

مطالعه تجربی اثر سرعت دورانی و سرعت خطی ابزار در جوشکاری لب روی هم اصطکاکی اغتشاشی ورق های پلی آمید

چکیده: در این پژوهش به جوشکاری خطی اصطکاکی اغتشاشی بر روی ورق های پلی آمید که به صورت لب روی هم قرار گرفته بودند، پرداخته شده است. پارامترهای مورد بررسی شامل سرعت دورانی و سرعت پیشروی است. با استفاده از طراحی آزمایش عاملی کامل، نمونه ها جوشکاری شده و تحت آزمون کشش قرار گرفتند. بیشترین استحکام برای پارامترهای با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۸ میلی متر بر دقیقه برابر با ۲۰۹۸ نیوتن است. همچنین سطح مقطع نمونه های جوشکاری شده برای مطالعه نحوه اثر پارامترهای جوشکاری بر اتصال مورد مطالعه قرار گرفت که نشان می دهد افزایش نسبت سرعت دورانی ابزار به سرعت پیشروی منجر به تولید حرارت مناسب و توزیع دمایی بهتر شده و در نتیجه ورق پایینی بیشتر در فرایند اتصال مشارکت می کند و استحکام بالاتری در اتصال مشاهده می شود. مهمترین دستاورد مطالعه حاضر این است که بدون نیاز به طراحی ابزاری خاص که در مطالعات گذشته در مورد پلیمرها بر آن تاکید شده است، می توان به اتصال مناسبی برای پلی آمید با استفاده جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دست یافت. همچنین با استفاده از نسبت مناسب سرعت دورانی به سرعت پیشروی ابزار می توان کیفیت اتصال را بهبود بخشید.

واژه های راهنما: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، پلی آمید، آزمون کشش، سرعت دورانی، سرعت پیشروی ابزار

سروش سلطانی
کارشناسی ارشد

موسی ساجد*
استادیار

محمدعلی
صائمی صدیق
دانشیار،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه شهید مدنی آذربایجان،
تبریز

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۲
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۳۱
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۳

Soroush Soltani
MSc

Moosa Sajed*
Assistant Professor

Mohammad Ali
Saeimi Sadigh
Associate Professor,
Mechanical Engineering
Department, Azarbaijan
Shahid Madani
University, Tabriz

An experimental investigation on effect of tool rotational speed and feed rate in friction stir overlap welding of polyamide sheets

Abstract: In this research, linear friction stir welding has been done on polyamide sheets in the overlap configuration. The investigated parameters include tool rotational speed and feed rate. Using the full factorial design of experiments, the samples were welded and subjected to tensile test. The maximum strength was obtained for the specimen welded with a tool rotational speed of 1600 rpm and feed rate of 8 mm/min that is equal to 2098 N. Also, the cross section of the welded samples was studied to investigate the effect of the welding parameters on the weld nugget, which shows that the increase in the ratio of the tool rotational speed to the feed rate leads to a suitable heat input and better temperature distribution which results in more contribution of the lower plate in the welding process and stronger joints. The most important achievement of the present study is that without the need to design a special tool that has been emphasized in the past studies about polymers, it is possible to achieve a suitable joint for polyamide using friction stir welding. Also, the quality of connection can be improved by using the appropriate ratio of tool rotational speed to feed rate.

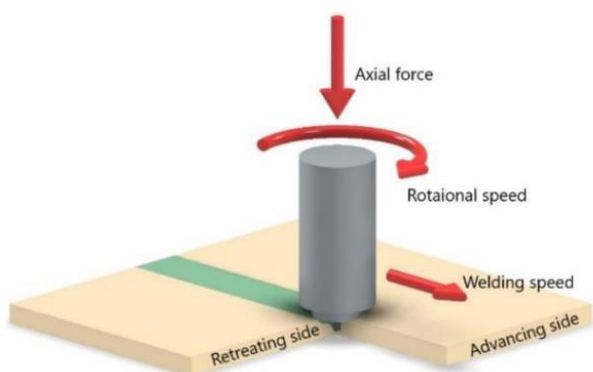
Keywords: Friction stir welding, Polyamide, Tensile test, Tool rotational speed, Feed rate

