E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 10, Number 2, 2025

Effect of friction stir welding process parameters on microstructure and mechanical properties of aluminum/polypropylene joint

M. Movahedi*, H. Shirovi Khoozani, A. Ozlati
Materials Science and Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

Received 30 May 2024 ; Accepted 7 August 2024

Abstract
In this research, the influence of friction stir welding parameters (tool traverse speed ranging from 50 to 150 mm/min, and tool rotational speed ranging from 300 to 1100 rpm) was investigated on the microstructure and mechanical properties of AA5052 aluminum/PP-Z30S polypropylene joint. Results showed that joint formation was accompanied by the formation of mechanical locks in the shape of anchor-like aluminum pieces. Decreasing the heat input (either by increasing the tool traverse speed or decreasing the tool rotational speed) resulted in the formation of larger anchors. The results of tensile-shear test showed that increasing the tool traverse speed from 50 to 100 mm/min led to an enhancement in the fracture load (by ~10%), while at higher traverse speeds, the fracture load decreased (from 235 to 181 N) due to the formation of defects and voids at the joint interface. An increase in the tool rotational speed from 300 to 900 rpm resulted in a superior fracture load (by 70%) due to the formation of anchors perpendicular to the polymer surface with greater penetration depth.

Keywords: Friction Stir Welding, AA5052 Aluminum, PP-Z30S Polypropylene, Mechanical locks, Microstructure, Mechanical properties.

*Corresponding Author Mojtaba Movahedi, m_movahedi@sharif.edu

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.08]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دهم، شماره2، پاییز و زمستان 1403

اثر متغیرهای فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلومینیوم/پلی‌پروپیلن

مجتبی موحدی*، حسینعلی شیروی خوزانی، اشکان عزلتی

دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

دریافت مقاله: 1403/03/10 ؛ پذیرش مقاله: 1403/05/17

چکیده

در این پژوهش، اثر متغیرهای فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی (سرعت انتقالی ابزار در بازه 50 تا 150 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخشی ابزار در بازه 300 تا 1100 دور بر دقیقه) بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلومینیوم AA5052 به پلی‌پروپیلن PP-Z30S مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی‌های ریزساختاری با میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی نشان داد ایجاد اتصال با تشکیل قفل‌های مکانیکی به شکل قطعات لنگر مانندی از جنس آلومینیوم همراه است. به‌علاوه مشاهده شد که کاهش حرارت ورودی (با افزایش سرعت خطی و یا کاهش سرعت چرخشی ابزار) موجب افزایش اندازه این لنگرها می‌شود. نتایج آزمون کشش-برش نشان داد که افزایش سرعت انتقالی ابزار از 50 به 100 میلی‌متر بر دقیقه با افزایش اندازه لنگرها موجب افزایش نیروی شکست (حدود 10%) می‌شود. اگرچه، افزایش بیشتر سرعت چرخشی، بدلیل ایجاد عیوب و حفرات در فصل مشترک اتصال، نیروی شکست را کاهش داد (از 235 به 181 نیوتن). افزایش سرعت چرخشی از 300 تا 900 دور بر دقیقه نیز با ایجاد لنگرهای عمود بر سطح پلیمر و با عمق نفوذ بیشتر، موجب افزایش استحکام اتصال (تا حدود 70%) شد.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی تلاطمی، آلومینیوم AA5052، پلی‌پروپیلن PP-Z30S، قفل مکانیکی، ریزساختار، خواص مکانیکی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: مجتبی موحدی، m_movahedi@sharif.edu

1- مقدمه

استفاده از وسایل حمل و نقل مانند اتومبیل و هواپیما، به دلیل مصرف سوخت، باعث افزایش آلاینده‌هایی مثل گاز دی اکسید کربن در محیط می‌شود. افزایش میزان گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر و گرم شدن زمین در اثر آن، یک معضل جهانی است. یکی از راهکارها برای برطرف کردن این مشکل، کاهش مصرف سوخت از طریق کاهش وزن سازه می‌باشد. اتصالات غیرهم‌جنس فلز-پلیمر می‌توانند برای کاهش وزن سازه‌ها به‌کار روند. در واقع افزایش نسبت استحکام به وزن در وسایل حمل و نقل، یکی از مزایای اصلی اتصالات فلز- پلیمر است [5-1]. امروزه در طراحی سپرهای عقب و جلو و همچنین داشبرد خودروها از پلیمرهای ترموپلاستیک مختلفی از جمله پلی‌پروپیلن، پلی‌کربنات و آکریلونیتریل بوتادین استایرن استفاده می‌شود. سپر و داشبورد خودرو سهم قابل‌توجهی از این مواد را در ساختار خود دارند و اتصال این مواد به بدنه خودرو، یکی از کاربردهای مهم اتصال فلز-پلیمر در صنایع خودروسازی

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.08]

می‌باشد. به‌علاوه تلاش‌هایی برای توسعه و استفاده از ساختارهای هیبریدی سبک وزن در صنایع هوافضا نیز اتفاق افتاده‌است. به عنوان مثال در صنایع هواپیماسازی، بوئینگ 787 شامل 50% از کامپوزیت‌های پلیمری می‌باشد که 20% از وزن کل هواپیما نسبت هواپیماهایی که از آلومینیوم ساخته شدند را کاهش داده است [6-10].

با وجود مزایا و کاربردهای وسیع اتصالات فلز-پلیمر، روش‌های محدودی جهت اتصال غیرهمجنس این مواد وجود دارد. در واقع به دلیل تفاوت قابل توجه خواص فیزیکی از جمله دمای ذوب، ضریب انبساط حرارتی و هدایت حرارتی، روش‌های معمول ایجاد اتصال متالورژیکی از جمله اکثر فرایندهای جوشکاری ذوبی، کاربردی در اتصال فلز-پلیمر ندارند. در مورد اتصال آلومینیوم به پلی‌پروپیلن، دمای ذوب آلومینیوم (حدود 660 درجه سانتی‌گراد) از دمای تخریب پلی‌پروپیلن (در محدوده 350-400 درجه سانتی‌گراد) نیز بالاتر بوده و ذوب کردن همزمان دو ماده و اختلاط آن‌ها در عمل امکان‌پذیر نیست [12و11]. به همین دلیل روش‌های متداول صنعتی برای ایجاد اتصالات غیرهم‌جنس فلز-پلیمر، اتصال مکانیکی و اتصال چسب می‌باشند. در اتصال مکانیکی، وجود مراکز تمرکز تنش نزدیک سوراخ‌های اتصال می‌تواند جوانه‌زنی و رشد ترک را در ماده تشویق کند. علاوه بر این، وزن قطعات مورد استفاده برای ایجاد اتصالات مکانیکی مانند پیچ و مهره، وزن کلی سازه را افزایش خواهد داد. در اتصال با چسب نیز، وابستگی زیاد استحکام اتصال به انرژی سطحی مواد، زمان‌بر بودن فرایند اتصال‌دهی و دشوار بودن بازرسی اتصال چسبی، چالش‌های فرایند اتصال هستند. این چالش‌ها باعث شده‌است که در سال‌های اخیر تلاش‌هایی برای اتصال فلز-پلیمر به روش جوشکاری اصطکاکی تلاطمی انجام شود. فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی فلز-پلیمر، مشکلات هر دو روش اتصالات مکانیکی و شیمیایی تا حد زیادی بر طرف می‌کند. همچنین، این روش در مقایسه با دیگر روش‌ها، آماده‌سازی سطحی کمتری نیاز داشته و زمان انجام فرایند اتصال در این روش کوتاه است. به علاوه، فرایند وابستگی چندانی به جنس پلیمر مورد استفاده نداشته و برای انواع ترموپلاستیک‌های عمومی و مهندسی (از جمله پلی‌پروپیلن، پلی‌آمید، پلی‌کربنات و پلی‌اتر اترکتون) قابل استفاده است [13،14].

