

The Effect of Carbon Black Content on the Weld Strength of Friction Stir Spot Aluminum/Polyethylene Composite Weld*

Research Article

Toktam kianafshar¹ Samaneh Sahebian²
 Mohsen Haddad Sabzevar³

1-Introduction

Development of technology in various fields, especially in automotive industry causes to use materials with high strength, low weight and low price in automobile industry. The friction stir spot welding process (FSSW) has been proposed as a high-efficiency method for the joining of polymeric materials or polymeric materials with other materials, including metals. FSSW parameters that have a great impact on the weld strength include tool rotation speed, tool plunging rate, and depth, tool tilt angle, and geometric shape. In 2011, Kemal Bilici and Irfan Yukler investigated the parameters of friction stir spot welding for the joining of high-density polyethylene sheets. They showed that with increasing tool dwell time and tool rotation speed, the joint strength also increases.

2- Research materials and methods

In this research, for metal-polymer joining, 5083 aluminum alloy sheets with dimensions of 10cm×5cm×2mm, pure high-density polyethylene and Carbon black powder N^o 220 were used.

2-1 Sample preparation

Powders of high-density polyethylene and carbon black were mixed together using a ball mill with a speed of 300 rpm for 15 minutes. After that, pure polyethylene and composite powders were placed in hot press machine (hydraulic model Sph 500), under a pressure of 45 tons and a temperature of 190°C to prepare sheets with dimensions of 10cm×5cm×2mm. Polyethylene composite or polymer sheets and an aluminum sheet as a lap joint were joint by friction stir spot welding method by using a universal milling machine FP4MH with a rotation speed of 2500 rpm, a plunging depth of 3.2 mm, and a plunging rate of 40 mm/min. The variable parameters in this study, which include the dwell life of the tool and the weight percentage of the carbon black which were shown in Table 1.

Table1: process variables for pure polyethylene and carbon black reinforced composite

Carbon black wt. %	0%	2/5%	5%
dwell life	5s,10s, 15s,20s	5s,10s, 15s,20s	5s,10s, 15s,20s

Shear tensile test was performed at room temperature and at a speed of 2 mm/min using a universal device according to DIN EN ISO 14273. Scanning electron microscopy (SEM) and field emission electron microscopy (FESEM) were used to microscopically examine the composite reinforced with 5 wt. % of carbon black in dwell time of 10s and pure polyethylene in dwell time of 15s.

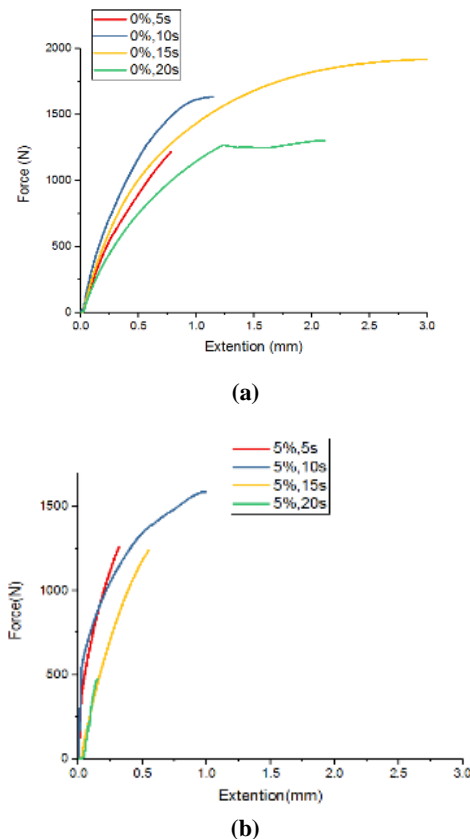


Figure 1. - Force-elongation changes for (a) pure polyethylene, (b) polyethylene reinforced with 5%wt of carbon black at different dwell times.

3. Results and Discussion

The force-displacement curves of pure polyethylene and composite specimens reinforced with 5 wt. % carbon black at different dwell times are shown in Figure 1. According to Figure (1-a), polyethylene was confronted with higher temperature when dwell time increased, and polyethylene converted from the paste state to the melted state at a dwell time of 15 seconds, which increased the surface area between the two phases and the strengthen the joint. Also, a decreasing trend of joining strength is observed for more than 15s.

Increasing carbon black in the polyethylene matrix generally increases the viscosity (negative effect) and the composite's thermal conductivity (positive effect). Figure

* Manuscript received; 9 April 2022, Revised, 27 April 2022, Accepted, 28 June 2022.

¹ Masters student Department of Material science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Corresponding Author, Assistant professor, Department of Material Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. **Email:** s.sahebain@um.ac.ir

³ Associate professor, Department of Material science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

(1-b) presents the force-displacement curve of HDPE/5 wt.% carbon black composite at different dwell times. The increase in the thermal conductivity of the polyethylene matrix during the constant dwell time, causing a higher temperature than pure polyethylene. In addition, the incremental trend in joint strength was seen until dwell time of 10s, and then a decrease in joint strength is observed. Based on figure 2, the roughness of the interface between the aluminum and the composite or pure polyethylene indicated mechanical interlocking and an adhesive joint between two phases.