۱- مقدمه

همچون سایر روش‌های جوشکاری و پردازش مواد، این فرایند نیز از جنبه‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از ویژگی‌های مهم در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مانند هر روش جوشکاری دیگر، توجه به تنش‌های پسماند و کنترل آن‌ها است. در حین فرایند جوشکاری اصطکاکی به دلایل مختلفی همچون گرادیان حرارتی، گیربندی مستحکم، تغییر شکل پلاستیک و نرخ کرنش بالا همواره با مقادیری تنش پسماند در قطعه جوشکاری شده روبرو هستیم [۹]. برخی از محققین تلاش کرده‌اند تا میزان این تنش پسماند را با روش‌های متنوعی کاهش دهند. هاناسکاران و همکاران [۹] از روش شات پینینگ لیزری به این منظور استفاده کرده‌اند. در این روش از یک باریکه لیزر توان بالا امواجی به قطعه اعمال می‌شود که موجب ایجاد تغییر شکل پلاستیک و تنش‌های پسماند فشاری در سطح قطعه می‌شود [۱۰]. اگرچه این نوع جوشکاری برای اولین بار برای آلیاژهای آلومینیوم ابداع شد [۱۱]، اخیراً کاربرد آن در پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری گسترش یافته است [۸]. پلیمرها به دلیل خواص منحصر به فرد خود از جمله وزن سبک، مقاومت در برابر خوردگی و نسبت خوب مقاومت به وزن در کاربردهای مختلف بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. بر روی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلیمرها مطالعات مختلفی انجام شده است. لامبیاس و همکاران [۱۲] مطالعات انجام شده در حوزه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خطی و نقطه‌ای پلیمرها را خلاصه و دسته‌بندی کرده‌اند. در این مقاله اشاره شده است که روش متداول در اتصال پلیمرها استفاده از چسب، اتصال مکانیکی و جوشکاری است. روش‌های جوشکاری متفاوتی از جمله گرمایش رسانشی، جوشکاری اصطکاکی، جوشکاری با استفاده از امواج، گرمایش همرفتی و استفاده از مواد پرکننده داغ برای جوشکاری ترموپلاستیک‌ها استفاده شده است. ویداکیس و همکاران [۱۳] به بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای ورق‌های پلی آمید ۶ تولید شده به روش اکستروژن افزایشی پرداخته‌اند. روای و همکاران [۱۴] به مطالعه اثر تقویت ورق‌های پلی آمید ۶۶ با استفاده از الیاف شیشه‌ای پرداخته‌اند و تاثیر این تقویت را در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی این ورق‌های کامپوزیتی مورد مطالعه قرار داده‌اند. ابوشان و همکاران [۱۵] به توسعه یک مدل جدید مبتنی بر هوش مصنوعی برای پیش بینی خواص مکانیکی اتصال بین ورق-های پلی کربنات و ای بی اس با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته‌اند. مدل‌های ارائه شده با روش‌های هوش مصنوعی در مقایسه با روش‌های عددی سرعت بسیار بیشتری در پردازش و ارائه نتایج نهایی دارند.

انقلاب اصلی استفاده از پلاستیک‌ها در صنایع خودروسازی در سال ۱۹۵۰ با معرفی اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ای بی اس) و در ادامه پلی‌آمید، پلی اکسی متیلن و پلی کربنات اتفاق افتاد. توسعه مداوم پلیمرهای پیشرفته به صورت قابل توجهی استفاده از آن‌ها را افزایش داد. به طور مشخص خواص مکانیکی مناسب پلاستیک‌ها در کنار ظاهر خوب آن‌ها و به طور خاص خود رنگ‌پذیری این مواد باعث شد تا مورد توجه قرار گیرند. استفاده از پلیمرها در صنایع خودروسازی در دهه‌های اخیر در حال افزایش بوده است. امروزه با استفاده از پلاستیک‌ها خودروهایی سبک‌تر، کم مصرف‌تر تولید می‌شوند و قطعاتی تولید شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند که دارای ویژگی‌هایی همچون مقاومت در برابر خوردگی، تافنس، انعطاف در طراحی و عمر بیشتر هستند [۱].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، یک روش اتصال نسبتاً جدید است که توسط موسسه جوشکاری در سال ۱۹۹۱ به ثبت رسید [۲]. در این روش، قطعات با کمک گرمای اصطکاکی ایجاد شده توسط ابزاری که به سرعت در حال چرخش است، متصل می‌شوند نحوه قرارگیری در حین جوشکاری در شکل (۱) نشان داده شده است. پیشرفت‌های مختلفی در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ایجاد شده است. از جمله آن‌ها استفاده از روش‌های هیبریدی جوشکاری است. به طور مشخص استفاده از جریان الکتریکی در حین جوشکاری به منظور تولید و توزیع بهتر حرارت و دستیابی به کیفیت بهتر جوشکاری از آن جمله است [۳]. استفاده از این فرایند در ساخت افزایشی پیشرفت جدید دیگری است که در این حوزه ایجاد شده است [۴، ۵]. پردازش اصطکاکی اغتشاشی نیز با وجود معرفی شدن در حدود دو دهه پیش، همچنان در مرکز توجه قرار دارد و انواع آلیاژها و کامپوزیت‌ها با استفاده از این روش مورد پردازش قرار می‌گیرد [۶، ۷].



شکل ۱ فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [۸]

حوزه اتصال با کیفیت پلیمرها با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام پذیرد. در همین راستا در مقاله حاضر به جوشکاری خطی لب روی هم اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های پلی امید پرداخته شده است و اثر پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی بر استحکام اتصال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که سرعت پیشروی نقش مهمی در استحکام کششی نمونه جوشکاری شده دارد. پارامترهای بررسی شده در این مطالعه شامل سرعت دورانی ۱۰۰۰ و ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۸ و ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه است. سایر پارامترها برای همه نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در مطالعه حاضر، ورق‌های پلی امید با ضخامت ۳ میلی‌متر با استفاده از روش جوشکاری خطی لب روی هم اصطکاکی اغتشاشی جوش داده شدند. پلی امیدها ترکیبات مولکولی بالایی با ساختار خطی با وزن مولکولی تا سی هزار تشکیل می‌دهند. ماکرومولکول‌ها از زنجیره‌های متیلن با گروه‌های امید تشکیل شده‌اند که به طور منظم در امتداد یک زنجیره قرار دارند. ابعاد نمونه‌های جوش ۲۱۵×۴۰ میلی‌متر بود. ابزار مورد استفاده در این مطالعه از جنس فولاد گرم کار H13 ماشین‌کاری شد. پین ابزار مورد استفاده به شکل استوانه ساده با قطر ۵ میلی‌متر و ارتفاع ۵/۲ میلی‌متر تراشکاری شد. قطر شانه ابزار نیز ۱۴ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ابزار پس از تراشکاری تحت عملیات حرارتی قرار گرفت و سختی آن تا ۵۴ راکول سی افزایش داده شد. برای انجام فرایند از فرز یونیورسال تولیدی شرکت ماشین‌سازی تبریز استفاده شد. به منظور بستن قطعه روی دستگاه فرز، فیکسچر مخصوصی طراحی و ساخته شد که با توجه به روبندهای فولادی در نظر گرفته شده برای آن از تغییر شکل و بالا آمدن ورق‌ها در حین جوشکاری ممانعت کند. شکل انجام فرآیند را برای یک نمونه به همراه ابزار و فیکسچر مورد استفاده نشان می‌دهد.