خدابخشی و همکارانش [15]، با استفاده از فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی، ورق آلومینیوم AA5059 را به ورق پلیمری پلی‌اتیلن سنگین با طرح اتصال سربه‌سر متصل نموده و مشاهده کرده‌اند که لایه نازکی از جنس اکسید آلومینیوم در فصل مشترک فلز-پلیمر تشکیل می‌شود. تشکیل این لایه که به دلیل حضور عناصر Al، Mg، C و O در ناحیه اختلاط است، منجر به ایجاد جاذبه واندروالسی بین پلیمر و آلومینیوم می‌شود و علاوه بر اتصال مکانیکی بین فلز و پلیمر، جاذبه شیمیایی نیز در فصل مشترک به‌وجود می‌آورد. شهمیری و همکاران [16]، امکان اتصال لبه‌روی‌هم ورق‌های آلیاژ آلومینیوم Al5052 به ورق‌های پلیمری PP-C30s به روش FSW را مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند یک لایه برهم‌کنشی در فصل مشترک فلز و پلیمر تشکیل می‌شود. چسبندگی این لایه برهم‌کنشی با Al5052 و زمینه PP-C30S ضعیف است. در نتیجه با افزایش حرارت ورودی و افزایش ضخامت این لایه، به دلیل ناپیوستگی بین لایه برهم‌کنشی با آلومینیوم و پلی‌پروپیلن استحکام اتصال کاهش می‌یابد. هوانگ و همکارانش [17،18]، در دو پژوهش جداگانه اتصالات لبه‌روی‌هم آلومینیوم Al6061-T6 را به پلی‌اتر اتر کتون و آلیاژ آلومینیوم Al2060-T8 و پلیمر PEEK تقویت‌شده با الیاف کوتاه کربن را توسط فرایند FSW مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که مکانیزم اصلی اتصال بین فلز و پلیمر قفل‌های مکانیکی ماکرو و میکرومتری و مکانیزم فرعی جاذبه‌های شیمیایی می‌باشد. قفل‌های مکانیکی ماکروسکوپی تکه‌های آلومینیومی هستند که به صورت لنگرمانند به درون پلیمری که در ابتدا ذوب و سپس منجمد شده، وارد می‌شوند. درنتیجه هرچه این لنگرهای آلومینیومی بزرگ‌تر بوده و طول بیشتری داشته باشند، قفل مکانیکی تقویت شده و میزان استحکام اتصال افزایش می‌یابد. متغیرهای فرایند FSW مانند سرعت انتقالی و سرعت چرخشی روی اندازه و شکل این لنگرها تاثیر می‌گذارند.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.08]

در این پژوهش، اتصال آلومینیوم Al5052 به پلی‌پروپیلن Z30S خالص با فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی مورد بررسی قرار می‌گیرد و اثر دو متغیر مهم این فرایند یعنی سرعت انتقالی و سرعت چرخشی ابزار بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال مطالعه می‌شود.

اتصال این آلیاژ به پلی‌پروپیلن در ساخت اجزای داخلی سپر و داشبورد خودروهای پیشرفته کاربرد دارد و علاوه بر این، نمونه‌هایی از قطعات دوجنسی آلومینیوم-پلی‌پروپیلن در قطعات داخلی کابین هواپیما وجود دارند که می‌توانند با قطعات متصل شده به روش اصطکاکی تلاطمی جایگزین شوند. نوآوری این پژوهش استفاده از پلیمر Z30S خالص به عنوان ورق پایه، بررسی اثر سرعت چرخشی ابزار و بهینه‌سازی متغیرهای فرایندی با توجه به استفاده از ابزار با پین مثلثی می‌باشد. علاوه بر این، تعبیه یک نگهدارنده متحرک جهت اعمال فشار روی سطح ناحیه اختلاط و جلوگیری از بیرون‌زدگی مذاب پلیمر از دیگر نوآوری‌های این پژوهش است.

2- روش پژوهش

در این پژوهش از ورق‌های آلومینیوم Al5052-H34 با ابعاد 100×70×2 mm (جهت نورد ورق در راستای طول نمونه) و پلیمر PP-Z30S با ابعاد 100×70×2 mm استفاده شد. جهت ساخت ورق پلیمری، گرانول‌های پلی‌پروپیلن با دستگاه ترزیق پلاستیک در بازه دمایی 200-220 درجه سانتی‌گراد درون قالبی به ابعاد اشاره شده تزریق شده و ورق‌های نهایی تولید شدند. در جدول(1) ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلیاژ Al5052 و پلیمر PP-Z30S نشان داده شده‌است.

جنس ابزارهای مورد استفاده در این پژوهش، فولاد H13 با سختی 54 راکول سی (در حالت عملیات حرارتی شده پس از تراشکاری) می‌باشد. به منظور دستیابی به اتصالی با شکل ظاهری و استحکام مناسب، پس از بررسی‌ها و آزمایش‌ها اولیه از ابزاری با قطر شانه 18 میلی‌متر و پین مثلثی به اندازه اضلاع 4/3 میلی‌متر استفاده شد. تصویر و طرح‌واره‌ای از ابزار در شکل(1) ارائه شده است.

جدول 1- ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی ورق‌های پایه مورد استفاده

	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)					خواص مکانیکی		
ماده	*Cu*	*Mg*	*Si*	*Fe*	*Al*	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام کششی (مگاپاسکال)	درصد افزایش طول
Al5052	۰/۰۲۳۲	۲/۰۲	۰/۱۴۶	۰/۳۳۳	پایه	۲۲۹	۲۶۶	۱۵/۴
PP-Z30S	پلی‌پروپیلن خالص گرید *Z30S*					۲۰	۳۰	۲۳/۵

جدول 2- نام‌گذاری و شرایط جوشکاری نمونه‌ها

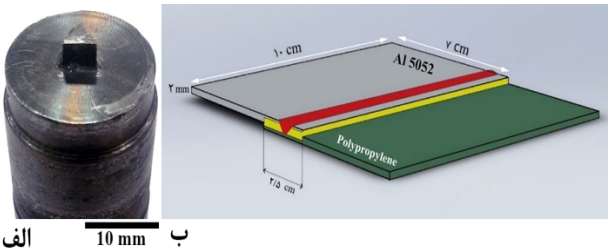
نام نمونه	سرعت انتقالی (میلی‌متر بر دقیقه)	سرعت چرخشی (دور بر دقیقه)
50T	۵۰	۶۰۰
100T	۱۰۰	۶۰۰
150T	۱۵۰	۶۰۰
300R	۱۰۰	۳۰۰
500R	۱۰۰	۵۰۰
700R	۱۰۰	۷۰۰
900R	۱۰۰	۹۰۰
1100R	۱۰۰	۱۱۰۰

ورق‌های آلومینیوم و پلیمر با طرح اتصال لبه‌روی‌هم با میزان هم‌پوشانی 25 میلی‌متر بر روی یکدیگر قرار گرفتند. در این طرح اتصال، ورق آلومینیوم بر روی ورق کامپوزیتی قرار گرفت و شانه ابزار جوشکاری با سطح آلومینیوم در تماس قرار داشت (شکل 1-ب). جوشکاری اصطکاکی تلاطمی با میزان نفوذ ابزار برابر 0/2 میلی‌متر، زاویه ابزار 2 درجه و با جهت چرخش ابزار پادساعت‌گرد انجام شد.

