



The Effect of Tool Geometry on the Tensile Strength of Polypropylene Components Welded by Friction Stir Welding Method

Behrooz Asadi Borojeni ^{1*}, Lotfali Mozafari Vanani²

^{1,2}Lecturer, Mechanical Engineering, Faculty of Boroujen, Chaharmahal and Bakhtiari Branch, Technical and Vocational University (TVU), Chaharmahal and Bakhtiari, Iran

ARTICLE INFO

Received: 02.01.2020

Revised: 06.11.2020

Accepted: 06.11.2020

Keyword:

Friction stir welding

Polypropylene

Tool sholder

Cylinder Angle

***Corresponding Author:**

Behrooz Asadi Borojeni

Email: B_asadi92@yahoo.com

ABSTRACT

The Friction stir welding is one of the new methods of solid state welding. This welding method has many advantages over traditional methods of fusion welding due to low input temperature and non-melting and freezing of materials. In this study, the tensile strength variations of the welded specimens were investigated based on two parameters of the geometry of the tool and the angle of the device for the welding of polypropylene sheets. In order to obtain the optimal value of these parameters, other variables such as rotational speed and linear velocity of tools are assumed constant. After welding the samples, a standard tensile test was performed on the samples. The results show that the tool geometry has a great influence on the tensile strength and the appearance of the weld and the pieces welded by the tools with a welder's helmet have a higher strength. Also under the same conditions, the highest tensile strength is when the angle of the machine is 2.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

تأثیر هندسه ابزار بر استحکام کششی قطعات جوشکاری شده پلی پروپیلن به روش اصطکاکی اغتشاشی

بهروز اسدی بروجنی^{۱*}، لطفعلی مظفری وانانی^۲

۱-۲- مری، دپارتمان مهندسی مکانیک، آموزشکده فنی و حرفه‌ای پسران بروجن، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، چهارمحال و بختیاری، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از روش‌های نوین جوشکاری حالت جامد است که نسبت به روش‌های مرسوم جوشکاری ذوبی، به دلیل دمای ورودی کم و نداشتن حالت ذوب و انجماد مجدد مواد، از مزایای زیادی برخوردار است. در این تحقیق، تغییرات استحکام کششی جوش براساس دو پارامتر هندسه شولدر ابزار و تنظیمات زاویه کلگی دستگاه برای جوشکاری ورق‌های پلی پروپیلن بررسی شده است. برای به دست آوردن مقدار بهینه این پارامترها، مقادیر دیگر متغیرها مانند سرعت دورانی و سرعت خطی ابزار ثابت فرض شده‌اند. پس از انجام جوشکاری نمونه‌ها، آزمون کشش طبق استانداردهای مرجع روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که هندسه ابزار تأثیر زیادی بر استحکام کششی و شکل ظاهری جوش ایجاد شده دارد و قطعاتی که توسط ابزار با شولدر مارپیچی جوشکاری شده بودند، استحکام بالاتری داشتند. همچنین در شرایط یکسان، بالاترین استحکام کششی مربوط به زمانی است که زاویه کلگی دستگاه دو درجه انتخاب شود.

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۲۲

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۲۲

کلید واژگان:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
پلی پروپیلن
شولدر ابزار
زاویه کلگی

*نویسنده مسئول: بهروز اسدی بروجنی

پست الکترونیکی:

B_asadi92@yahoo.com



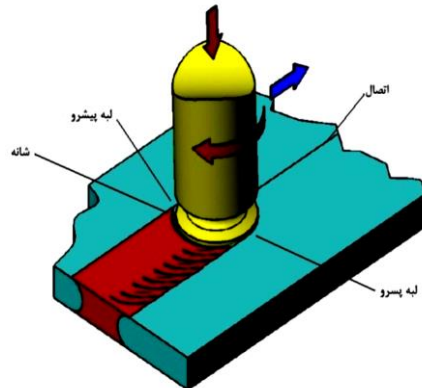
مقدمه

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نخستین بار در سال ۱۹۹۱ ابداع شد [۱]. این روش در سال‌های اخیر پیشرفت فراوانی در زمینه اتصالات فلزی داشته است. به این روش جوشکاری فناوری سبز نیز گفته می‌شود، زیرا حداکثر بازده انرژی را داشته و هیچ‌گونه مواد آلاینده یا اثر سوئی بر محیط زیست نمی‌گذارد. همچنین قابلیت عملکرد بالایی داشته و انرژی اندکی مصرف می‌کند و در آن از هیچ نوع پوشش گازی یا جریان گداخته استفاده نشده و در اتصالات آن نیز هیچ پُرکننده‌ای به کار نمی‌رود [۲]؛ بنابراین هر نوع آلیاژ آلومینیوم یا کامپوزیت را می‌توان با این روش اتصال داد. در این نوع جوشکاری از ابزار استوانه‌ای با پروفیل میله‌ای شکل استفاده می‌شود که ضمن چرخش، به آرامی وارد خط اتصال بین دو قطعه‌ای می‌شود که کنار هم قرار گرفته‌اند. قطعات باید روی یک زیرکاری بسته شوند تا از جداشدن صفحات مجاور جلوگیری شود. حرارت اصطکاکی در اثر تماس بین قطعه‌کارها و ابزار جوشکاری مقاوم به سایش، ایجاد می‌شود. این حرارت به نرم‌شدن ماده بدون رسیدن به نقطه ذوب و ادامه عبور ابزار در طول خط اتصال می‌انجامد. ماده تغییر شکل یافته نیز از لبه جلویی به سمت لبه انتهایی ابزار رفته و در اثر تماس بین پین و شولدر محکم شده و موجب تشکیل پیوندی قوی بین دو قطعه می‌شود. این روش را می‌توان جوشکاری سوراخ کلیدی در حالت جامد نیز نامید؛ به طوری که در شروع کار یک سوراخ ایجاد شده و در ادامه پر می‌شود و در انتها اثر آن باقی می‌ماند. این جوشکاری نسبت به روش‌های مرسوم جوشکاری ذوبی به دلیل دمای ورودی کم و نداشتن حالت ذوب و انجماد مجدد مواد، مزیت‌های بسیاری دارد [۳]. در برخی تحقیقات، کاربرد جوشکاری اصطکاکی در فلزات و غیرفلزات مورد بررسی قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۵، لوئیس تریبا و همکارانش اثر ویژگی‌های شانه ابزار بر عیوب و خواص کششی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ 6061-T6 را مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که سطح شانه ابزار تأثیر چشمگیری بر کیفیت سطح اتصال دارد [۴]. در سال ۲۰۱۵ داوود و همکارانش اثر پروفیل پین ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را بر ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ 6061-T6 مورد بررسی قرار دادند [۵]. در سال ۲۰۱۶، غروی و همکارانش به ارزیابی خوردگی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب‌به‌لب آلیاژ 6061-T6 پرداختند [۶]. در زمینه جوشکاری غیر فلزات، باقری و همکاران [۷] با استفاده از ابزار با شانه ثابت به جوشکاری ورق‌های پلیمری ABS^۱ پرداختند. در تحقیق ایشان، متغیر پاسخ، استحکام کششی جوش و متغیر ورودی، سرعت چرخش و پیش‌روی ابزار بوده است.

در تحقیقات دیگری، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روی چهار نوع ماده ترموپلاستیک مختلف شامل استال، نایلون PMMA66 و PVC مورد بررسی قرار گرفتند [۸]. براساس نتایج این تحقیقات، مشخص شد سرعت دورانی محور ماشین پارامتر بسیار مهمی در بالابردن استحکام کششی جوش اصطکاکی اغتشاشی در این نوع ترموپلاستیک‌هاست. در تحقیق دیگری، ناطقی و حسین‌زاده [۹] به کمک طراحی آزمایش تاگوچی تأثیر گاز خنک‌کننده CO₂ را بر استحکام جوش و تنش پسماند بررسی کردند. نمونه‌های آن‌ها از جنس پلی‌اتیلن چگالی بالا بود که به کمک جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اتصال یافته بودند. نتایج نشان می‌داد استفاده از گاز خنک‌کننده منجر به بهبود استحکام قطعات جوش داده شده خواهد شد. امینی و امیری [۱۰] به بررسی استحکام کششی، توزیع حرارت و نیروهای ماشین‌کاری در جوشکاری اصطکاکی نمونه‌های آلومینیومی پرداختند. آن‌ها نشان دادند اعمال ارتعاش موجب افزایش استحکام کششی جوش خواهد شد. نمای کلی روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در شکل شماره ۱ نشان داده شده است.