اختلاط مناسب مواد و دستیابی به جوش با کیفیت و استحکام قابل قبول تا حدود زیادی به میزان حرارت تولیدی و نحوه توزیع آن در حین فرایند وابسته است. با توجه به اهمیت حرارت تولید شده در حین فرایند در استحکام نهایی نمونه‌ها دو مورد از اصلی‌ترین پارامترهای موثر در میزان حرارت تولید شده به ناحیه جوش یعنی سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار مورد مطالعه قرار گرفت.

سرعت دورانی ابزار اصلی‌ترین عامل در تعیین میزان حرارت تولیدی است و با افزایش سرعت دورانی میزان حرارت تولیدی

در حالت کلی روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در مورد پلیمرها چندان موفقیت آمیز نیست اما برای دسته‌ای از پلیمرها و از جمله پلی امید شرایط متفاوت است که این به دلیل خواص ویژه این پلیمر است. پلی امید یک پلیمر مهندسی نیمه کریستالی با گروه‌های امید و کربونیل و پیوند هیدروژنی بین زنجیره‌های است که منجر به سفتی و استحکام بالا در آن می‌شود. با توجه به آن عملکرد مکانیکی خوب، این پلیمر اغلب در تجهیزات ورزشی و یاتاقان‌ها و کاربردهایی که در آن در معرض شرایط بارگذاری مختلف و از جمله ضربه قرار دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. درصد کریستالی بودن برای پلی امید حدود ۳۰ درصد است. افزایش نرخ کرنش و کاهش دما می‌تواند ماده را در کرنش‌های کوچک تقویت کند که با تئوری هم ارزی دما-زمان پلیمرها مطابقت دارد. با این حال، با افزایش نرخ کرنش، گرم شدن نمونه منجر به نرم شدن حرارتی آشکار در کرنش‌های بزرگ در نرخ کرنش‌های متوسط و بالا می‌شود [۱۶].

فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای پلیمرها اساساً متفاوت از فلزات است. برخلاف فلزات که در آن‌ها جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک فرایند حالت جامد در نظر گرفته می‌شود [۱۷]، با این حال در مورد پلیمرها ترکیبی از اتصال حالت جامد و ذوبی اتفاق می‌افتد. در واقع حرارت حاصل شده در حین این فرایند ناشی از گرمای اصطکاکی و سیلان برشی ویسکوز است. الحورانی و همکاران [۱۸] مدل المان محدود برای تحلیل جوشکاری ورق‌های به ضخامت ۱۴ میلی‌متر از جنس پلی اتیلن با چگالی بالا ارائه داده‌اند و در مدل خود این دو منشاء حرارت متفاوت را در نظر و گرفته و اثر آن‌ها را ترکیب کرده‌اند که منجر شده است تا نتایج مدل ارائه شده تطابق خوبی با اندازه‌گیری‌های تجربی داشته باشد. آقاجانی و همکاران [۱۹] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، مدلی برای شبیه‌سازی پلی کرنات در زیر آب ارائه داده‌اند. این مدل توانایی پیش بینی درصد انقباض و تشکیل گپ هوایی را در ناحیه اغتشاشی دارد. احمد و همکاران [۲۰] با استفاده از روش ترکیبی اویلری-لاگرانژی به مدل‌سازی جریان مواد در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلی اتیلن چگالی بالا پرداخته‌اند. در این مقاله از ذرات قابل ردگیری و اندازه‌گیری دما به صحت سنجی مدل ارائه شده پرداخته شده است که نتایج نشان دهنده انطباق مناسب نتایج در مدل عددی و تست تجربی است.

اگرچه مطالعاتی در حوزه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلیمرها صورت گرفته است اما در مقایسه با آلیاژها، تعداد و تنوع این مطالعات کمتر است و لازم است تا مطالعات بیشتری در

به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج، برای هر مورد از آزمایش‌ها سه نمونه تست کشش تهیه شد. میانگین حداکثر نیروی تحمل شده توسط هر نمونه قبل از شکست در جدول (۱) آمده است.