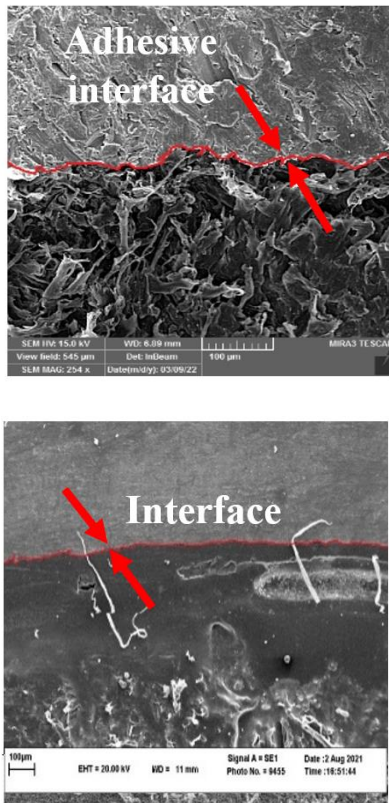


Figure 2 - (a) FESEM image of the interface between Al and pure polyethylene in dwell time of 15s; and (b) SEM image of the interface between Al and HDPE/5%wt CB composite in dwell time of 10s.

4- Conclusion

In this study, a joint between aluminum and carbon black reinforced polyethylene matrix was produced by friction stir spot welding method and the effect of the presence of carbon black on the final properties was investigated. The results showed that increasing the dwell time and the temperature in the joint area for HDPE/5 wt.% CB composite until dwell time of 10 s cause to incremental trend of joint strength, but for HDPE sample in dwell time of 15 seconds, the maximum of joint strength was obtained. Mechanical interlocking was seen at interface of aluminum, pure polyethylene, and carbon black reinforced HDPE sample.

تأثیر حضور کربن بلک بر استحکام اتصال آلومینیوم/پلی اتیلن در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای *

مقاله پژوهشی

تکتم کیان افشار^(۱) سمانه صاحبیان سقی^(۲) محسن حداد سبزواری^(۳)

چکیده با پیدایش صنایع و رشد آن‌ها اتصال قطعات مختلف به یکدیگر به عنوان یک نیاز مهم مطرح شده است. به دلیل پیچیدگی روش‌های اتصال متداول، تمایل زیادی به پژوهش و توسعه روش‌های اتصال جدید در سال‌های اخیر به وجود آمده است. از این رو این پژوهش با هدف بررسی استحکام اتصال آلومینیوم آلیاژی ۵۰۸۳ به یک کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با ذرات کربن بلک انجام شده است. در این مطالعه اتصال به وسیله جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای به وجود آمده و پارامترهای جوشکاری از جمله سرعت چرخش ابزار، نرخ فروری ابزار و عمق فروری ابزار به ترتیب 250 rpm ، 40 mm/min و $3/2 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور ساخت ورقه‌های کامپوزیتی، پس از اختلاط پودر پلی اتیلن سنگین و فاز تقویت کننده کربن بلک با استفاده از آسیاب گلوله‌ای و با سرعت 300 rpm ، از دستگاه پرس گرم در دمای 190 و تحت فشار 45 تن استفاده گردید. در پژوهش پیش رو تأثیر دو متغیر مدت زمان ماندگاری ابزار در قطعه کار و در صد وزنی ذرات رسانای فاز تقویت کننده‌ی زمینه‌ی پلی اتیلن بر استحکام جوش بررسی شد. مقادیر در نظر گرفته شده برای متغیر مدت زمان ماندگاری 5 ، 10 و 20 ثانیه و برای متغیر فاز تقویت کننده $5/2$ و 5 درصد وزنی کربن بلک می‌باشند. خواص مکانیکی نیز شامل استحکام کشش برشی در محل اتصال (استحکام نقطه‌ای جوش) با انجام تست کشش برشی بر روی نمونه‌ها با سرعت 2 mm/min به دست آمد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش مدت زمان ماندگاری، برای پلی اتیلن خالص در زمان ماندگاری 15 ثانیه و برای نمونه‌های کامپوزیتی زمینه پلی اتیلن تقویت شده با کربن بلک در بازه زمانی 10 ثانیه، اتصال مطلوب ایجاد شد و با افزایش زمان ماندگاری تا 20 ثانیه به دلیل افزایش بیش از حد مذاب پلی اتیلن و آزاد شدن تنش‌های پسماند در طی فرایند انجام، روند نزولی استحکام اتصال مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، پلی اتیلن با دانسیته‌ی بالا، کربن بلک، استحکام کششی برشی.

مقدمه

و مکانیکی پلیمرها و فلزات، اعمال روش‌های مرسوم جوشکاری برای اتصال این مواد غیرممکن است. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان روشی پربازده در مقایسه با اتصال دهی شیمیایی چسبی یا مکانیکی با پیچ و پرچ مطرح شده است [10]. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فرایندی مناسب به منظور اتصال دهی حالت جامد فلز به پلیمر است. در گذشته این روش برای اتصال دهی آلیاژهای آلومینیوم به کار می‌رفت، اما به علت مزایای ثابت شده‌ی آن این روش برای جوشکاری مواد فلزی دیگر، پلیمرها و حتی اتصال دهی مواد غیرمشابه نیز به کار می‌رود [11,12].

در سال ۲۰۰۴ روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به صورت نقطه‌ای اجرا شد که روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW) نام گرفته است. فرایند جوشکاری

با پیشرفت تکنولوژی در عرصه‌های مختلف از جمله صنعت اتومبیل، نیاز به مواد مقرون به صرفه با استحکام بالا و وزن کم در ساخت بدنه خودرو به صورت روزافزونی احساس می‌شود. پلیمرها در رده پرمصرف‌ترین مواد در جهان قرار گرفته‌اند، در حقیقت سهولت فرایندپذیری پلیمرها و پلاستیک‌ها موجب شده است که آن‌ها تبدیل به پرکاربردترین مواد عصر حاضر شوند [1-3]. به دلیل چگالی کم و توانایی آن‌ها برای شکل‌گیری و قالب‌گیری در دماهای کم، از پلیمرها به جای مواد سنتی مانند فلزات در ساخت قطعات ترکیبی طی فرایند مونتاژ قطعات استفاده می‌شود [4-9]. همین امر سبب شده است که توجه بسیاری از محققان به اتصال مواد پلیمری و یا مواد پلیمری با سایر مواد از جمله فلزات جلب شود. به دلیل تفاوت زیاد خواص فیزیکی، شیمیایی

