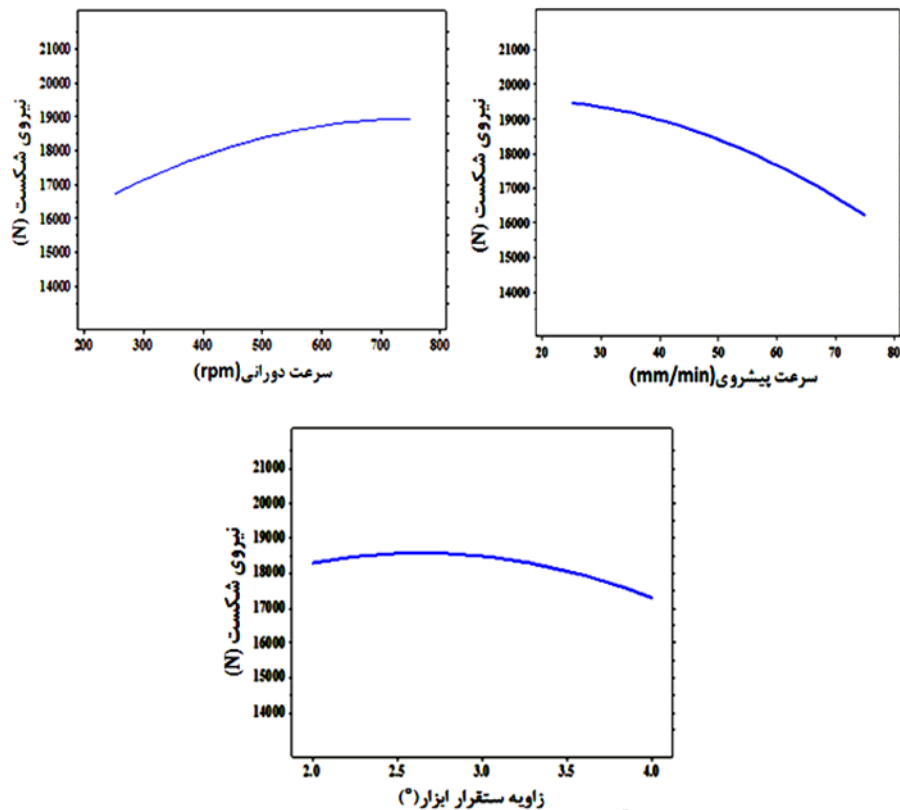
جدول ۱۰- تحلیل واریانس نیروی شکست

پارامتر	مجموع میانگین مربعات (MS)	واریانس (F)	تأثیر پارامتر P (%)
سرعت دورانی	1.254e7	12.40	16.77
سرعت پیشروی	2.657e7	26.26	35.52
زاویه استقرار	2.5e6	2.47	3.35
باقیمانده	3.318e7	-----	44.36
مجموع	7.48e7	-----	100