شکل ۲ فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

۳- نتایج و بحث

در مقاله حاضر، جوشکاری خطی لب روی هم اصطکاکی اغتشاشی پلی آمید مورد بررسی قرار گرفته است. در جوشکاری خطی اصطکاکی اغتشاشی پلی آمید به دلیل مقاومت در برابر حرارت کم، نوع پلیمر نیازی به دمای بالا ندارد. برای بهبود کیفیت سطح جوشکاری شده آزمایشات بیشتری مورد نیاز است. در مطالعه حاضر، نمونه‌ها با سرعت چرخش ابزار ۱۰۰۰ و ۱۶۰۰ دور در دقیقه، سرعت پیشروی ۲۵ و ۸ میلی‌متر بر دقیقه، و عمق فرورفتگی شانه ابزار ۰/۲ میلی‌متر، جوش داده شدند.

در شکل (۳) نمونه‌ها بعد از انجام آزمون کشش نشان داده شده است. در این شکل، محل جدایش در هر مورد با استفاده از کادر قرمز مشخص شده است. ورق‌های چسبانده شده روی نمونه‌های آزمون کشش به منظور جلوگیری از اعمال نیروهای خارج از محور نیز در تصاویر قابل مشاهده است. برای ارزیابی اتصالات از آزمون کشش استفاده شد. در هر مورد به منظور ارزیابی تکرارپذیری نتایج سه نمونه آزمون تهیه شد.

در شکل (۴) به عنوان نمونه نمودارهای نیرو-جابجایی برای نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه نمایش داده شده است. همچنین میانگین حداکثر نیروی تحمل شده توسط هر نمونه قبل از شکست در جدول (۱) خلاصه شده است.

افزایش می‌یابد. از طرفی سرعت پیشروی ابزار تعیین کننده زمان حرارت‌دهی به ناحیه جوش است و با افزایش سرعت پیشروی نرخ حرارت‌دهی به ناحیه جوش کاهش پیدا می‌کند. سطوح در نظر گرفته شده برای سرعت دورانی برابر با ۱۶۰۰ و ۱۰۰۰ دور در دقیقه در نظر گرفته شد. این مقادیر با توجه به محدوده در دسترس با توجه به دستگاه مورد استفاده و تست‌های اولیه انتخاب شده است. به نحوی که فاصله معنا داری بین سطوح به منظور امکان مطالعه اثر سرعت دورانی در استحکام اتصال ایجاد شود. از طرفی در نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت‌های کمتر از ۱۰۰۰ و بیشتر از ۱۶۰۰ دور دقیقه کیفیت ظاهری جوش چندان مناسب نبود. سطوح در نظر گرفته شده برای سرعت پیشروی نیز ۲۵ و ۸ میلی‌متر بر دقیقه است. در نتیجه با در نظر گرفتن طراحی آزمایش بر مبنای روش عاملی کامل در مجموع چهار آزمایش طراحی و انجام شد که در جدول (۱) خلاصه شده است. در روش عاملی کامل تمام حالت‌های ممکن و ترکیب‌های موجود از پارامترها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

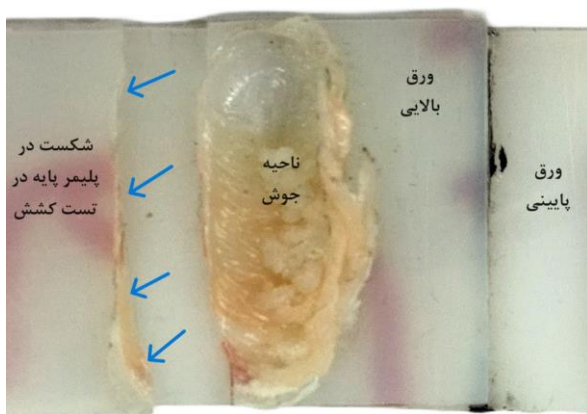
در استفاده از دو سطح، روش محاسبه تعداد آزمایش‌های مورد نیاز با استفاده از 2^n محاسبه می‌شود که در آن n تعداد پارامترهای مورد مطالعه است.

در مقاله حاضر با توجه به اینکه دو پارامتر مورد بررسی قرار گرفته است $n=2$ است و بنابر این تعداد کل آزمایش‌های مورد نیاز $2^2=4$ است. عمق فرورفتگی شانه‌ای برای همه نمونه‌ها، ثابت و برابر با ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. سایر پارامترهای جوشکاری نیز برای همه نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شد.

به منظور مطالعه اثر پارامترهای مورد بررسی بر کیفیت و استحکام جوش، مقطع نمونه‌ها توسط بازرسی چشمی مورد ارزیابی قرار گرفت و همچنین از آزمون کشش استفاده شد. در حین آزمون کشش، به منظور جلوگیری از اعمال نیروهای خارج از مرکز، دو تکه ورق با ضخامت برابر با ضخامت ورق‌های اصلی مورد استفاده در حین فرایند جوشکاری در محل قرار گرفتن نمونه در فک دستگاه تست کشش چسبانده شد. نمونه‌ها با سرعت ثابت ۱ میلی‌متر بر ثانیه مورد آزمون کشش قرار گرفتند.