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۴/۷ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی گرایش شناسایی و انتخاب مواد، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۳) استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای شامل سه مرحله می‌باشد: فروروی، اغتشاش و خروج ابزار. این فرایند با چرخش ابزار در سرعت چرخشی بالا آغاز می‌شود. سپس ابزار به نقطه‌ی جوش وارد شده تا شانه‌ی ابزار در تماس با قسمت بالایی سطح قطعه کار بالایی قرار بگیرد. حرکت فرورونده‌ی ابزار باعث می‌شود که مقداری از ماده خارج شده و وقتی ابزار به عمق از پیش تعیین شده می‌رسد، حرکت فروروی پایان یافته و مرحله‌ی اغتشاش شروع می‌شود. در این مرحله بین در قطعه کار بدون فروروی می‌چرخد. گرمای اصطکاکی ایجاد شده در مرحله‌ی فروروی و اغتشاشی سپس گرم شدن ماده‌ی نزدیک به ابزار شده و در نتیجه مواد قطعه کار بالایی و پایینی نرم شده و در مرحله‌ی اغتشاش با یکدیگر مخلوط می‌گردند. شانه‌ی ابزار تنش فشاری را روی ماده‌ی نرم شده ایجاد می‌کند و در نتیجه یک اتصال حالت جامد در مرحله‌ی اغتشاش شکل می‌گیرد. زمانی که اتصال مورد نظر به دست آمد، فرایند پایان یافته و ابزار از قطعه کار خارج شده و در اثر خارج شدن ابزار از قطعه کار سوراخی در وسط اتصال ایجاد می‌شود [13]. پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بر استحکام جوش ترموپلاستیک‌ها از جمله ورق‌های پلی اتیلن با دانسیته‌ی بالا بسیار تأثیرگذار است. از متغیرهای فرایند مذکور می‌توان به سرعت چرخش ابزار، نرخ فروری و عمق فروروی ابزار، زاویه‌ی شیب ابزار و شکل هندسی آن اشاره نمود [14,15].

در سال ۲۰۱۱ م. کمال بلقی و ا. ایرفان یوکلر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای جهت اتصال ورقه‌های پلی اتیلن با دانسیته‌ی بالا را بررسی نمودند. آنها نشان دادند که زمان ماندگاری و سرعت چرخش ابزار بر استحکام اتصال تأثیرگذارند. با افزایش زمان ماندگاری دما در منطقه‌ی جوش افزایش یافته و در نتیجه استحکام اتصال نیز افزایش می‌یابد، همچنین اغتشاش بین با سرعت چرخشی ابزار افزایش یافته و در نتیجه استحکام اتصال با افزایش سرعت چرخشی ابزار نیز روند صعودی دارد. ملندر و همکارانش قابلیت اتصال آلیاژ آلومینیوم به پلی فنیلن سولفید را توسط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بررسی نموده و تأثیر پارامترهای فرایند را بر استحکام اتصال و شکست نگاری مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج به دست آمده از این تحقیق منطقه‌ی جوش شامل مخلوطی از تکه‌های آلومینیوم بوده که توسط زمینه‌ی پلی فنیلن سولفید احاطه شده‌اند. آنها نشان دادند که اندازه‌ی تکه‌های فلزی با افزایش سرعت چرخش ابزار افزایش می‌یابد [16]. شاهمیری و همکارانش امکان اتصال آلیاژ آلومینیوم را به ورقه‌های پلی پروپیلن (polypropylene) با اتصال

اصطکاکی اغتشاشی که در آن ورقه‌ها به صورت لبه‌ای (لبه روی هم) قرار گرفته‌اند، بررسی نموده و تأثیر گرمای ورودی بر ریزساختار و رفتار مکانیکی اتصال مورد مطالعه قرار دادند. طبق نتایج به دست آمده یک لایه‌ی واسط در فصل مشترک آلومینیوم/پلی اتیلن تشکیل شده که شامل عناصر اکسیژن، آلومینیوم و کربن می‌باشد. اما به دلیل چسبندگی نسبتاً ضعیف این لایه به زمینه، شکافی بین آلومینیوم و زمینه‌ی پلیمری تشکیل و باعث کاهش استحکام برشی با افزایش گرمای ورودی می‌شود [17]. باله و همکاران از جوشکاری فراصوت برای اتصال آلیاژ آلومینیوم ۵۷۵۴ به صفحات پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن استفاده نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که استحکام برشی اتصال به 32 MPa رسیده است [18]. یوکی اوگاوا و همکارانش امکان اتصال آلیاژ آلومینیوم به پلاستیک تقویت شده با الیاف کربن را با به کار بردن جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بررسی نموده و تأثیر عملیات سطحی انجام شده بر روی آلیاژ آلومینیوم، بر خواص خستگی و مکانیزم شکست اتصال مواد غیرمشابه را مورد مطالعه قرار دادند. عملیات سطحی انجام شده شامل ایجاد پوشش آلی و قرار دادن یک لایه‌ی متخلخل بر روی آلیاژ آلومینیوم می‌باشد. طبق نتایج به دست آمده از این تحقیق میانگین مقاومت کششی برای آلیاژ آلومینیوم بدون عملیات سطحی و آلیاژ آلومینیوم پوشش داده شده با پوشش آلی و لایه متخلخل به ترتیب $5/7$ ، $7/4$ و 66 کیلونیوتن تخمین زده شد، آنها ادعا نمودند که با انجام عملیات سطحی، استحکام اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای افزایش می‌یابد [19].