جهت بررسی اثر سرعت انتقالی ابزار، ابتدا یک سرعت چرخشی متوسط (600 دور بر دقیقه) به طور ثابت در نظر گرفته‌شد و در سه سطح مختلف از سرعت‌های انتقالی ابزار (50، 100 و 150 میلی‌متر بر دقیقه) جوشکاری انجام شد. سپس با بررسی نمونه‌ها و دستیابی به سرعت انتقالی بهینه (100 میلی‌متر بر دقیقه)، پنج سطح سرعت چرخشی متفاوت (300، 500، 700، 900 و 1100 دور بر دقیقه) انتخاب شد و اثر این متغیر نیز بر خواص جوش‌های مختلف بررسی شد. در جدول(2) خلاصه‌ای از شرایط کلی و نامگذاری نمونه‌ها ارائه شده‌است.

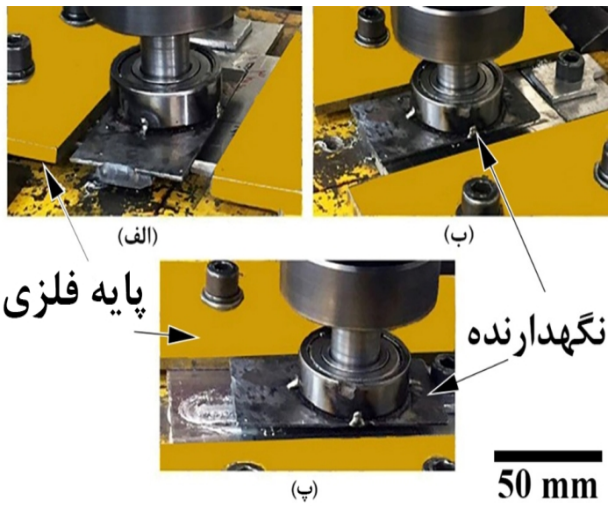
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.08]



شکل1- الف- ابزار جوشکاری و ب- طرح‌واره نحوه قرارگیری نمونه‌ها.

شکل(2) طرح‌واره‌ای از طرح اتصال و روند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی آلومینیوم به پلی‌پروپیلن را نشان می‌دهد. علاوه بر استفاده از یک پایه فلزی جهت ثابت نگه‌داشتن نمونه‌ها حین جوشکاری، به منظور بهبود ظاهر اتصال از یک نگه‌دارنده نیز استفاده شد. ابزار جوشکاری در درون نگه‌دارنده قرارگرفته و با حرکت انتقالی (خطی) ابزار در حین جوشکاری، نگه‌دارنده همزمان با ابزار بر روی سطح نمونه حرکت کرده و مانع از خروج مواد (مذاب پلی‌پروپیلن و ذرات آلومینیوم) از ناحیه اختلاط می‌شود.



شکل 2- نحوه استفاده از پایه فلزی و نگه‌دارنده جهت جوشکاری نمونه‌ها از زوایای مختلف.

از هر ورق جوشکاری شده، یک نمونه برای بررسی‌های ریزساختاری و دو نمونه جهت آزمون کشش-برش آماده‌سازی شد. جهت تهیه نمونه‌ها، ابتدا 1/5 سانتی‌متر از ابتدا و انتهای هر ورق جوشکاری شده به دلیل نرسیدن به حالت پایدار و وجود عیوب مختلف جدا شده و دور ریخته شد. سپس به‌منظور بررسی‌های ریزساختاری، ابتدا نمونه‌های جوشکاری شده از سطح مقطع عمود بر ناحیه اتصال به وسیله دستگاه برش جدا شدند. پس از برش، نمونه‌ها با رزین دو جزیی اپوکسی در دمای اتاق مانت سرد شدند و روش‌های متداول متالوگرافی از جمله سمباده‌زنی و پولیش جهت آماده‌سازی آن‌ها استفاده شد. به‌منظور مشاهده ریزساختار ناحیه اتصال، نمونه‌ها به مدت 130 ثانیه در ولتاژ 20 ولت با محلول بارکر (2/5% حجمی محلول مولار هیدروفلوروبوریک اسید در آب) الکترواچ شدند. سپس از مقطع اتصال برای مطالعات ماکروسکوپی توسط میکروسکوپ استریو و برای مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری تصویربرداری شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز برای بررسی ریزساختار فصل مشترک و عناصر موجود در آن و مشاهده لایه واکنشی تشکیل شده بین پلیمر و آلومینیوم استفاده شد. آنالیز عنصری نیز توسط همین میکروسکوپ و به‌روش طیف سنجی پراکندگی انرژی انجام شد. جهت تعیین استحکام برشی نمونه‌های جوشکاری شده، از آزمون کشش-برش با هندسه‌ای مطابق استاندارد ASTM D1002-5 استفاده شده و ابعاد نمونه‌های مربوطه طبق همین استاندارد 25×115 میلی‌متر انتخاب شدند. نرخ کشش (سرعت حرکت فک‌های دستگاه) در آزمون کشش-برش، با توجه به وجود ماده پلیمری برابر 0/5 میلی‌متر بر دقیقه تعیین گردید. لازم به ذکر است استاندارد ASTM D1002-5 مربوط به بررسی استحکام اتصالات چسبی فلز-فلز در آزمون کشش-برش می‌باشد.با این وجود به این دلیل که طبق اطلاعات نویسندگان، تاکنون استانداردی جهت بررسی خواص مکانیکی اتصالات لبه روی هم ورق‌های فلزی به پلیمری با فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی تدوین نشده‌است، و به دلیل تشابه هندسی ساختار اتصالات چسبی فلزات با اتصال استفاده شده در این پژوهش، از استاندارد مذکور جهت ساخت نمونه‌های آزمون خواص مکانیکی استفاده شد. علاوه بر این، جهت بررسی تغییرات سختی بخش فلزی و پلیمری نمونه‌ها در اثر فرایند اتصال، آزمون ریزسختی سنجی ویکرز برای آلومینیوم و سختی‌سنجی Shore D برای پلیمر مطابق با استاندارد ISO 868 انجام شد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.08]

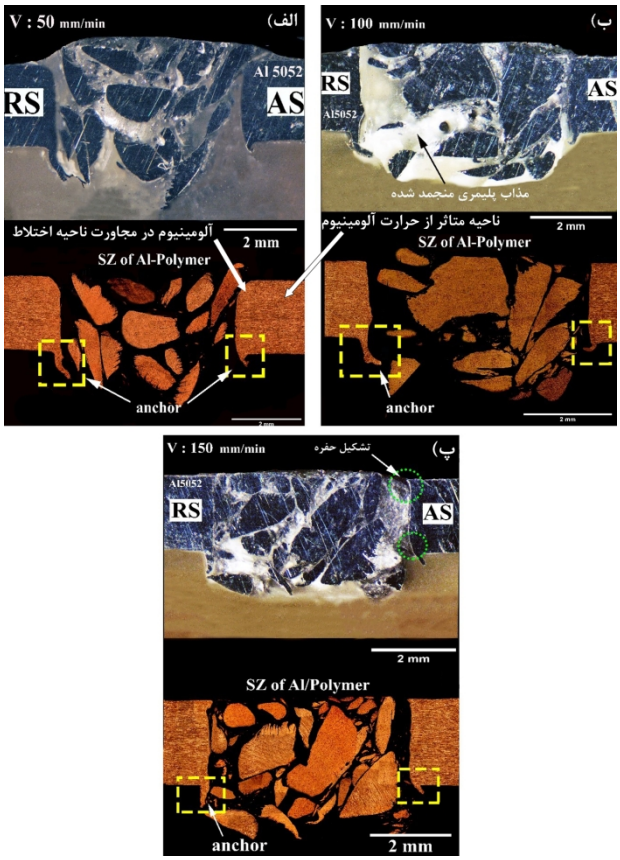
3- نتایج و بحث

3-1- تاثیر سرعت انتقالی و سرعت چرخشی ابزار بر روی پروفیل اتصال و نحوه اختلاط مواد