جدول ۱ طراحی آزمایش فاکتوریل کامل و نتایج آزمون کشش

شماره نمونه	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	میانگین استحکام کششی (نیوتن)
۱	۱۶۰۰	۲۵	۱۰۴۸
۲	۱۰۰۰	۸	۱۵۹۲
۳	۱۰۰۰	۲۵	۱۳۸۴
۴	۱۶۰۰	۸	۲۰۹۸



(د)

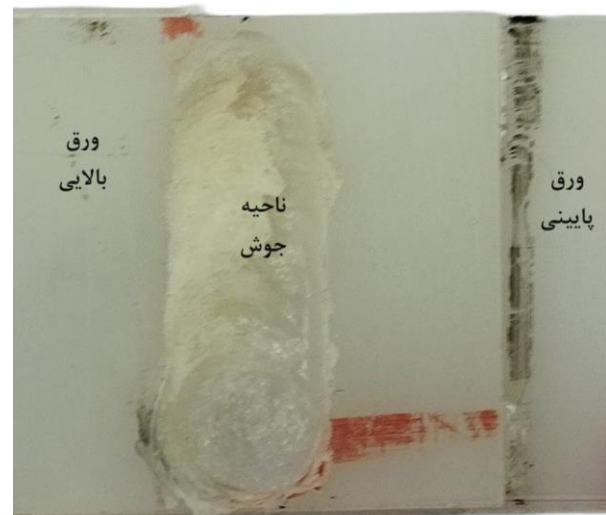
شکل ۳ محل جوش بعد از آزمون کشش؛ محل شکستگی در هر مورد روی شکل مشخص شده است. الف- نمونه شماره ۱، ب- نمونه شماره ۲ (ترک در پشت ورق زیرین اتفاق افتاده است)، ج- نمونه شماره ۳، د) نمونه شماره ۴ (در این نمونه شکست در پلیمر پایه رخ داده است).

بررسی ظاهر نمونه‌ها نشان می‌دهد که با پارامترهای استفاده شده در حالت کلی کیفیت مطلوب جوش مشاهده شده است. پلیمرها به دلیل خواص متفاوتی که از فلزات دارند و این شامل دمای ذوب پایین، ضریب انتقال حرارت پایین و رفتار پلاستیکی متفاوت می‌شود به طور کلی پاسخ مناسبی به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ندارند. به همین دلیل در مقالات توصیه به استفاده از ابزارهای خاص به منظور گرفتن جواب مناسب از جوش اصطکاکی اغت

شاشی ترموپلاستیک‌ها شده است. عمده تفاوت ابزارهای پیشنهادی برای جوشکاری ترموپلاستیک‌ها، استفاده از کفشک ثابت به عنوان شانه است به نحوی که امکان انتقال حرارت به سطح ورق و ناحیه جوش با روشی غیر از ایجاد حرارت اصطکاکی نیز میسر باشد. یک نمونه از این نوع از طراحی ابزار را می‌توان در مقاله بوچمان و همکاران [۲۱] مشاهده نمود. در این مقاله از یک کفشک ثابت که در آن سیال با حرارت بالا در جریان است در حین جوشکاری استفاده شده است. طرح شماتیک فرایند مورد استفاده در شکل (۵) نشان داده شده است. در سایر مقالات نیز کم و بیش روش مشابهی پیشنهاد شده است [۸، ۲۲، ۲۳]. واضح است که استفاده از این سیستم‌های پیچیده برای اتصال پلیمرها هزینه اتصال آن‌ها را با استفاده از روش اصطکاکی اغتشاشی افزایش داده و در بیشتر موارد استفاده از این فرایند را برای اتصال ترموپلاستیک‌ها و کامپوزیت‌های پایه پلیمری فاقد توجیه



(الف)



(ب)



(ج)

۲۰۰ باشد و نباید کمتر از این نسبت مورد استفاده قرار گیرد. البته توجه به این نکته لازم است که علاوه بر این نسبت، تک پارامترها هم حائز اهمیت هستند و محدوده مناسب برای هر پارامتر هم باید در نظر گرفته شود. مخصوصاً در مورد سرعت دورانی که اصلی‌ترین پارامتر تعیین‌کننده میزان حرارت ورودی به محدوده جوشکاری است، تعیین مقدار آن حساسیت قابل ملاحظه‌ای دارد. به عنوان مثال در آزمایش‌های انجام شده توسط نویسندگان در جوشکاری ورق‌های پلی آمید با سرعت دورانی بیش از ۱۶۰۰، به دلیل تولید گرمای زیاد، کیفیت سطح خوبی برای نمونه‌های جوشکاری شده مشاهده نشد. همانطور که در بالا اشاره شد و همچنین با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۴) و جدول (۱)، بیشترین استحکام، که ۲۰۹۸ نیوتن است، توسط نمونه‌ای که با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه و نرخ پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه بود به دست آمده است. به بیان دیگر در این مقاله بهترین استحکام در نسبت سرعت دورانی به سرعت پیشروی ۲۰۰ به دست آمد. این نمونه علاوه بر استحکام نهایی بالاتر، با توجه به مساحت بیشتر زیر نمودار آن در مقایسه با سایر نمونه‌ها، انرژی بیشتری نیز قبل از شکست جذب کرده و در نتیجه تافنس بالاتری را از خود نشان داده است. البته این به معنی وجود رابطه خطی و بهتر شدن استحکام و تافنس شکست با افزایش این نسبت نیست. به عنوان مثال نمونه جوشکاری شده با نسبت ۴۰ (سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۲۵ میلی‌متر در دقیقه) در مقایسه با نمونه جوشکاری شده با نسبت ۶۴ (سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۲۵ میلی‌متر در دقیقه) رفتار بهتری را از خود نشان داده است.