با توجه به تحقیقات پیشین، پژوهشی که به بررسی پارامترهای مؤثر بر استحکام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مواد پلی‌پروپیلن پرداخته باشد، مشاهده نشد؛ بنابراین در این تحقیق سعی بر بررسی و بهبود استحکام کششی قطعات پلی‌پروپیلن شده است. در این پژوهش، سرعت دورانی و سرعت خطی ابزار، ثابت در نظر گرفته شدند و تأثیر پارامترهایی همچون هندسه شولدر ابزار و تنظیمات زاویه کلگی دستگاه برای جوشکاری ورق‌های پلی‌پروپیلن بررسی شدند.

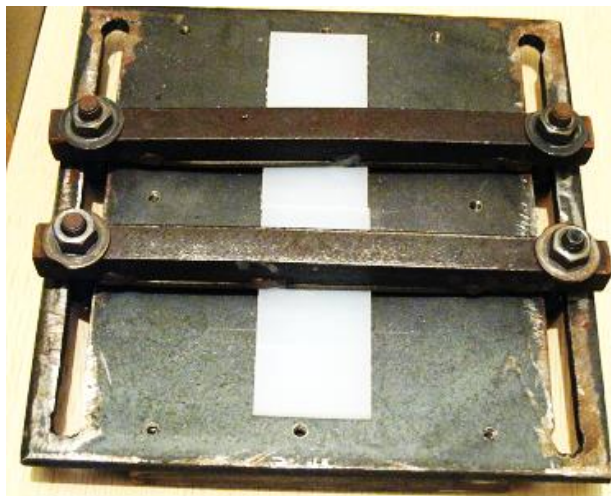
¹ Acrylonitrile Butadiene Styrene



شکل ۱. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

مواد، مصالح و آزمون‌ها

فرایند جوشکاری توسط دستگاه فرز انجام می‌گیرد. به دلیل نیروی زیادی که در حین جوشکاری به ورق‌ها وارد می‌شود، ضروری است ورق‌ها کاملاً ثابت شده و در حین عملیات تغییر موقعیت ندهند. بدین منظور فیکسچر طراحی شد تا هم از جابجایی ورق‌ها حین جوشکاری جلوگیری کند و هم مانع بازوبسته کردن مکرر روبنده‌ها در هر مرحله شود. فیکسچر طراحی شده قابلیت بستن ورق‌هایی در ابعاد مختلف را داشته و قابل تنظیم است (شکل شماره ۲). به دلیل صیقلی بودن سطح ورق‌ها، امکان لغزش آن‌ها از زیر فیکسچر نگهدارنده زیاد است. در این صورت سبب ایجاد فاصله در خط جوش و در نتیجه تضعیف اتصال خواهد شد. برای جلوگیری از این امر، روی روبنده‌های فیکسچر که هرکدام توسط دو عدد پیچ بسته می‌شوند، دو عدد سوهان متصل شده است تا در اثر اصطکاک‌شان با قطعات از جابه‌جایی آن‌ها در حین کار جلوگیری شود.

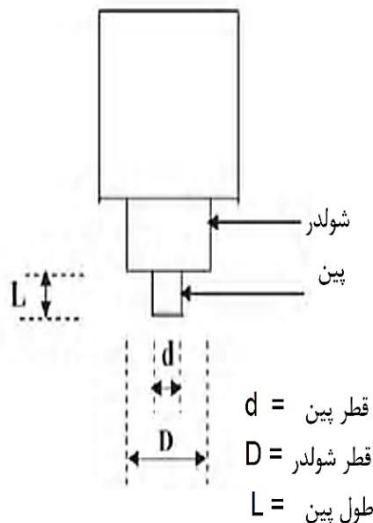


شکل ۲. فیکسچر نگهدارنده قطعات



شکل ۳. مجموعه فیکسچر، ابزار و ورق

برای انجام فرایند جوشکاری، ابتدا دو ورق پلی‌پروپیلن با ابعاد $۱۰۰ \times ۵۰ \times ۵$ میلی‌متر آماده شدند و توسط یک فیکسچر و به صورت لب‌به‌لب در کنار یکدیگر قرار گرفتند. سپس توسط ابزار طراحی شده مورد جوشکاری قرار گرفتند (شکل شماره ۳). در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، جنس ابزار دارای اهمیت بسزایی است، زیرا ابزار با قطعه کار ارتباط مستقیم داشته و در معرض سایش است. جنس ابزار باید از ماده‌ای باشد که در اثر تماس ساییده نشود و قابلیت سخت‌کاری با عملیات حرارتی را داشته باشد. بدین‌منظور، فولاد Spk به دلیل قابلیت عملیات حرارتی و سختی سطحی بالا پس از عملیات حرارتی، انتخاب شد.