حامد آقاجانی و همکارانش در پژوهشی که بر روی جوشکاری FSW آلیاژ آلومینیوم-منیزیم AA۵۰۵۸ به ورقه‌های پلیمر پلی متیل متاکریلات (Polymethyl methacrylate) (PMMA) انجام دادند، تأثیر زاویه‌ی شیب ابزار را بر روی کیفیت سطح جوش بررسی نمودند. آنها دریافتند که در زوایای پایین‌تر، شکل جوش غیرمشابه ناپیوسته به نظر می‌رسد به دلیل اینکه جریان مواد از لبه‌ی جلویی به پشتی متوقف می‌شود، در حالی که با افزایش زاویه‌ی شیب ابزار، ظاهر سطح جوش‌های غیرمشابه همگن‌تر شده و همچنین از مقادیر بالاتری از تکه‌های آلومینیوم از آلیاژ پایه آلومینیوم جدا شده و به منطقه‌ی جوش افزوده می‌شود [14]. در پژوهشی دیگر نیز که توسط حامد آقاجانی و عبدالرضا سیمچی بر روی اتصال T شکل پلی متیل متاکریلات و آلیاژ

در زمینه‌ی پلیمری جهت دستیابی به اتصالی با ظاهر و خواص مناسب میان آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ و کامپوزیت زمینه پلیمری بهینه گردیده و سپس امکان برقراری اتصال بین آلومینوم و پلیمر با استفاده از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بررسی شده‌است. همچنین هدایت حرارتی و الکتریکی پلی اتیلن تقویت شده با مواد کربنی برای مطالعه‌ی تأثیر زنجیره‌های ذرات هدایت کننده در هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها اندازه‌گیری شدند. با افزایش مقدار کربن، زنجیره‌های هدایت کننده افزایش یافته و در نتیجه مقدار هدایت حرارتی افزایش می‌یابد.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق جهت اتصال فلز-پلیمر، ورقه‌های آلومینوم آلیاژی ۵۰۸۳ با ابعاد $10\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ و به ضخامت ۲ میلی‌متر به عنوان بخش فلزی استفاده شد. ترکیب شیمیایی آلومینوم آلیاژی در جدول (۱) آمده است. همچنین برای بخش پلیمری، ورقه‌های پلی اتیلن خالص با دانسیته‌ی بالا و کامپوزیت‌های زمینه پلی اتیلن تقویت شده با دوده (پودر کربن سیاه) N-220 و با ابعاد $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ و ضخامت ۲ میلی‌متر، با استفاده از دستگاه پرس گرم ساخته شدند.

به منظور ساخت کامپوزیت تقویت شده با ۲/۵٪ وزنی کربن بلک و کامپوزیت تقویت شده با ۵٪ وزنی کربن بلک در ابتدا مقداری پودر پلی اتیلن سنگین و کربن بلک با استفاده از دستگاه آسیاب گلوله‌ای با سرعت 3000 rpm به مدت ۱۵ دقیقه با یکدیگر مخلوط شده و پس از آن توسط دستگاه پرس گرم ۵۰ تن هیدرولیک مدل sph 500، تحت فشار ۴۵ تن و دمای ۱۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تهیه شدند. طرح‌واره‌ای از مراحل انجام شده در این تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده‌است.