با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد ۲۰۰ باید به عنوان حداقل نسبت سرعت دورانی به سرعت پیشروی در جوشکاری ورق‌های پلی آمید در نظر گرفته شود. هرچند لازم است تا با بررسی رفتار اتصال در نمونه‌های با نسبت بالاتر از ۲۰۰ توسط انجام آزمایش‌های بیشتر این فرضیه تایید شود.

به منظور اطمینان از نتایج به دست آمده در مورد استحکام اتصالات ایجاد شده، اعداد به دست آمده در این آزمایش با منابع موجود مورد مقایسه قرار گرفت. هرچند که منابع چندانی در مورد این روش جوشکاری و برای این پلیمر در دسترس نیست.

حسین و همکاران [۱] در مطالعه خود در مورد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلی اتیلن استحکام حداکثر را ۸/۵۱ مگاپاسکال گزارش کرده است. در مطالعه حاضر نیز استحکام حدود ۸ مگاپاسکال به دست آمده است.

اقتصادی می‌کند. در مقاله حاضر به دلیل استفاده از ابزار متداول فرایند جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی در اتصال ورق‌های پلی آمید و انجام جوشکاری با کیفیت قابل قبول، می‌توان ادعا نمود که برای گروهی از ترموپلاستیک‌ها با استفاده از پارامترهای مناسب می‌توان به کیفیت مطلوبی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دست یافت که استفاده از این روش را برای جوشکاری این دسته از پلیمرها اقتصادی می‌کند. برای سایر پلیمرها استفاده از روش‌های دیگر و به طور مشخص جوشکاری التراسونیک شاید گزینه مناسب‌تری باشد.

در شکل (۳-الف) نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است. در این نمونه شکست در لبه کناری محل اتصال اتفاق افتاده است. به عبارت دیگر شکست در ناحیه اتصال اتفاق افتاده است. در شکل (۳-ب) نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است که ترک در پشت ورق زیرین اتفاق افتاده است و به همین دلیل روی شکل محل جدایش مشخص نیست. در این نمونه نیز شکست از محل اتصال اتفاق افتاده است. در این نمونه نیز شکست در ناحیه اتصال و لبه کناری آن اتفاق افتاده است. در شکل (۳-ج) نمونه جوشکاری شده در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است. مشابه نمونه‌های قبلی، در این نمونه نیز شکست در محل اتصال و در لبه کناری آن اتفاق افتاده است.

از بررسی این سه نمونه می‌توان چنین نتیجه گرفت اتصال ایجاد شده ضعیف‌تر از پلیمر پایه هستند و در عین حال لبه کناری اتصال ضعیف‌تر و شکننده‌تر از سایر قسمت‌های جوش است. در شکل (۳-د) نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است و برخلاف نمونه‌های قبلی، قطعه کاملاً از پلیمر پایه جدا شده است که این به معنی استحکام بالاتر جوش در مقایسه با پلیمر پایه است. در توضیح ارتباط بین پارامترهای مورد استفاده و نوع شکست مشاهده شده می‌توان همانگونه که در مقالات دیگر نیز پیشنهاد شده است [۲۴] از نسبت سرعت دورانی به سرعت پیشروی استفاده نمود. برای نمونه (۳-الف) این نسبت برابر با ۶۴، نمونه (۳-ب) ۱۲۵، نمونه (۳-ج) ۴۰ و برای نمونه (۳-د) این نسبت برابر با ۲۰۰ است. در واقع با افزایش این نسبت به ۲۰۰ به صورت قابل توجهی کیفیت جوش بهتر شده است و این مورد بیانگر این است که در جوشکاری ورق‌های پلی آمید حداقل نسبت سرعت دورانی به سرعت خطی بایستی



(ب)



(ج)



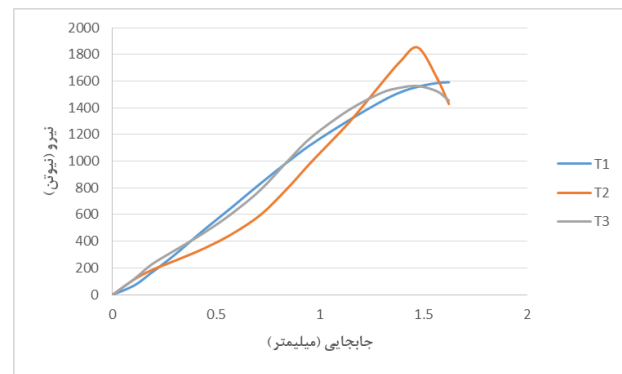
(د)

شکل ۶ بررسی سطح مقطع نمونه‌های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی. در هر مورد محل اتصال در مقطع نمونه با مشخص شده است. الف- نمونه شماره ۱، ب- نمونه شماره ۲، ج- نمونه شماره ۳، د- نمونه شماره ۴

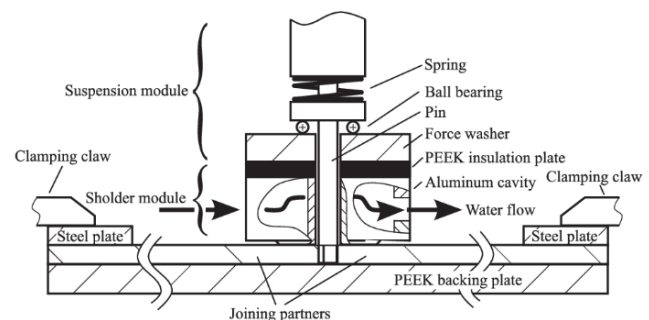
۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، جوشکاری خطی لب روی هم اصطکاکی اغتشاشی بر روی ورق‌های پلی‌آمید با موفقیت انجام شد. پارامترهای مورد مطالعه سرعت دورانی در سطوح ۱۶۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۲۵ و ۸ میلی‌متر بر دقیقه است. از تست کشش برای ارزیابی استحکام اتصال استفاده شد.