شکل ۴. نام‌گذاری اجزای مختلف ابزار FSW

ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پارامتری کلیدی در این روش جوشکاری است. در طراحی ابزار باید نکات مهم زیر در نظر گرفته شوند:

قطر پین ابزار برابر است با ضخامت ورق‌های مورد جوشکاری [۱۱]

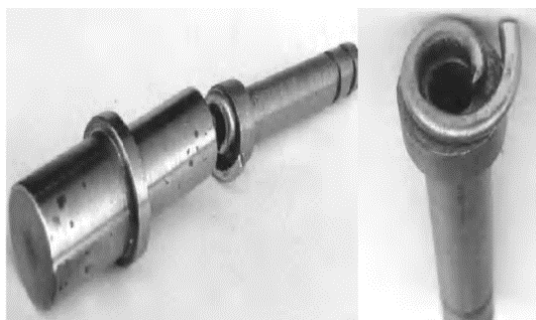
$$d=t \quad (۱)$$

ارتفاع پین از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$L=t-0/3 \text{ or } L=t-0.2 \quad (۲)$$

قطر شولدر ابزار با سه برابر قطر پین برابر است یعنی:

$$D=3 \times d \quad (۳)$$



شکل ۵. الکتروود اسپارک و شیوه قرارگیری آن

ویژگی‌هایی که از آن صحبت شد، در نکات بالا در شکل شماره ۴ مشاهده می‌شوند [۱۱]. به دلیل اینکه در پژوهش‌های پیشین برای جوش این ترموپلاستیک خاص (پلی‌پروپیلن) بهترین شکل ابزار مورد بررسی قرار نگرفته بود، از تحقیقاتی که روی هندسه ابزار در جوشکاری قطعات آلومینیومی، کامپوزیت‌ها و ترموپلاستیک‌ها کار شده بود، کمک گرفته شد [۱۱؛ ۱۲]. سپس به صورت آزمون و خطا انواع ابزارها با شکل و هندسه‌های مختلف، ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. ابتدا جوشکاری توسط ابزار با هندسه استوانه‌ای ساده انجام شد که جوش حاصل کیفیت ظاهری مناسبی نداشت. حتی در مواردی اصلاً اتصال انجام نشد و مواد به صورت له‌شده در درز جوش قرار می‌گرفتند. سپس ابزارهای با پین مخروطی مورد آزمایش قرار گرفت.

براساس تحقیقات پیشین استنباط شد پین‌های مخروطی‌شکلی که سطح پین آن‌ها رزوه‌دار است، استحکام کششی پایین‌تری نسبت به پین‌های شیاردار برای قسمت جوش‌داده‌شده، ایجاد می‌کنند که دلیل آن قرارگرفتن ماده خمیری روی گام پیچ و حرکت ماده خمیری به سمت بالاست. با توجه به بررسی‌های پیشین، پین ابزار به صورت شیاردار انتخاب شد. همچنین دو عدد ابزار ساخته شد که یکی از آن‌ها با سطح شولدر صاف و دیگری با سطح شولدر مارپیچی بود. پین