شکل(3) تصاویر درشت‌ساختار و ریزساختار مقطع اتصال آلومینیوم-پلی‌پروپیلن با فرایند FSW در سرعت‌های انتقالی متفاوت ابزار را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در سایر پژوهش‌های مربوط به اتصال آلومینیوم به پلیمر مشاهده شده‌است، بخشی از فلز آلومینیوم در لبه‌های ناحیه اختلاط به‌صورت تکه‌های لنگرمانند داخل ورق پلیمری فرورفته و نقش قفل مکانیکی را ایفا می‌کند. این لنگرها در هر دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده در اتصال تشکیل می‌شوند [17،18]. با این وجود، شکل و اندازه لنگرها و جهت و میزان فرو روی آن‌ها در زمینه پلیمری در هریک از نمونه‌ها متفاوت است. به عنوان مثال مقایسه نمونه‌های 50T و 100T نشان می‌دهد که با افزایش سرعت انتقالی ابزار اندازه لنگرها افزایش یافته است. دلیل این امر می‌تواند کاهش زمان ماندگاری و هم‌زدن پین در ناحیه اتصال با افزایش سرعت انتقالی ابزار باشد. به علاوه افزایش سرعت انتقالی ابزار زمان اصطکاک و در نتیجه حرارت ورودی به نمونه را نیز کاهش می‌دهد. در نمونه با حرارت ورودی بالاتر (50T) میزان نرم‌شدگی (کاهش تنش تسلیم) ناشی از افزایش دما نیز در آلومینیوم بیش‌تر بوده و بنابراین سیلان ماده‌ی بیش‌تری در این نمونه اتفاق می‌افتد و امکان خردشدن و کوچک شدن لنگرها افزایش می‌یابد.

نکته دیگر در مورد لنگرها، جهت‌گیری و میزان ورود آن‌ها به داخل ورق پلیمری است. در تصاویر 3-الف و پ مشاهده می‌شود که برای نمونه 50T جهت‌گیری لنگرها به سمت مخالف ناحیه اختلاط است، اما در نمونه‌های 100T و 150T جهت گیری لنگرها به سمت ناحیه اختلاط می‌باشد. این نکته نیز می‌تواند در رفتار نمونه‌ها حین آزمون کشش-برش تاثیرگذار باشد [3،17].

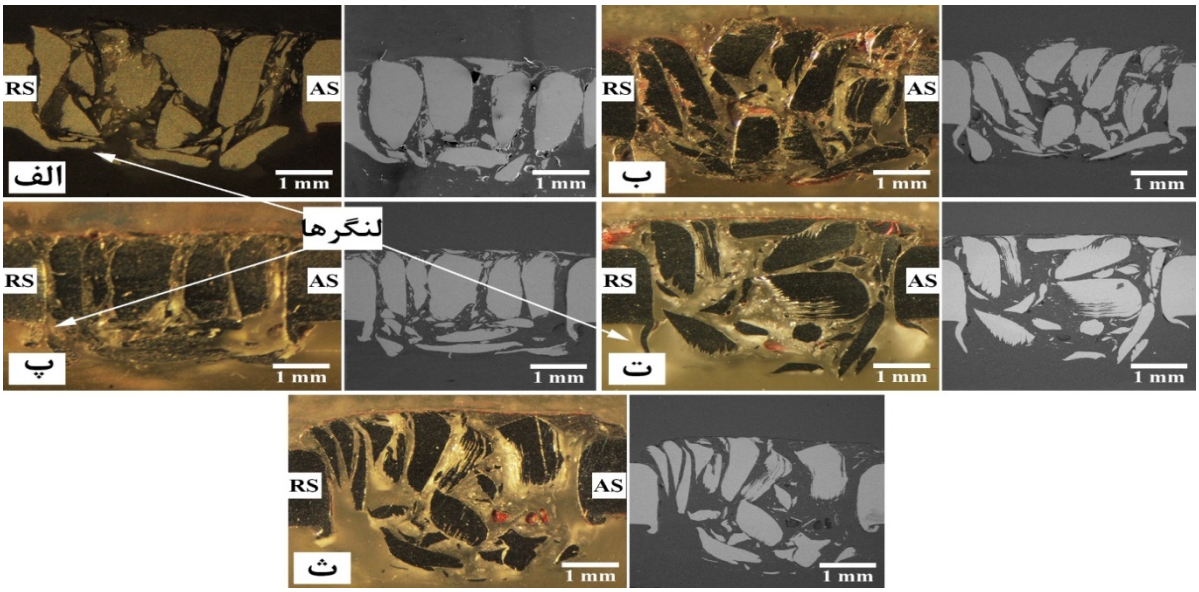
اثر افزایش سرعت چرخشی ابزار بر درشت‌ساختار اتصال در شکل(4) نشان داده شده است. همانند سرعت انتقالی، تغییر سرعت چرخشی نیز موجب تغییر در شکل و اندازه لنگرهای آلومینیومی می‌شود. اما تفاوت سرعت چرخشی با انتقالی در این است که افزایش سرعت انتقالی موجب افزایش حرارت ورودی به نمونه شده و در نتیجه با توجه به تحلیل‌های مطرح شده در بالا، انتظار می‌رود افزایش سرعت چرخشی موجب کاهش اندازه لنگرهای پلیمری شود. مقایسه تصاویر نمونه‌های 300R و 1100R به روشنی این موضوع را نشان می‌دهد. علاوه بر این، جهت‌گیری لنگرهای آلومینیومی نیز با تغییر سرعت چرخشی تغییر کرده است.



شکل 3- تغییرات اندازه لنگر در نمونه‌های الف-**50T**، ب- **100T** و پ- **150T**.

در نمونه 300R، جهت‌گیری لنگرها به سمت داخل ناحیه اختلاط است، اما با افزایش سرعت چرخشی جهت لنگرها تغییر کرده و ابتدا به صورت عمود بر ورق پلیمری و سپس به سمت مخالف ناحیه اختلاط کشیده شده است. تغییر در جهت‌گیری لنگرها می‌تواند رفتار مکانیکی اتصال را حین کشش تحت تاثیر قرار دهد. در واقع به‌نظر می‌رسد لنگرهایی که جهت‌گیری به‌صورت عمود بر سطح ورق پلیمری و یا به

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.08]



شکل 4- سطح مقطع اتصال و تغییر اندازه لنگرها در نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی در نمونه‌های
الف- R300 ب- R500 پ- R700 ت- R900 ث- R1100.

سمت خارج ناحیه اختلاط را دارند می‌توانند قفل‌های مکانیکی پایدارتری ایجاد کنند. در بخش 3-3 در مورد این پدیده با جزییات بیش‌تری بحث خواهد شد.