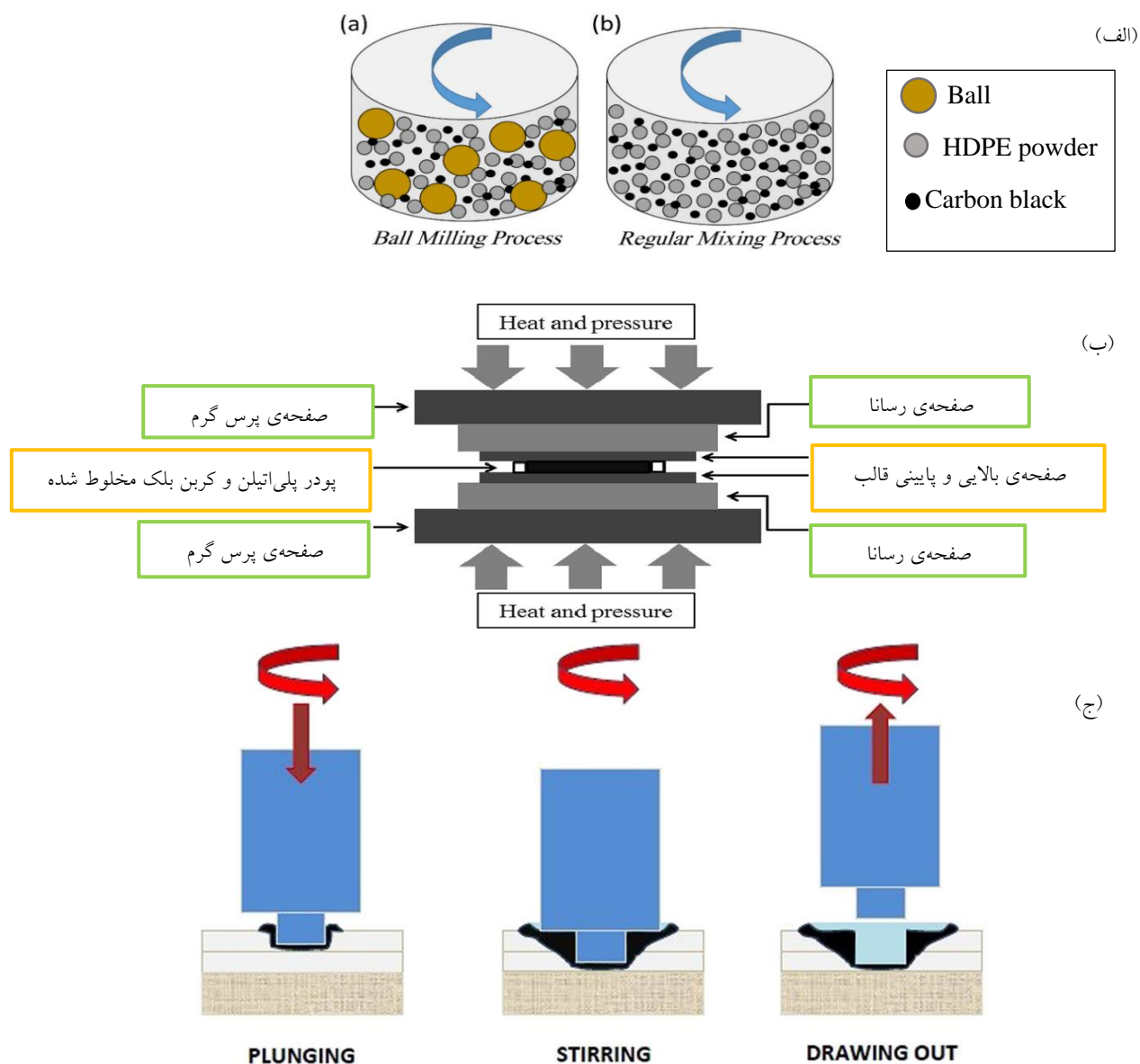
آلومینوم AA۵۷۵۴ با استفاده از جوشکاری FSW انجام گرفته- است و پارامترهای جوشکاری را مورد بررسی قرار دادند، مشخص شد که با افزایش زاویه‌ی شیب، دمای پیک نیز افزایش می‌یابد اما ناحیه‌ی SZ کاهش یافته و HAZ بزرگ‌تری تشکیل می‌شود. همچنین در سرعت‌های چرخش پایین و سرعت حرکت ابزار بالا به دلیل گرمای ورودی پایین‌تر ایجاد شده ناحیه‌ی SZ کاهش می‌یابد. آن‌ها دریافتند که عمق فروروی ابزار نیز بر روی نواحی SZ و HAZ تأثیرگذار است به گونه‌ای که با افزایش عمق فروروی منطقه‌ی SZ کاهش یافته و منطقه‌ی HAZ افزایش می‌یابد [20].

آمانسیو-فیلو و همکارانش قابلیت اتصال نقطه‌ای اصطکاکی پلی فنیلن سولفید تقویت شده با فیبر منیزیم AZ31-O / شیشه و فیبر کربن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد اتصال اصطکاکی نقطه‌ای، اتصالات هیبریدی کامپوزیت PPS-Mg AZ31 قوی ایجاد می‌کند. استحکام اتصال به دست آمده برابر با ۲۸ مگاپاسکال می‌باشد [21]. لیو و همکارانش از جوشکاری اصطکاکی لبه‌ای (FLW) (Friction lap joining) برای اتصال MC NYLON6 به صفحات AA۶۰۶۱ استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که پارامترهای جوشکاری تأثیر بسیار زیادی بر استحکام برشی اتصال (۵-۸ MPa) دارد [3].

موضوع مهمی که در این پژوهش به آن پرداخته شده است رفع مشکلات اتصال‌دهی نامتجانس (Heterogeneous) قطعاتی است که دارای خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتی نسبت به یکدیگر می‌باشند مانند اتصال فلزی به قطعات پلیمری یا کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با مواد کربنی. به همین منظور پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای از جمله عمق فروروی (Plunging depth)، نرخ فروروی (Plunging rate)، زمان ماندگاری (Dwell time) ابزار داخل قطعه کار، سرعت چرخش ابزار و همچنین درصد ذرات کربنی

جدول ۱ مشخصات ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینوم ۵۰۸۳

عنصر	Si	Mg	Cu	Mn	Zn	Ti	Cr
درصد	۰/۴	۰/۴-۴/۹	۰/۱	۰/۱-۴	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۰۵-۰/۲۵