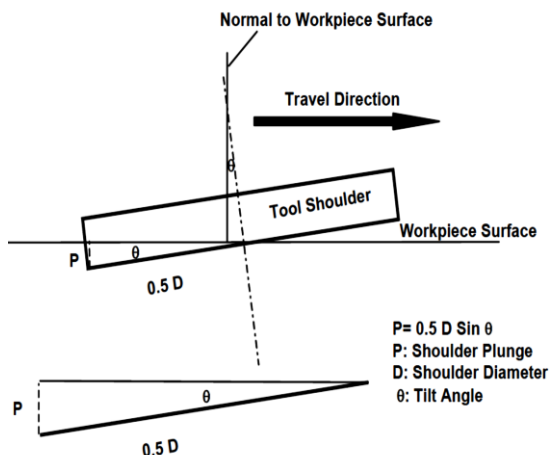
ابزار دارای قطر ۵ و ارتفاع ۴/۸ میلی‌متر است که به صورت مخروطی است. شولدر این ابزار نیز قطر ۱۵ میلیمتری دارد. ایجاد این شیار روی شولدر، با دستگاه‌های تراش و فرز به دلیل کوچک‌بودن قطعه کار امکان‌پذیر نبود. با توجه به امکانات موجود، از دستگاه اسپارک [۱۳] برای ایجاد شیار استفاده شد. به منظور ایجاد این فرم خاص توسط دستگاه اسپارک، باید ابتدا الکتروود آن ساخته می‌شد. برای این کار، از یک سیم مسی به قطر ۲/۵ میلیمتر استفاده شد. مقدار نفوذ الکتروود در عملیات اسپارک یک میلی‌متر تنظیم شد. پس از ساخت ابزار با شیار ماریچی، فرایند عملیات حرارتی ابزار صورت گرفت. در حالت ایدئال، جنس ابزار باید از ماده‌ای با سختی، سفتی و مقاومت به سایش بالا در دمای بالای جوشکاری و دارای مقاومت به اکسیداسیون باشد. همچنین ضریب هدایت حرارتی آن نیز باید پایین باشد. بدین‌منظور دمای کوره روی ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. پس از رسیدن دمای کوره به حرارت تنظیم‌شده، ابزار به مدت بیست دقیقه داخل کوره قرار داده شد و سپس به سرعت داخل آب کوئینچ شد. در حین قراردادن ابزار گداخته در داخل آب باید آن را در آب حرکت دهیم تا سرد شدن سریع‌تر انجام گیرد.



شکل ۶. ب) شولدر ماریچ



شکل ۶. الف) شولدر ساده



شکل ۷. شماتیک انحراف ابزار نسبت به قطعه کار

پس از اتمام عملیات حرارتی ابزار، به منظور تمیزکاری سطح قطعه از لایه اکسیدشده سیاه‌رنگ، قطعه با سمباده نرم صیقل داده شد. ابزار ساخته شده آماده جوشکاری است و طبق انتظار، شولدر دارای سطح ماریپیچ سطحی یکنواخت‌تری از شولدر صاف به وجود آورد (شکل شماره ۶). پس از انتخاب ابزار لازم برای جوشکاری قطعات، پارامتر دیگری با عنوان زاویه کلگی دستگاه مورد بررسی قرار گرفت. ابزار و قطعه کار باید دارای زاویه انحراف θ نسبت به هم باشند و این انحراف در خلاف جهت پیشروی خواهد بود که در شکل شماره ۷ نشان داده شده است. این نوع انحراف ابزار سبب افزایش نفوذ شولدر (P) می‌شود [۱۳].

$$\theta P = 0.5 \times D \sin \quad (۴)$$

در رابطه بالا D قطر شولدر است. گفتنی است پارامتر P (نفوذ شولدر) که در بالا تعریف شد، برای حالتی است که وسط ابزار در تماس با قطعه باشد و البته خود از پارامترهای مهم جوشکاری است. برای ایجاد جوشی با کیفیت خوب، همواره باید ابزار به درون قطعه نفوذ کند تا این نفوذ موجب افزایش فشار وارده به زیرابزار و در نهایت فشردن ماده مورد نظر در عقب ابزار شود. پس از جوشکاری، قطعات براساس استاندارد (ASTM-D638-02a) [۱۴] با ابعاد مورد نظر به صورت دمبلی شکل بریده شده و سپس مورد آزمایش کشش قرار گرفتند.

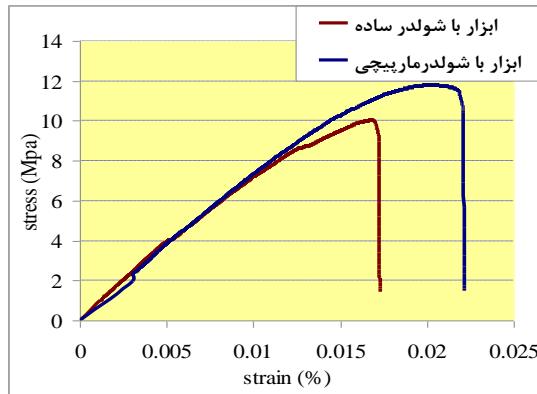


شکل ۸. نمونه جوشکاری شده پیش از آزمون کشش

پس از انجام آزمون‌های کشش، نمودارهای تنش- کرنش نمونه‌ها، توسط دستگاه GOTECH-AL-7000LA10 استخراج شدند. سپس برای استفاده کردن در این مقاله، مقادیر به نرم‌افزار اکسل انتقال یافت و جداول برای مقایسه و ترسیم آماده شد.