3-2-بررسی فصل مشترک اتصال آلومینیوم-پلیمر (لایه برهم‌کنشی)

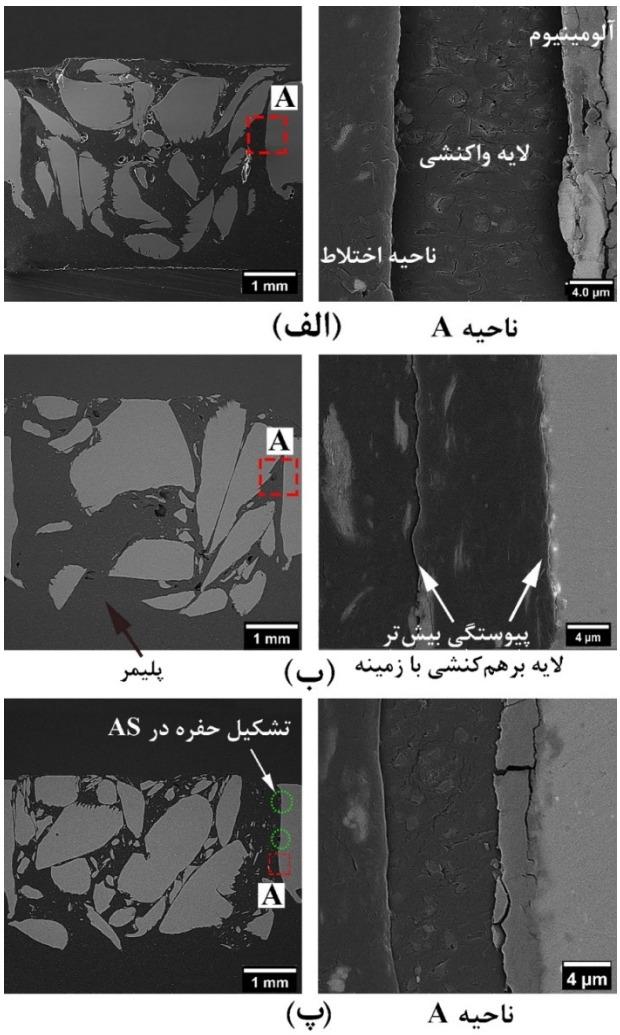
شکل(5) تصاویر SEM از سطح مقطع اتصال آلومینیوم به پلی‌پروپیلن و همچنین فصل مشترک آلومینیوم با ناحیه اختلاط ایجاد شده حین فرایند FSW را نشان می‌دهد. در فصل مشترک دیواره آلومینیوم و پلیمر منجمد شده در ناحیه اختلاط، یک لایه برهم‌کنشی (با ضخامتی در محدوده 2 تا 10 میکرومتر) تشکیل شده است. ضخامت و میزان چسبندگی این لایه به نواحی اطراف آن (ناحیه اختلاط و فلزپایه آلومینیوم) با متغیرهای جوشکاری در ارتباط است. وجوداین‌لایه برهم‌کنشی، نشان‌دهنده ایجاد جاذبه و پیوند شیمیایی بین آلومینیوم و پلیمر حین فرایند FSW می‌باشد. پژوهشگران مختلف، مکانیزم تشکیل این لایه را تماس مذاب پلیمر با دیواره‌های فلزپایه آلومینیوم در ناحیه اختلاط و انجام عمل فرسایش (Erosion) توسط مذاب پلیمری در اثر دمای بالای مذاب پلیمر و تـلاطم ایجاد شده در مذاب توسط ابزار در حال چرخش عنوان نموده‌اند.

در واقع جریان سیال مذاب پلیمر، در تماس با دیواره آلومینیوم جامد، بخشی از اتم‌های آلیاژ آلومینیوم را از سطح آن جدا نموده و موجب می‌شود مقادیری از عناصر موجود در آلیاژ پایه آلومینیوم وارد مذاب پلیمر (در نزدیکی فلزپایه آلومینیوم) شوند. این اتم‌ها همان عناصر تشکیل دهنده‌ی لایه واکنشی در فصل مشترک جامد-مذاب (فصل مشترک آلومینیوم و مذاب پلیمر در ناحیه اختلاط) هستند [15،16،19،20]. به بیان دیگر، در جوشکاری اصطکاکی تلاطمی آلومینیوم-پلیمر به دلیل تماس مذاب پلیمری با دیواره آلومینیومی در دمای بالا و همچنین تاثیرات ترمومکانیکی (عمل چرخش پین و حرارت اصطکاکی) اتم‌های آلومینیومی از سطح آلومینیوم جدا شده و وارد مذاب پلیمری می‌شوند. این اتم‌ها با انحلال در مذاب و ایجاد پیوندهای شیمیایی، در فصل مشترک یک لایه برهم‌کنشی تشکیل می‌دهند [21].

در تصاویر SEM لایه برهم‌کنشی، شکافی بین این لایه و زمینه پلیمری در ناحیه اختلاط دیده می‌شود. وجود شکاف یا ترک نشانه‌ای از چسبندگی ضعیف لایه برهم‌کنشی با فلز و پلیمر است. با توجه به ماهیت شیمیایی لایه برهم‌کنشی (که طبق پژوهش‌های انجام شده و نتایج آنالیز شیمیایی پژوهش حاضر احتمالا از جنس اکسید آلومینیوم است)، نیروی لازم جهت

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.08]

چسبندگی آن با زمینه پلیمری تنها توسط جاذبه‌های ضعیف واندروالسی تامین می‌شود. در نتیجه اعمال تنش‌های حتی بسیار کوچک می‌تواند موجب جدایش این لایه و ایجاد شکاف در فصل مشترک شود. این تنش‌ها، در اثر اختلاف قابل توجه ضریب انبساط حرارتی مواد پایه حین انجماد و سرد شدن مذاب پلیمری به وجود می‌آیند (ضریب انبساط حرارتی آلومینیوم و پلی‌پروپیلن به‌ترتیب $23/8 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ و $150\text{-}100 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ است) و موجب جدایش در فصل مشترک می‌شوند [22،23].



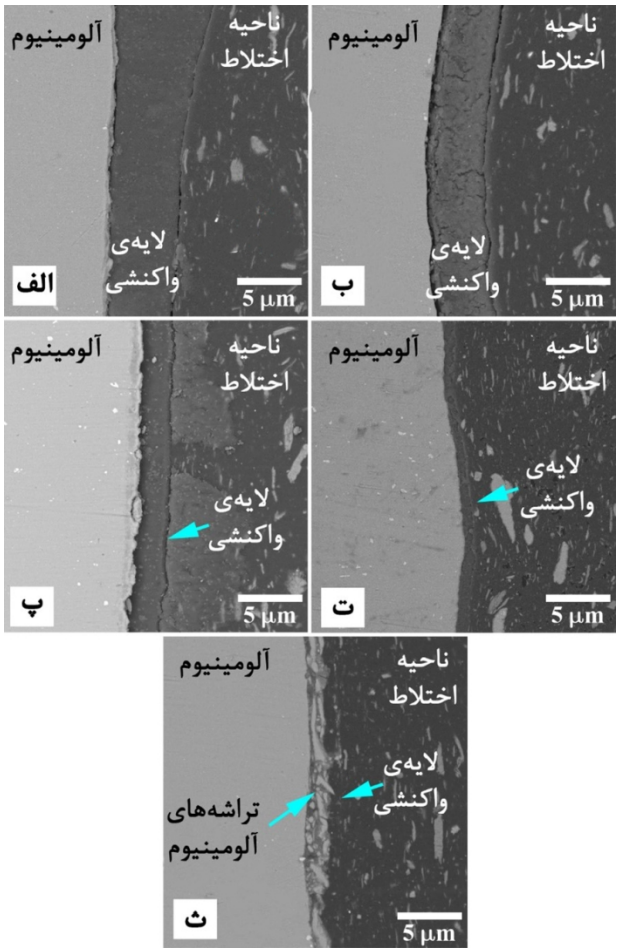
شکل 5- تغییرات فصل مشترک اتصال و لایه واکنشی در نمونه‌های الف-**50T** ب- **100T** و پ- **150T**.