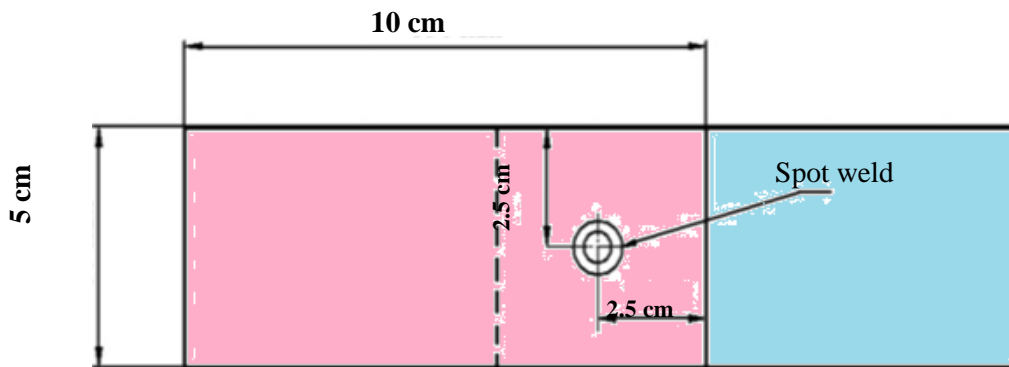
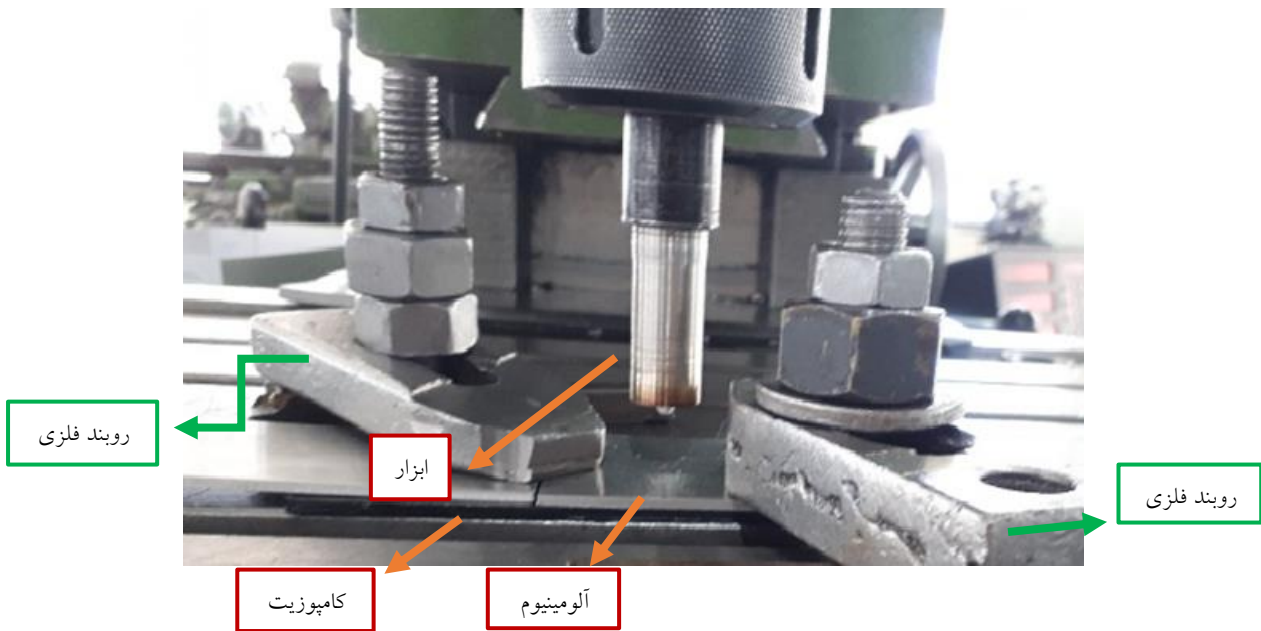


شکل ۱ شماتیک مراحل انجام شده در این تحقیق. الف) فرایند بال میل جهت اختلاط پودرها، ب) ساخت نمونه‌های کامپوزیتی زمینه پلیمری با استفاده از دستگاه پرس گرم و ج) جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای آلومینیوم آلیاژی به کامپوزیت زمینه پلیمری

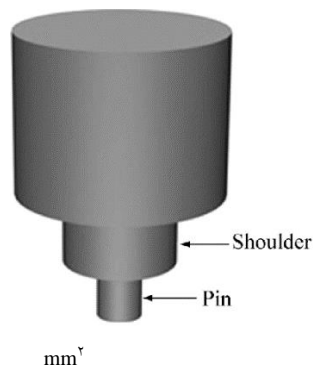
متصل شدند. شکل (۲) نحوه‌ی قرار گرفتن نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای شامل ابزاری است که می‌تواند حرکات چرخشی و محوری (بالا و پایین) داشته باشد. ابزار مورد استفاده در این پژوهش شامل یک پین با قطرهای ۲ میلی‌متر و ۴ میلی‌متر و ارتفاع ۳/۲ میلی‌متر می‌باشد که در شکل (۳) نمایش داده شده است.

پس از ساخت نمونه‌ها یک قطعه کامپوزیت و یا پلیمری و یک قطعه آلومینیوم روی یکدیگر قرار گرفته به گونه‌ای که فلز آلومینیوم در قسمت فوقانی و کامپوزیت زمینه پلیمری در قسمت تحتانی قرار گرفته باشد و با استفاده از دستگاه فرز اونیورسال FP4MH ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز با سرعت چرخش ۲۵۰۰rpm، عمق فروری ۳/۲ میلی‌متر و نرخ فروری mm/min ۴۰ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای که از این پس به جهت رعایت اختصار FSSW نامیده می‌شود؛ به یکدیگر



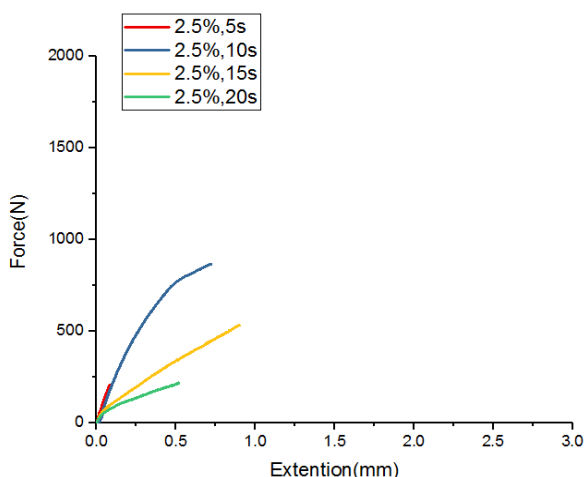
شکل ۲ اتصال لبه روی هم قطعات آلومینیومی و کامپوزیتی در دستگاه جوش FSSW