نتایج و بحث

برای آزمون تأثیر هندسه شولدر ابزار بر استحکام کششی جوش، دو عدد ابزار مخروطی شیاردار طبق مشخصات گفته شده ساخته شد. شولدر یکی از این ابزارها صاف و روی شولدر ابزار دوم یک عدد شیار ماریپیچ توسط دستگاه اسپارک ایجاد شد. تمامی شرایط جوشکاری برای این دو ابزار در زمان تست، کاملاً یکسان بود (سرعت دورانی ۴۰۰Rpm، سرعت خطی ۲۰mm/min و زاویه کلگی دستگاه ۳°). پس از جوشکاری، نمونه‌ها مورد آزمایش کشش قرار گرفتند. نمودار تنش - کرنش تلفیقی مربوط به قطعات جوشکاری شده با این دو ابزار، در شکل شماره ۹ ارائه شده است.



شکل ۹. نمودار تنش - کرنش مربوط به قطعات جوشکاری شده با دو ابزار مختلف

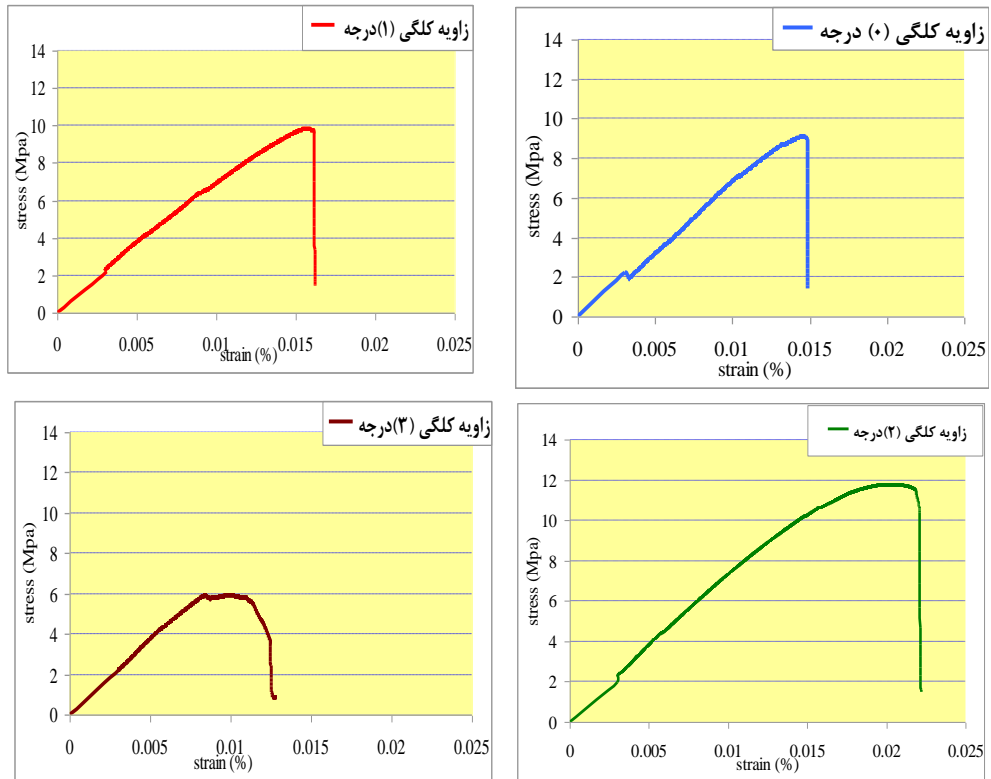
با توجه به شکل شماره ۹ مشخص است که وجود شولدر ماریپیچی در ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، موجب افزایش استحکام کششی قطعات جوشکاری شده خواهد شد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که ابزار بدون شولدر، با وارد شدن به درز جوش و دوران در این منطقه، نمی‌تواند مذاب خارج شده از حوضچه را در محل حوضچه نگهداری کند و این مذاب از اطراف شولدر خارج شده و تا انتهای جوش کمبود ماده در خط جوش مشاهده می‌شود که سبب کم شدن استحکام کششی می‌شود (شکل شماره ۱۰).