با افزایش سرعت انتقالی ابزار، ضخامت لایه برهم‌کنشی کاهش یافته (از 8 میکرومتر به 4 میکرومتر) و مقدار شکاف بین لایه برهم‌کنشی و پلیمر نیز کم‌تر می‌شود. دلیل این امر این است که با افزایش سرعت انتقالی ابزار، میزان حرارت ورودی به درون ناحیه جوش کاهش می‌یابد و زمان تماس مذاب پلیمری تولید شده با آلومینیوم و همچنین عملکرد تلاطمی پین کمتر می‌شود. در نتیجه میزان فرسایش فلزپایه آلومینیومی توسط مذاب پلیمر کاهش می‌یابد. از طرفی، با کاهش حرارت ورودی (کاهش دمای فرایند)، میزان انقباض پلیمر در حین سرد شدن و تنش‌های حرارتی ایجاد شده نیز کاهش می‌یابد. بنابراین شکاف بین لایه برهم‌کنشی و پلیمر در SZ کمتر شده و چسبندگی بهتری ایجاد می‌شود. از طرفی افزایش بیش از حد سرعت انتقالی ابزار منجر به کم شدن زمان انجماد پلیمر و کاهش سیلان مذاب پلیمر در ناحیه اختلاط می‌شود که در نتیجه آن امکان تشکیل عیوب و حفرات در ناحیه اتصال افزایش می‌یابد. تغییر سرعت چرخشی نیز موجب تغییر ضخامت لایه واکنشی می‌شود. شکل(6) تغییرات ضخامت لایه واکنشی در فصل مشترک آلومینیوم و ناحیه اختلاط را با سرعت چرخشی نشان می‌دهد. ضخامت این لایه واکنشی با افزایش سرعت چرخشی به‌طور کلی (از 10 میکرومتر به 2 میکرومتر) کاهش می‌یابد. دلیل این امر اختلاط بیشتر مواد و سیلان ایجاد شده توسط پین با افزایش سرعت چرخشی است. علاوه بر این، در سرعت‌های چرخشی بالا به خصوص سرعت چرخشی 1100 دور بر دقیقه میزان تراشه‌های آلومینیوم موجود در این لایه افزایش می‌یابد که ناشی از خردشدن و اختلاط بیشتر ذرات آلومینیوم جدا شده از ورق پایه است.

نقشه توزیع عنصری در ناحیه اختلاط و فصل مشترک آن با آلومینیوم پایه در شکل(7) ارائه شده است. از نظر ترکیب شیمیایی، این لایه عمدتا شامل عناصر کربن، اکسیژن و آلومینیوم است. آلومینیوم موجود در این لایه شامل ذرات و تراشه‌های ریز جدا شده از فلزپایه و اتم‌های حل‌شده در مذاب پلیمری از طریق مکانیزم فرسایش است [24]. کربن نیز عنصر اصلی سازنده پلیمر پلی‌پروپیلن است و بخش عمده مذاب را تشکیل می‌دهد. اکسیژن موجود در این لایه نیز می‌تواند از اتمسفر (به دلیل عدم وجود محافظت‌های معمول در جوشکاری

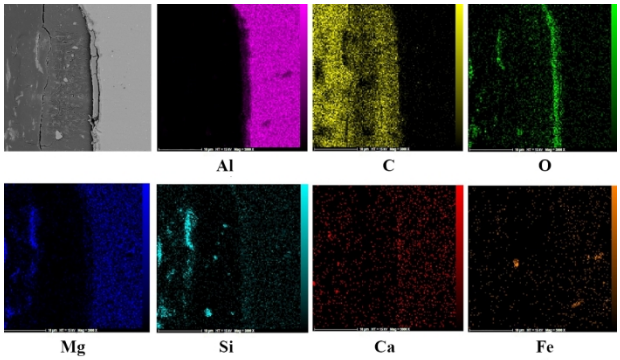
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.08]

مانند گاز محافظ یا سرباره در فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی) وارد ناحیه اختلاط شده و یا حتی پیش از اختلاط به صورت اکسید آلومینیوم روی سطح وجود داشته‌باشد و وارد ناحیه اختلاط و لایه واکنشی در فصل مشترک شود. با توجه به ماهیت و عناصر تشکیل دهنده لایه واکنشی و جاذبه ضعیف موجود بین این لایه با ناحیه اختلاط و آلومینیوم پایه، انتظار نمی‌رود که تشکیل این لایه و ویژگی‌های هندسی آن (با ضخامت‌هایی در بازه 2 تا 10 میکرومتر در سرعت‌های مختلف چرخشی و انتقالی ابزار) اثر قابل توجهی بر خواص مکانیکی اتصال داشته باشد [25،26].



شکل 6- تغییرات لایه واکنشی در نمونه‌های الف- 300R ب- 500R پ- 700R ت- 900R ث- 1100R.

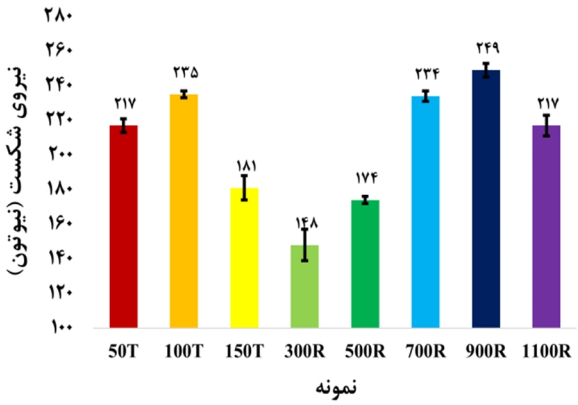
بررسی سایر پژوهش‌های انجام شده در حوزه اتصال آلومینیوم-پلیمر نیز این موضوع را تایید نموده و نشان می‌دهد عامل اصلی ایجاد اتصال بین این دو ماده و استحکام آن، تشکیل قفل‌های مکانیکی (لنگرهای آلومینیومی) در حین فرایند اصطکاکی تلاطمی است.



شکل 7- نقشه توزیع عنصری در لایه واکنشی نمونه‌ها.

3-3- تاثیر سرعت انتقالی و سرعت چرخشی ابزار بر رفتار مکانیکی اتصال

شکل(8) تغییرات بیشینه نیروی کشش-برشی نمونه‌های جوشکاری شده با تغییر سرعت انتقالی و چرخشی ابزار را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل، با افزایش سرعت انتقالی از 50 به 100 میلی‌متر بر دقیقه، نیروی برشی اتصال افزایش یافته ولی میزان نیروی برشی اتصال نمونه‌ها با افزایش بیشتر سرعت انتقالی (از 100 به 150 میلی‌متر بر دقیقه) کاهش می‌یابد.



شکل 8- تغییرات نیروی شکست جوش‌ها با متغیرهای فرایندی.

عواملی که استحکام اتصال آلومینیوم به پلیمر را تحت تاثیر قرار می‌دهند، میزان چسبندگی بین آلومینیوم و پلیمر (لایه برهم‌کنشی)، وجود عیوب در این ناحیه و مهم‌تر از همه تشکیل قفل‌های مکانیکی (لنگرهای آلومینیومی) هستند. هرچه

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.08]