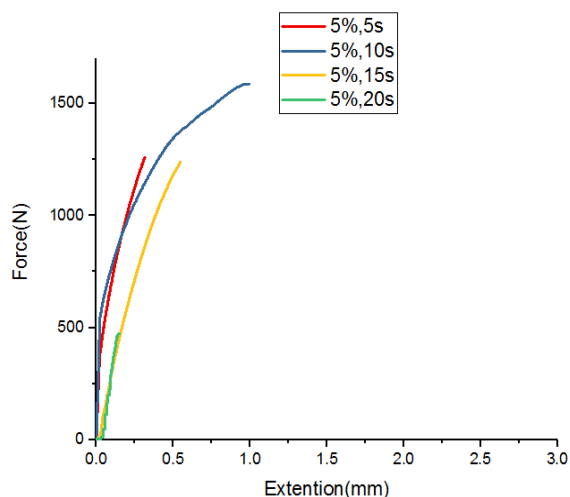
شکل ۳ ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای به همراه معرفی اجزا

شد. پارامترهای متغیر در این پژوهش که شامل مدت زمان ماندگاری ابزار و درصد وزنی فاز تقویت کننده‌ی کربن بلک می- باشند در جدول (۲) آمده است. جهت کاهش خطای آزمایش، جوشکاری نمونه‌ها با سه بار تکرار انجام شد. میزان استحکام کششی برشی نمونه‌ها با آزمون کشش برشی بر روی نمونه در

مهمترین قسمت انجام جوشکاری تعیین پارامترهای فرایند است. به منظور تعیین مطلوب‌ترین شرایط برای انجام جوشکاری، سرعت چرخش ابزار، عمق فروری و نرخ فروری را ثابت و به ترتیب برابر با 2500 rpm ، $3/2 \text{ mm}$ و 40 mm/min در نظر گرفته و تنها مدت زمان ماندگاری ابزار داخل قطعه کار متغیر فرض



(ب)



(ج)

شکل ۴ تغییرات نیرو-ازدیاد طول برای (الف) پلی اتیلن خالص، (ب) کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با ۲/۵ درصد وزنی کربن بلک، (ج) کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با ۵ درصد وزنی کربن بلک در زمان‌های ماندگاری ۵s، ۱۰s، ۱۵s و ۲۰s

با توجه به شکل (۴-الف) و داده‌های جدول (۳)، با افزایش زمان ماندگاری تا ۱۵ ثانیه، به دلیل افزایش دمای موضعی در منطقه جوش، پلی اتیلن افزایش دمای بیشتری داشته‌است. در اثر این افزایش دما، دمای پلی اتیلن به دمای ذوب رسیده و پلی اتیلن از حالت خمیری در زمان‌های ماندگاری پایین به حالت ذوب شده در زمان ماندگاری ۱۵ ثانیه می‌رسد که این امر سبب افزایش سطح در تماس دو فاز و افزایش استحکام اتصال می‌گردد. همچنین در مدت زمان بیشتر از ۱۵ ثانیه به دلیل افزایش بیش از حد مذاب پلی اتیلن و آزاد شدن تنش‌های پسماند در طی فرایند

دمای اتاق و با سرعت ۲ mm/min با استفاده از دستگاه یونیورسال (Universal) ساخت شرکت سنتام طبق استاندارد DIN EN ISO 14273 انجام گرفت.

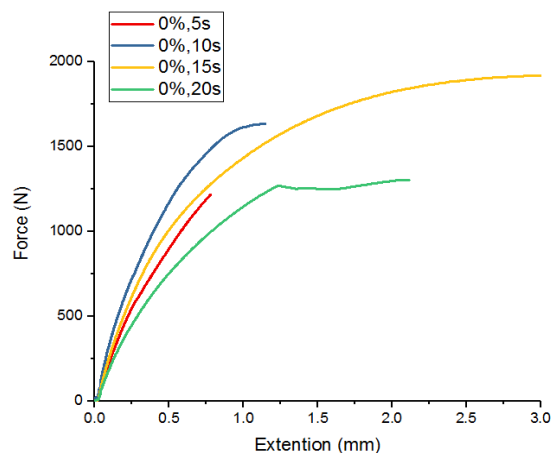
جدول ۲ جدول متغیرهای فرایند برای کامپوزیت تقویت شده با کربن بلک

درصد وزنی کربن بلک	۰٪	۲/۵٪	۵٪
مدت زمان ماندگاری	۱۵s، ۱۰s، ۵s و ۲۰s	۱۵s، ۱۰s، ۵ و ۲۰s	۱۵s، ۱۰s، ۵ و ۲۰s

برای بررسی میکروسکوپی نمونه‌ی کامپوزیتی تقویت شده با ۵ درصد وزنی کربن بلک در مدت زمان ماندگاری ۱۰ ثانیه از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) (Scanning Electron Microscope) مدل LEO 1450VP استفاده شد. به همین منظور نمونه‌ها با استفاده از واترجت از مقطع عرضی اتصال در نقطه‌ی جوش برش زده شدند. همچنین جهت بررسی میکروسکوپی نمونه‌ی پلی اتیلن خالص از دستگاه میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی (FESEM) (Field Emission Scanning Electron Microscope) مدل LMU TESCAN BRNO-Mira3 استفاده شد. قبل از تصویربرداری از نمونه‌ها، ابتدا آن‌ها با استفاده از واترجت با اندازه‌های ۱cm×۱cm برش عرضی زده شده و سپس برای ایجاد پوشش رسانا از پوشش دهی با طلا استفاده شد.