شکل ۱۰. جوش ایجاد شده توسط ابزار مخروطی با شولدر صاف

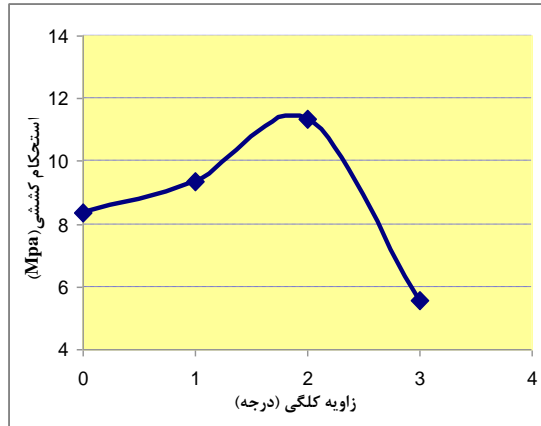
با اضافه کردن شیار ماریپیچ به شولدر، مذاب در محل جوش نگهداری می‌شود و با حرکت ماریپیچ موجود روی شولدر در حال دوران، مذاب در محدوده شولدر نگهداری شده و روی حوضچه حرکت می‌کند تا در محلی که نیاز است، قرار گیرد. برای اینکه بهترین زاویه کنگی دستگاه برای جوشکاری این جنس خاص (پلی پروپیلن) انتخاب شود، در شرایط کاملاً یکسان (سرعت دورانی ۴۰۰ Rpm، سرعت خطی ۲۰ mm/min)، نمونه‌هایی با زوایای ۰، ۱، ۲ و ۳ درجه مورد

جوشکاری قرار گرفتند. پس از انجام آزمون‌های کشش روی نمونه‌های دارای زاویه کلگی متفاوت، نمودارهای تنش - کرنش شکل شماره ۱۱ به دست آمدند.



شکل ۱۱. نمودار تنش - کرنش مربوط به چهار زاویه مختلف کلگی

با مقایسه نمودارهای شکل شماره ۱۱ می‌بینیم که زاویه کلگی در حالت ۲ درجه موجب استحکام بیشتری در ناحیه جوشکاری می‌شود. همچنین برای پردازش بهتر اطلاعات به دست آمده، در شکل شماره ۱۲ نموداری تلفیقی از چهار حالت آزمایش شده نشان داده شده است. با توجه به شکل شماره ۱۲، مشاهده می‌شود زاویه کلگی دارای مقدار بهینه‌ای بوده و بالاترین استحکام کششی ایجاد شده مربوط به حالتی است که زاویه کلگی دستگاه ۲ درجه است، زیرا در زاویه صفر درجه در سطح مقطع جوش و در قسمت عقب‌نشینی به دلیل ناکافی بودن مواد در جهت عمودی، عیب تونلی و در بعضی مواقع ترک ایجاد می‌شود (شکل شماره ۱۳).



شکل ۱۲. نمودار مقایسه استحکام کششی چهار زاویه مختلف

هرچه زاویه کَلگی افزایش می‌یابد به علت فشار عقب شولدر به مواد و فورج کردن آن‌ها به سمت پایین، مواد به هم فشرده شده و بهتر به هم می‌چسبند؛ در نتیجه استحکام جوش بالاتر می‌رود، ولی با رسیدن این زاویه به ۳ درجه، چون میزان نفوذ شولدر در قطعه به حدود ۰/۴۵ میلی‌متر می‌رسد، میزان خروج مذاب از اطراف شولدر زیاد شده و در اطراف خط جوش ایجاد پلیسه افزایش می‌یابد و جوش لاغر می‌شود؛ به همین دلیل است که استحکام جوش به طرز معناداری کاهش می‌یابد (شکل شماره ۱۴).