مهمترین تفاوت مقاله حاضر با تحقیقات قبلی اتصال لب روی هم ورق‌های پلی‌آمید با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است که تاکنون گزارش نشده است. در مطالعات قبلی عمدتاً جوشکاری لب به لب ورق‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. این در حالی است که به لحاظ صنعتی اتصال موفق لب روی هم ورق‌ها نیز مهم است و باید به آن توجه شود. از طرفی در مورد پلیمرها به دلیل عدم انتقال حرارت ناشی از اصطکاک ابزار با ورق بالایی به ورق پایینی از طریق رسانش همانند آنچه در آلیاژهای فلزی رخ می‌دهد، انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به ویژه در حالت لب روی هم به لحاظ فنی به مراتب پیچیده‌تر است. این اتصال با موفقیت در مقاله حاضر انجام شده است و همچنین نشان داده شد که امکان اتصال پلی‌آمید با کیفیت قابل قبول



شکل ۴ نمودارهای نیرو جا به جایی آزمون کشش سه نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۵ طرحواره ابزار مورد استفاده توسط بوچمان و همکاران [۲۱] که دارای شانه ثابتی است که با عبور سیال داغ از درون آن امکان کنترل دمایی در سطح پلیمر ایجاد شده است.

به منظور مطالعه بهتر اثر پارامترهای مورد بررسی بر کیفیت اتصال ایجاد شده، سطح مقطع نمونه‌های جوشکاری شده نیز به صورت چشمی مورد بازرسی قرار گرفت. با مطالعه سطح مقطع نمونه‌های جوشکاری شده مشاهده می‌شود که دو ورق به خوبی با هم در منطقه همزن ادغام شده اند که این مورد در شکل ۶ قابل مشاهده است. در این شکل ناحیه اختلاط برای هر نمونه با استفاده از کادر قرمز مشخص شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۸ میلی‌متر در دقیقه (شکل ۶ الف)، در مقایسه با سایر نمونه‌ها، بیشترین نفوذ و اختلاط مواد در ورق پایینی را دارد. این خود دلیل دیگری در تایید انتخاب پارامترهای جوشکاری بهتر برای این نمونه است که منجر به استحکام بالاتر در این نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌ها است.



(الف)

- structures," *Additive Manufacturing Letters*, vol. 8, p. 100184, 2024/02/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100184>.
- [6] R. Kumar, N. Mehrotra, and K. Pal, "Effect of friction stir processing on mechanical, in vitro degradation, and biocompatibility behaviour of stir casted Mg-Zn-rare earth oxide composites for biodegradable implant applications," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 972, p. 172767, 2024/01/25/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172767>.
- [7] J. Iwaszko and M. Sajed, "Technological Aspects of Producing Surface Composites by Friction Stir Processing—A Review," *Journal of Composites Science*, vol. 5, no. 12, p. 323, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/jcs5120323>.
- [8] M. A. R. Pereira, A. M. Amaro, P. N. B. Reis, and A. Loureiro, "Effect of Friction Stir Welding Techniques and Parameters on Polymers Joint Efficiency—A Critical Review," *Polymers*, vol. 13, no. 13, p. 2056, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13132056>.
- [9] M. P. Dhanasekaran, M. Agilan, S. Avinash, K. N. Vidyananda, G. Sudarshan Rao, and D. Roy Mahapatra, "Influence of laser shock peening on Residual stress and microhardness of AA2219 friction stir weld," *Materials Letters*, vol. 356, p. 135586, 2024/02/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135586>.
- [10] C. Zhang, Y. Dong, and C. Ye, "Recent developments and novel applications of laser shock peening: A review," *Advanced Engineering Materials*, vol. 23, no. 7, p. 2001216, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.202001216>.
- [11] M. Sajed and H. Bisadi, "Experimental failure study of friction stir spot welded similar and dissimilar aluminum alloys," *Welding in the World*, vol. 60, no. 1, pp. 33-40, 2016/01/01 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s40194-015-0268-6>.
- [12] F. Lambiase, H. A. Derazkola, and A. Simchi, "Friction Stir Welding and Friction Spot Stir Welding Processes of Polymers—State of the Art," *Materials*, vol. 13, no. 10, doi: 10.3390/ma13102291.
- [13] N. Vidakis, M. Petousis, N. Mountakis, and J. D. Kechagias, "Optimization of friction stir welding for various tool pin geometries: the weldability of Polyamide 6 plates made of material extrusion additive manufacturing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 124, no. 7, pp. 2931-2955, 2023/02/01 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10675-5>.
- [14] N. Ravi, M. Shanmugam, S. Bheemappa, and N. Gowripalan, "Influence of reinforcement on tribological properties of friction stir welded glass fiber reinforced polyamide 66," *Journal of*
- بدون نیاز به طراحی ابزار خاص (که در مقالات پیشین برای سایر پلیمرها پیشنهاد شده است)، وجود دارد.
- بنا بر نتایج به دست آمده از این مقاله، در نسبت‌های سرعت دورانی به نرخ پیشروی کمتر از ۲۰۰، استحکام جوش از پلیمر پایه کمتر است؛ از این رو پیشنهاد می‌شود حداقل نسبت این دو پارامتر در جوشکاری ورق‌های پلی آمید ۲۰۰ در نظر گرفته شود. بالاترین استحکام به دست آمده مربوط به نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه و برابر با ۲۰۹۸ نیوتن و پایین‌ترین استحکام به دست آمده مربوط به نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه و برابر با ۱۰۴۸ نیوتن می‌باشد.
- همچنین نتایج نشان می‌دهد که نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه، در مقایسه با سایر نمونه‌ها، بیشترین نفوذ و اختلاط مواد در ورق پایینی را دارد که منجر به استحکام بالاتر در این نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌ها است.