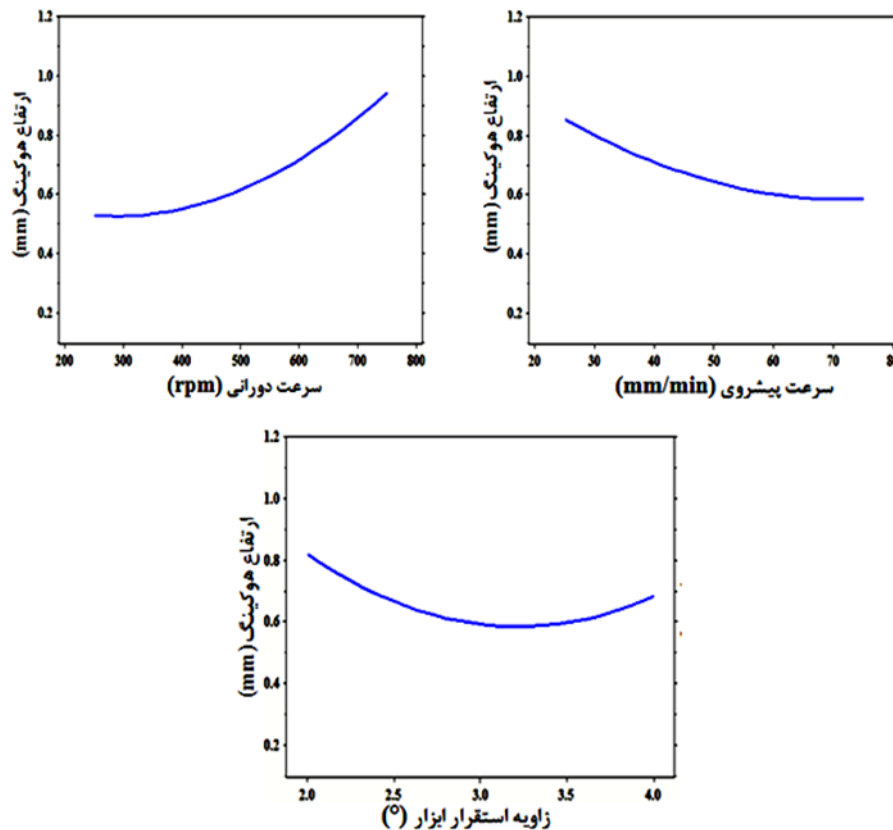
جدول ۱۱- تحلیل واریانس ارتفاع هوک

پارامتر	مجموع میانگین مربعات (MS)	واریانس (F)	تأثیر پارامتر P (%)
سرعت دورانی	0.467	16.57	19.57
سرعت پیشروی	0.299	10.24	12.51
زاویه استقرار	0.149	5.15	6.23
باقیمانده	1.475	-----	61.69
مجموع	2.39	-----	100

استقرار ابزار بیشتر و تأثیر آن افزایش می‌باشد. همانطور که ذکر شد، به نظر می‌رسد به دلیل وجود شیارهای روی پین چرخنده، با افزایش سرعت دورانی، سیلان عمودی مواد در فصل مشترک و دمای ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی به شدت افزایش یافته و در نتیجه ارتفاع هوک افزایش می‌یابد و فصل مشترک را تا ارتفاع بیشتری بالا می‌کشد. همچنین با افزایش سرعت دورانی ابزار، حرارت ورودی فرایند افزایش یافته و چون حرارت ورودی تأثیر بسزایی در شکل‌گیری و ارتفاع هوک در هر دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده دارد و تغییرات هوک در حالت کلی بیشتر تابع گرمای ورودی فرایند جوشکاری می‌باشد، در نتیجه سرعت دورانی ابزار نسبت به دو پارامتر دیگر تأثیر بیشتری در شکل‌گیری و ارتفاع هوک خواهد داشت. همچنین با توجه به شکل ۱۰ و جدول ۱۱، سرعت پیشروی ابزار نیز بر تغییرات ارتفاع هوک موثر بوده و تأثیر



شکل ۹- نمودار رگرسیون نیروی شکست



شکل ۱۰- نمودار رگرسیون ارتفاع هوک

۵- نتیجه گیری

اثر تغییرات زاویه استقرار ابزار بر روی حرارت ورودی و میزان سیلان عمودی مواد ناچیز بوده و تغییرات نیروی شکست و ارتفاع هوک با تغییر زاویه استقرار ابزار چندان محسوس نمی‌باشد.

مدل آماری به خوبی میزان تأثیرگذاری پارامترهای فرایند جوشکاری را ارائه داد و بر همین اساس پارامتر سرعت پیشروی ابزار بیشترین تأثیر را بر تغییرات نیروی شکست و پارامتر سرعت دورانی ابزار بیشترین تأثیر را بر تغییرات ارتفاع هوک داشته و پارامتر زاویه استقرار ابزار کمترین تأثیر را نسبت به دو پارامتر دیگر داشت.

نتایج خواص مکانیکی حاصل از مدل آماری به طور میانگین با حالت تجربی در حدود ۳/۸۸ درصد خطا داشت.

در این پژوهش با استفاده از روش رویه پاسخ، مدل سازی و تأثیر پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی بر روی ورقهای آلومینیومی ۵۴۵۶ با ضخامت متفاوت مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت. که نتایج به صورت خلاصه در زیر آمده است:

افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی ابزار (افزایش گام جوشکاری)، سبب افزایش حرارت ورودی، افزایش سیلان عمودی مواد و در نتیجه افزایش ارتفاع هوک و کاهش ضخامت موثر ورق شده، و باعث گردید شکست از منطقه ترمومکانیکال، جایی که بیشترین حرارت ورودی به آنجا وارد می‌شود اتفاق بیفتد.