شکل ۱۴. پلیسه‌های ایجاد شده در اثر زاویه کَلگی ۳ درجه



شکل ۱۳. عیب تونلی در سطح مقطع جوش

نتیجه‌گیری

در این تحقیق دو ورق پلی‌پروپیلن با ابعاد $۱۰۰ \times ۵۰ \times ۵$ میلی‌متر، به صورت لب‌به‌لب به روش اصطکاکی اغتشاشی جوشکاری شد و تأثیر هندسه شولدر ابزار و زاویه کَلگی دستگاه بر استحکام کششی جوش‌های حاصل درحالی‌که سایر پارامترها ثابت بودند، مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

۱- هندسه ابزار تأثیر زیادی بر استحکام کششی و شکل ظاهری جوش ایجاد شده دارد؛

- ۲- با به کار بردن شولدر ماریپیچ به جای شولدر ساده می‌توان استحکام جوش را تا ۲۰ درصد بهبود بخشید و بنابراین طراحی شولدر ابزار بر استحکام کششی جوش تأثیر زیادی دارد؛
- ۳- در بین ابزارهای تست شده، ابزار دارای پین مخروطی شیاردار و شولدر ماریپیچی، بهترین شکل ظاهری و استحکام کششی را نشان دادند؛
- ۴- با تغییر زاویه کلگی از صفر تا ۲ درجه، استحکام کششی جوش افزایش می‌یابد ولی در زاویه کلگی ۳ درجه استحکام به مقدار قابل توجهی کاهش نشان می‌دهد؛ بنابراین در این تحقیق بهترین زاویه کلگی برابر ۲ درجه بوده است.

References

- [1] Sadeghian, B., Atapour, M., & Taherizadeh, A. (2016). Simulation of Material Plastic Flow and Morphology During Friction Stir Welding of Stainless Steel to Aluminum Alloy Dissimilar Joint [Research]. *Journal of Welding Science and Technology of Iran (JWSTI)*, 1(1), 24-37. <http://jwsti.iut.ac.ir/article-1-24-en.html>
- [2] Belbasi, M., & Rezaei, M. (2020). The Effect of pin geometry on the mechanical property of Aluminium 6061-alumina composite made by friction stir welding. *Journal of Welding Science and Technology of Iran (JWSTI)*, 5(2), 77-88. <http://jwsti.iut.ac.ir/article-1-285-en.html>
- [3] Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50(1), 1-78. <https://doi.org/10.1016/j.msere.2005.07.001>
- [4] Trueba, L., Heredia, G., Rybicki, D., & Johannes, L. B. (2015). Effect of tool shoulder features on defects and tensile properties of friction stir welded aluminum 6061-T6. *Journal of Materials Processing Technology*, 219, 271-277. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.12.027>
- [5] Dawood, H. I., Mohammed, K. S., Rahmat, A., & Uday, M. B. (2015). Effect of small tool pin profiles on microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy by friction stir welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(9), 2856-2865. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63911-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63911-5)
- [6] Gharavi, F., Matori, K. A., Yunus, R., Othman, N. K., & Fadaeifard, F. (2016). Corrosion evaluation of friction stir welded lap joints of AA6061-T6 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(3), 684-696. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64159-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64159-6)
- [7] Bagheri, A., Azdast, T., & Doniavi, A. (2013). An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets. *Materials & Design*, 43, 402-409. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.059>
- [8] Ageorges, C., Ye, L., & Hou, M. (2001). Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(6), 839-857. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00166-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00166-4)
- [9] Nateghi, E., & Hosseinzadeh, M. (2015). Experimental investigation into effect of cooling of traversed weld nugget on quality of high-density polyethylene joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(1-4), 581-594. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7663-4>

- [10] Amini, S., & Amiri, M. (2014). Study of ultrasonic vibrations' effect on friction stir welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(1-4), 127-135. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5806-7>
- [11] Elangovan, K., & Balasubramanian, V. (2008). Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. *Materials & Design*, 29(2), 362-373. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.030>
- [12] Fuller, C. B., Mahoney, M. W., & Bingel, W. H. (2003). *Friction stir weld tool and method* US6994242B2). <https://patents.google.com/patent/US6994242/en>
- [13] Saeidi Boroujeni, M., Mostafa Arab, N. B., Ghasemi, F. A., & Payeganeh, G. (2009, November 30-December 3). *The effect of pin geometry on mechanical properties of PP composite friction stir welds* International Congress of Welding and Joining Methods, Welding Research and Engineering Center, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/163989>
- [14] ASTM International. (2022). *ASTM D638-02a - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. Webstore. <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmd63802a>