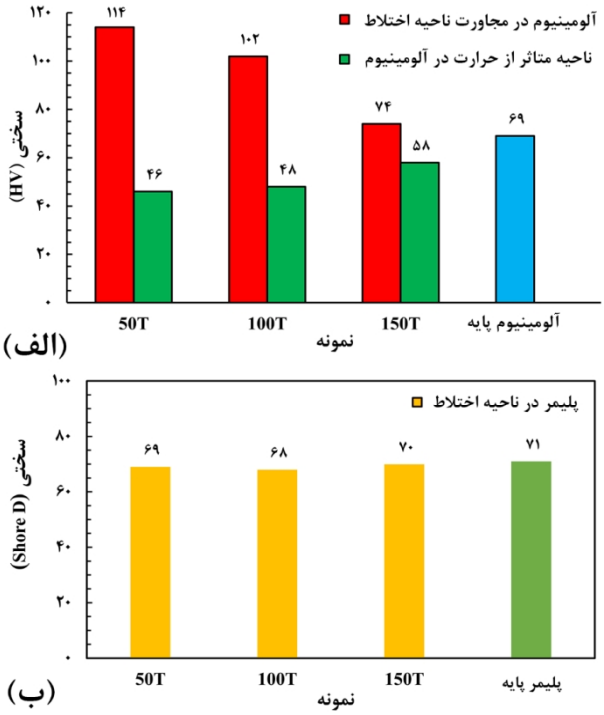
چسبندگی بین آلومینیوم و پلیمر با لایه برهم‌کنشی بهتر صورت گرفته و عیوب موجود در این ناحیه کمتر باشد، استحکام اتصال افزایش می‌یابد. همچنین هرچه مقدار و اندازه آلومینیوم لنگرمانند تشکیل شده بزرگ‌تر باشد، قفل مکانیکی بهتری ایجاد شده و ظرفیت تحمل نیروی اتصال افزایش می‌یابد. در سرعت انتقالی ابزار پایین (50T) اندازه آلومینیوم‌های لنگرمانند در پلیمر (در طول جوش) کاهش می‌یابد. همچنین پیوستگی لایه برهم‌کنشی؛ به دلیل انقباض شدید پلیمر کم‌تر شده و تشکیل ترک و رشد آن در حین اعمال نیرو به اتصال با سهولت بیش‌تری اتفاق می‌افتد و در نتیجه استحکام اتصال کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت انتقالی از 50 به 100 میلی‌متر بر دقیقه، اندازه آلومینیوم‌های لنگرمانند در پلیمر بزرگتر شده و همچنین با توجه به شکل(5)، چسبندگی بین آلومینیوم و پلیمر به لایه برهم‌کنشی بیشتر می‌شود. بنابراین هر دو عامل منجر به بهبود استحکام اتصال شده و بیش‌ترین نیروی اتصال در سرعت انتقالی 100 میلی‌متر بر دقیقه مشاهده می‌شود. با افزایش سرعت انتقالی از 100 به 150 میلی‌متر بر دقیقه با وجود اینکه اندازه آلومینیوم لنگرمانند کمی بزرگ‌تر شده اما میزان نیروی برشی اتصال کاهش یافته است. عاملی که باعث کاهش نیروی اتصال می‌شود تشکیل حفرات و ناپیوستگی‌ها در فصل مشترک آلومینیوم با SZ است که ناشی از زمان ناکافی برای جریان یافتن مذاب پلیمر و پر کردن تمامی ناحیه اختلاط بوده‌است. وجود این حفرات باعث کاهش مقاومت این ناحیه در برابر تنش‌های اعمالی می‌شود و با اعمال نیرو به اتصال، حفرات تشکیل شده سریعاً رشد می‌کنند و موجب گسترش سریع ترک در فصل مشترک آلومینیوم و SZ و در نتیجه کاهش استحکام اتصال می‌شوند.

اثر سرعت چرخشی ابزار بر نیروی شکست اتصالات آلومینیوم-پلیمر نیز در شکل(8) دیده می‌شود. همانند سرعت انتقالی، نیروی شکست اتصال با افزایش سرعت انتقالی نیز ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این در حالی است که همان‌طور که در بخش 3-1 اشاره شد اندازه لنگرهای آلومینیومی با افزایش سرعت چرخشی ابزار به‌طور کلی کاهش می‌یابد. در نتیجه می‌توان انتظار داشت که علاوه بر اندازه قفل‌های مکانیکی، عوامل هندسی دیگری نیز در تعیین نیروی شکست اتصال تعیین‌کننده باشند. از جمله مهم‌ترین این عوامل می‌توان جهت‌گیری و عمق نفوذ لنگرها درون ورق پلیمری را نام برد. در واقع با وجود این‌که حین آزمون کشش، لنگرهای موجود در سمت پیش‌رونده اتصال بخش اصلی نیروی کششی را تحمل می‌کنند، جهت‌گیری این لنگرها می‌تواند در میزان نیروی تحمل‌شده موثر باشد. به عنوان مثال اگر جهت لنگرها به سمت داخل ناحیه اختلاط باشد، حین کشش ممکن است علاوه بر شکستن لنگرها، بیرون آمدن لنگرها از درون ورق پلیمری نیز موجب جدایش قفل‌های مکانیکی در اتصال شود. اما اگر لنگرها عمود بر ورق پلیمری و یا به سمت خارج ناحیه اتصال متمایل شوند، تنها شکست لنگرها می‌تواند موجب جدا شدن قفل‌های مکانیکی شود. این موضوع موجب می‌شود در نمونه 900R با وجود اندازه کوچک‌تر لنگرها نسبت به سرعت‌های چرخشی پایین‌تر تنها به دلیل جهت‌گیری عمودی لنگرها به درون سطح ورق پلیمری و عمق نفوذ بیشتر نسبت به سایر نمونه‌ها، بیشترین نیروی شکست اتصال حاصل شود.

شکل(9-الف)، تغییرات سختی آلومینیوم در مجاورت ناحیه اختلاط و ناحیه متاثر از حرارت آلومینیوم را با تغییر سرعتی انتقالی نمایش می‌دهد. افزایش سرعت انتقالی موجب کاهش سختی آلومینیوم در کناره ناحیه اختلاط شده‌است. اما روند تغییرات سختی در ناحیه متاثر از حرارت متفاوت بوده و سختی این ناحیه با افرایش سرعت انتقالی افزایش داشته‌است. دلیل افزایش سختی در مجاورت ناحیه اختلاط، به عملکرد چرخشی و تغییر شکل پلاستیک شدید ایجاد شده توسط پین مرتبط است. سرعت انتقالی پایین، زمان بیشتری را برای تماس پین با آلومینیوم و اعمال تغییر شکل شدید در ناحیه اختلاط و اطراف آن پدید می‌آورد. تغییر شکل اعمالی در کنار حرارت اصطکاکی ایجاد شده موجب تبلور مجدد دینامیکی و کاهش قابل توجه اندازه دانه‌ها در مجاورت ناحیه اختلاط شده و سختی را افزایش می‌دهد [1،5]. اما در مورد ناحیه متاثر از حرارت، اثر تغییر شکل پلاستیک وجود ندارد. در نتیجه سرعت انتقالی پایین

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.08]

با افزایش حرارت ورودی تنها موجب تبلور مجدد استاتیکی (به دلیل ریزساختار کار شده آلومینیوم پایه) و رشد دانه‌ها می‌شود که سختی را تا مقادیری کمتر از سختی فلزپایه کاهش می‌دهد. در مورد سختی پلیمر موجود در ناحیه اختلاط (شکل 9-ب)، مشاهده می‌شود که مقدار سختی با افزایش سرعت چرخشی تغییر قابل توجهی نداشته و به سختی پلیمر پایه نزدیک است. دلیل این امر این است که به‌طور معمول در پلی اتیلن، ذوب و انجماد مجدد و تغییرات درصد بلورینگی تاثیر قابل توجهی در میزان سختی ندارد. در واقع، عامل کاهش خواص مکانیکی پلی‌اتیلن (کاهش استحکام و سختی)، تخریب پلیمر در اثر دمای بالا و یا زمان فرایند طولانی است که در مورد این نمونه‌ها با توجه به متغیرهای فرایندی انتخاب شده در این پژوهش به‌وجود نیامده‌است [7،9].