۵- مراجع

- [1] I. M. Husain, R. K. Salim, T. Azdast, S. Hasanifard, S. M. Shishavan, and R. Eungkee Lee, "Mechanical properties of friction-stir-welded polyamide sheets," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 10, no. 1, p. 18, 2015/08/01 2015, doi: 10.1186/s40712-015-0047-6.
- [2] S. Sattari, H. Bisadi, and M. Sajed, "Mechanical properties and temperature distributions of thin friction stir welded sheets of AA5083," *International Journal of Mechanics and Applications*, vol. 2, no. 1, pp. 1-6, 2012, doi: <https://doi.org/10.5923/j.mechanics.20120201.01>.
- [3] M. Sajed, J. W. Guerrero, and H. A. Derazkola, "A Literature Survey on Electrical-Current-Assisted Friction Stir Welding," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 3, doi: <https://doi.org/10.3390/app13031563>.
- [4] H. Tagimalek and M. Mahmoodi, "Experimental evaluation of T-peel strength on functionally graded Al5083 and HDPE tri-laminated composites fabricated by colding-assisted friction stir additive manufacturing," *Journal of Advanced Joining Processes*, vol. 9, p. 100174, 2024/06/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2023.100174>.
- [5] Z. Kallien, L. Rath, A. Roos, and B. Klusemann, "Application of friction surfacing for solid state additive manufacturing of cylindrical shell

- [20] B. Ahmad, F. Almaskari, J. Sheikh-Ahmad, S. Deveci, and K. Khan, "Thermomechanical Modeling of Material Flow and Weld Quality in the Friction Stir Welding of High-Density Polyethylene," *Polymers*, vol. 15, no. 15, doi: 10.3390/polym15153230.
- [21] E. Buchmann, M. Erdmann, M. Köberl, and P. Höfer, "A stationary shoulder with fluid temperature control for friction stir welding of polymers: development and investigation," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 121, no. 9, pp. 5901-5911, 2022/08/01 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09643-w>.
- [22] M. A. R. Pereira, I. Galvão, J. D. Costa, R. M. Leal, and A. M. Amaro, "Joining of Polyethylene Using a Non-Conventional Friction Stir Welding Tool," *Materials*, vol. 15, no. 21, p. 7639, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15217639>.
- [23] S. H. Iftikhar, A.-H. I. Mourad, J. Sheikh-Ahmad, F. Almaskari, and S. Vincent, "A Comprehensive Review on Optimal Welding Conditions for Friction Stir Welding of Thermoplastic Polymers and Their Composites," *Polymers*, vol. 13, no. 8, p. 1208, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13081208>.
- [24] M. Mahmoudiniya, A. H. Kokabi, M. Goodarzi, and L. A. I. Kestens, "Friction stir welding of advanced high strength dual phase steel: Microstructure, mechanical properties and fracture behavior," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 769, p. 138490, 2020/01/02/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138490>.
- Manufacturing Processes*, vol. 58, pp. 1052-1063, 2020/10/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.068>.
- [15] W. S. AbuShanab, M. Abd Elaziz, E. I. Ghandourah, E. B. Moustafa, and A. H. Elsheikh, "A new fine-tuned random vector functional link model using Hunger games search optimizer for modeling friction stir welding process of polymeric materials," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 14, pp. 1482-1493, 2021/09/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.031>.
- [16] P. Song, A. Trivedi, N. Hawkins, A. Graham, D. Chapman, and C. R. Siviour, "Thermomechanical characterisation of polyamide 6 over a wide range of rates and temperatures," *Polymer*, vol. 300, p. 126907, 2024/04/25/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.126907>.
- [17] M. Sajed, "Parametric study of two-stage refilled friction stir spot welding," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 24, pp. 307-317, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.09.011>.
- [18] A. Alhourani, J. Sheikh-Ahmad, F. Almaskari, K. Khan, S. Deveci, and I. Barsoum, "Thermal modeling of friction stir welding of thick high-density polyethylene plates," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 28, pp. 4186-4198, 2024/01/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.044>.
- [19] H. Aghajani Derazkola, E. Garcia, and M. Elyasi, "Underwater friction stir welding of PC: Experimental study and thermo-mechanical modelling," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 65, pp. 161-173, 2021/05/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.034>.