با افزایش سرعت پیشروی ابزار، اختلاط و سیلان عمودی مواد کاهش یافته و در نتیجه ارتفاع هوک نیز در هر دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده کاهش می‌یابد.

تقدیر و تشکر

آقایان مهندسین رنجبرکی، رضایی، دهقانی، قاسمی،
تطهیری و علیزاده که در انجام آزمایش‌ها پشتیبان
اینجانب بودند، سپاسگزاری می‌نمایم.

از زحمات و همکاری کارکنان محترم کارگاه جوش و
آزمایشگاه مهندسی مواد صنایع صنم به خصوص جناب

مراجع

- [1] Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Temple-Smith, P., Dawes, C. J. (1991). "International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application". No. 9125978.8.
- [2] Mishra, R. S., Mab, Z. Y. (2005). "Friction stir welding and processing". *Materials Science and Engineering*, R. 50, pp. 1–78.
- [3] Dubourg, L., Merati, A., Jahazi, M. (2010). "Process optimization and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin". *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 3324-3330.
- [4] Chen, H. B., Yan, K., Lin, T., Chen, S.B., Jiang, C.Y. (2006). "The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 433, pp. 64-69.
- [۵] شیرازی، ح.، خیراندیش، ش.، صفرخانیان م. ع. (۱۳۹۱). "تأثیر سرعت پیشروی ابزار جوشکاری اصطکاکی اختلاطی (FSW) بر ریزساختار اتصال لبه روی هم (Lap-Joint) ورقهای با ضخامت متفاوت آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶". سومین کنفرانس بین المللی عملیات حرارتی مواد، اصفهان.
- [6] Kim, I.S., Son, K.J., Yang, Y.S., Yaragada, P.K.D.V. (2003). "Sensitivity analysis for process parameters in GMA welding processes using a factorial design method". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 763–769.
- [7] Ganjigatti, J. P., Pratihari, D. K., Choudhury, A. (2008). "Modeling of the MIG welding process using statistical approaches". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 35, pp. 1166-1190.
- [8] Nagesh, D.S., Datta, G.L. (2003). "Prediction of weld bead geometry and prediction in shielded metal-arc welding using artificial neural networks". *International Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 79, pp. 1–10.
- [9] Wu, C.S., Gao, J.Q., Zhao, Y.H. (2007). "Neural network for weld penetration control in gas tungsten arc welding". *Journal of Acta Metal*, Vol. 19, pp. 27-33.
- [10] Okuyucu, H., Kurt, A., Arcaklioglu, E. (2007). "Artificial neural network application to the Frictions stir welding of aluminum". *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 78–84.
- [11] Fratini, L., Buffa, G., Palmeri, D. (2009). "Using a neural network for predicting the average grain size in friction stir Welding processes". *Computers & Structures*, Vol. 87, pp. 1166-1174.
- [12] American Welding Society (AWS) Committee D17.3. (2009). "Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Hardware". Miami Edition.1, No. 17.3.
- [13] Kathleen, M., et. al. (1985). "Metals Handbook: Metallography and Microstructure". American Society for Metals (ASM), Vol. 9, Ninth edition, pp. 352-354.
- [14] Buffa, G., Campanile, G., Fratini, L. (2009). "Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 519, pp. 19–26.
- [15] Ericsson, M., Jin, L.Z., Sandstrom, R. (2007). "Fatigue properties of friction stir overlap welds". *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp. 57-69.
- [16] Chen, Y.C., Nakata, K. (2008). "Friction stir lap joining aluminum and magnesium alloys". *Scripta Materialia*, Vol.68, pp. 433-436.

- [17] Fersini, D., Pirondi, A. (2007). "Fatigue behavior of Al2024-T3 friction stirs welded lap joints". *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, pp. 468–480.
- [18] Cao, X., Jahazi, M. (2011). "Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy". *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 1-11.