شکل 9- تغییرات سختی الف- آلومینیوم (در دو بخش مجاور ناحیه اختلاط و ناحیه متاثر از حرارت) و ب- پلیمر موجود در ناحیه اختلاط پس از اتصال در سرعت‌های انتقالی مختلف ابزار.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اتصال اصطکاکی تلاطمی آلومینیوم AA5052 به پلی‌پروپیلن PP-Z30S و اثر متغیرهای فرایندی (سرعت انتقالی و سرعت چرخشی ابزار) بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

- در اتصال اصطکاکی تلاطمی آلومینیوم به پلی‌پروپیلن ایجاد قفل‌های مکانیکی مهم‌ترین مکانیزم اتصال است. این قفل‌ها به شکل قطعات لنگرمانند از آلومینیوم هستند که در مرز ناحیه اختلاط به درون ورق پلیمری فرو می‌روند. کاهش حرارت ورودی فرایند جوشکاری (با افزایش سرعت انتقالی و یا کاهش سرعت چرخشی ابزار) موجب افزایش اندازه این لنگرها می‌شود.

- در فصل مشترک ناحیه اختلاط و ورق آلومینیومی، یک لایه واکنشی شکل می‌گیرد که عمدتا شامل عناصر Al، C و O است. افزایش سرعت خطی با کاهش حرارت ورودی و افزایش سرعت چرخشی با ایجاد سیلان شدید موجب کاهش ضخامت این لایه می‌شود. با این وجود به دلیل وجود پیوندهای ضعیف واندروالسی بین این لایه و ناحیه اختلاط، تشکیل آن نقش مهمی در استحکام اتصال ایفا نمی‌کند.

- افزایش سرعت انتقالی از طریق افزایش اندازه لنگرها ابتدا موجب افزایش نیروی شکست اتصال (از 217 به 235 نیوتن) می‌شود. نیروی شکست اتصال با افزایش سرعت چرخشی ابزار نیز به‌طور کلی افزایش می‌یابد (از 148 تا 249 نیوتن). روند افزایشی نیروی شکست عمدتا به دلیل افزایش اندازه یا تغییر در جهت‌گیری لنگرهای آلومینیومی و افزایش عمق نفوذ آن‌هاست. افزایش بیش از حد سرعت انتقالی با کاهش حرارت ورودی موجب تشکیل عیوب در فصل مشترک اتصال شده و افزایش بیش از حد سرعت چرخشی نیز با خرد کردن لنگرها موجب کاهش استحکام اتصال می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله تمایل دارند مراتب تشکر و قدردانی خود را از صندوق حمایت از پژوهشگران و نوآوران کشور بابت حمایت از این پژوهش از طریق گرنت به شماره 97011444 اعلام نمایند.

منابع

1-Haghshenas M., Khodabakhshi F. Dissimilar friction-

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.08]

Part B: Engineering 2015;73:82–8.
15-Khodabakhshi F., Haghshenas M., Chen J., Shalchi Amirkhiz B., Li J., Gerlich A.P.P. Bonding mechanism and interface characterisation during dissimilar friction stir welding of an aluminium/polymer bi-material joint. Science and Technology of Welding and Joining 2017;22:182–90.
16-Shahmiri H., Movahedi M., Kokabi A.H. Friction stir lap joining of aluminium alloy to polypropylene sheets. Science and Technology of Welding and Joining 2017;22:120–6.
17-Huang Y., Meng X., Wang Y., Xie Y., Zhou L. Joining of aluminum alloy and polymer via friction stir lap welding. Journal of Materials Processing Technology 2018;257:148–54.
18-Huang Y., Meng X., Xie Y., Li J., Wan L. Joining of carbon fiber reinforced thermoplastic and metal via friction stir welding with co-controlling shape and performance. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2018;112:328–36.
19-Derazkola H.A., Kashiry Fard R., Khodabakhshi F. Effects of processing parameters on the characteristics of dissimilar friction-stir-welded joints between AA5058 aluminum alloy and PMMA polymer. Welding in the World 2018;62:117–30.
20-Paidar M., Ojo O.O., Moghanian A., Pabandi H.K., Elsa M. Pre-threaded hole friction stir spot welding of AA2219/PP-C30S sheets. Journal of Materials Processing Technology 2019;273:116272.
21-Karami Pabandi H., Movahedi M., Kokabi A.H. A new refill friction spot welding process for aluminum/polymer composite hybrid structures. Composite Structures 2017;174:59–69.
22-Abibe A.B., Sônego M., dos Santos J.F., Canto L.B., Amancio-Filho S.T. On the feasibility of a friction-based staking joining method for polymer–metal hybrid structures. Materials & Design 2016;92:632–42.
23-Aliasghari S., Ghorbani M., Skeldon P., Karami H., Movahedi M. Effect of plasma electrolytic oxidation on joining of AA 5052 aluminium alloy to polypropylene using friction stir spot welding. Surface and Coatings Technology 2017;313:274–81.
24-Patel A.R., Kotadiya D.J., Kapopara J.M., Dalwadi C.G., Patel N.P., Rana H.G. Investigation of Mechanical Properties for Hybrid Joint of Aluminium to Polymer using Friction Stir Welding (FSW). Materials Today: Proceedings 2018;5:4242–9.
25-Liu F.C., Dong P., Lu W., Sun K. On formation of AlOC bonds at aluminum/polyamide joint interface. Applied Surface Science 2019;466:202–9.
26-Liu F.C., Dong P., Pei X. A high-speed metal-to-polymer direct joining technique and underlying bonding mechanisms. Journal of Materials Processing Technology 2020;280:116610.
stir welding of aluminum and polymer: a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2019 104:1 2019;104:333–58.
2-Lambiase F., Genna S. Experimental analysis of laser assisted joining of Al-Mg aluminium alloy with Polyetheretherketone (PEEK). International Journal of Adhesion and Adhesives 2018;84:265–74.
3-Shiravi H., Movahedi M., Ozlati A. Improving appearance and mechanical strength of aluminum-polypropylene/talc composite friction stir joint using a novel tool design. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2022;121:3717–30.
4-Temesi T., Czigany T. Integrated Structures from Dissimilar Materials: The Future Belongs to Aluminum–Polymer Joints. Advanced Engineering Materials 2020;22:2000007.
5-Huang Y., Meng X., Xie Y., Wan L., Lv Z., Cao J., et al. Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2018;105:235–57.
6-Zhou Z., Gao X., Zhang Y. Research Progress on Characterization and Regulation of Forming Quality in Laser Joining of Metal and Polymer, and Development Trends of Lightweight Automotive Applications. Metals 2022, Vol 12, Page 1666 2022;12:1666.
7-Maddah H.A. Polypropylene as a Promising Plastic: A Review. American Journal of Polymer Science 2016;6:1–11.
8-Kah P., Suoranta R., Martikainen J., Magnus C. TECHNIQUES FOR JOINING DISSIMILAR MATERIALS: METALS AND POLYMERS. Reviews on Advanced Materials Science 2014;36.
9-Wang K. Characterization and modeling of the thermomechanical behavior of polypropylene-based composites : effect of recycling and filler content. Université de Strasbourg, 2013.
10-Ali M.A.M., Abdullah A., Dahaman S., Amin A., Mansor S. Review the mechanical properties of reinforcing agents in polypropylene matrix of car bumper. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences 2017;12:4209–13.
11-Lambiase F., Liu F. Recent advances in metal-polymer joining processes. Joining Processes for Dissimilar and Advanced Materials 2022:123–51.
12-Amancio-Filho S.T., dos Santos J.F. Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures: Recent developments and trends. Polymer Engineering & Science 2009;49:1461–76.
13-Lambiase F., Paoletti A., Grossi V., Ilio A. Di. Friction assisted joining of aluminum and PVC sheets. Journal of Manufacturing Processes 2017;29:221–31.
14-Nagatsuka K., Yoshida S., Tsuchiya A., Nakata K. Direct joining of carbon-fiber-reinforced plastic to an aluminum alloy using friction lap joining. Composites

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.08]