نتایج و بحث

منحنی‌های نیرو-تغییر طول پلی اتیلن خالص و نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با ۲/۵٪ و ۵٪ وزنی کربن بلک در مدت زمان‌های ماندگاری مختلف در شکل (۴) آمده است.



(الف)

مطلوب فراهم نشده است. در نتیجه نیروی لازم جهت شکست اتصال مقدار کمی است. اما با افزایش زمان تا ۱۰ ثانیه افزایش سطح نیروی قابل تحمل توسط اتصال مشاهده شده و در نتیجه استحکام افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده غلبه‌ی عامل رسانایی حرارتی بر ویسکوزیته می‌باشد.

منحنی های نیرو - جابه‌جایی نمونه کامپوزیتی پلی اتیلن تقویت شده با ۵ درصد وزنی کربن بلک در شکل (۴-ج) آمده است افزایش کربن بلک در زمینه‌ی پلی اتیلن سبب افزایش ویسکوزیته‌ی زمینه (اثر منفی حضور کربن بلک) و همچنین سبب افزایش هدایت حرارتی پلی اتیلن (اثر مثبت حضور کربن بلک) در ایجاد اتصالی با خواص مکانیکی مطلوب شده است. در نتیجه افزایش هدایت حرارتی زمینه‌ی پلی اتیلن به واسطه‌ی افزایش فاز تقویت کننده‌ی کربن بلک در زمان‌های ماندگاری ثابت سبب حس دمای بالاتر نسبت به پلی اتیلن خالص و کامپوزیت تقویت شده با درصد کمتر کربن بلک می‌گردد.

انجماد، روند نزولی استحکام اتصال مشاهده می‌شود. در شکل (۴-ب) منحنی تغییرات نیرو بر حسب جابه‌جایی کامپوزیت زمینه پلی اتیلن تقویت شده با ۲/۵ درصد وزنی کربن بلک در مدت زمان‌های ماندگاری مختلف آمده است با توجه به شکل با افزودن کربن بلک به زمینه پلی اتیلن، قابلیت تغییر شکل و سیالیت در دماهای بالا در نمونه کامپوزیتی در قیاس با پلیمر خالص روند نزولی خواهد داشت. در نتیجه تر شدگی سطح آلومینیوم با حضور کربن بلک به سبب افزایش ویسکوزیته ساختار کامپوزیتی کاهش و بدین ترتیب استحکام برشی فصل مشترک نسبت به پلی اتیلن خالص کاهش یافته است. هر چند که افزودن کربن بلک سبب افزایش رسانش حرارتی ساختار کامپوزیتی نسبت به زمینه پلی اتیلن خالص شده است اما افزایش ویسکوزیته اثر مثبت رسانش حرارتی را خنثی نموده و روند کاهش استحکام مشاهده می‌شود. با توجه به نمودار نیرو جابه‌جایی در بازه زمانی ۵ ثانیه زمان کافی جهت ایجاد اتصال

جدول ۳ نتایج به دست آمده از آزمون کشش برشی سطح مقطع اتصال نمونه‌های پلی اتیلن خالص در مدت زمان‌های ماندگاری ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه

نمونه‌ها	نیروی بیشینه (N)	سطح مقطع (mm ²)	نیروی متوسط (N)	تنش متوسط (Mpa)	سطح مقطع متوسط (mm ²)
%.۰, ۵s	۱۲۱۷	۱۹۲۸	۱۱۵۴/۳	۰/۶۱	۱۸۹۶/۷
	۱۰۷۷	۱۸۹۵			
	۱۱۶۹	۱۸۶۷			
%.۰, ۱۰s	۱۵۱۰	۲۰۰۱	۱۵۰۵/۳	۰/۷۵	۱۹۹۸/۳
	۱۳۷۱	۲۰۲۸			
	۱۶۳۵	۱۹۶۶			
%.۰, ۱۵s	۱۷۸۳	۱۸۱۷	۱۷۸۵/۷	۰/۸۶	۲۱۰۸/۳
	۱۹۲۸	۲۰۱۶			
	۱۶۴۶	۲۴۹۲			
%.۰, ۲۰s	۱۳۲۰	۱۹۷۵	۱۴۹۱/۷	۰/۶۷	۲۲۱۴/۷
	۱۳۰۵	۲۱۴۳			
	۱۸۵۰	۲۵۲۶			

مدت زمان ماندگاری از ۵ ثانیه تا ۱۰ ثانیه، دمای بالاتری است که ساختار کامپوزیتی در اثر حضور کربن بلک و به دلیل افزایش رسانایی حرارتی زمینه، در زمان‌های ماندگاری بالا داشته که سبب غلبه‌ی رسانایی حرارتی کامپوزیت بر ویسکوزیته‌ی آن شده و همین امر سبب افزایش سطح ترشده‌ی آلومینیوم توسط کامپوزیت و ذوب شدگی و تغییر شکل شدید کامپوزیت در حین جوشکاری می‌گردد. امادر مدت زمان‌های ماندگاری بالاتر از ۱۰ ثانیه مجدداً به دلیل ذوب بیش از حد کامپوزیت استحکام اتصال کاهش می‌یابد.

با توجه به داده‌های جدول (۴) سطح مقطع متوسط اتصال در نمونه کامپوزیتی با افزایش درصد کربن بلک روند نزولی دارد. این بدان معنی است که ویسکوزیته نمونه تأثیر بیشتری بر روی سیالیت پلی اتیلن ذوب شده نسبت به رسانش حرارتی ساختار کامپوزیتی دارد. در نتیجه استحکام اتصال در تمامی زمان‌های ماندگاری فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با افزایش درصد کربن بلک به سبب سطح مقطع کمتر افزایش یافته است. علاوه بر این در بازه‌ی زمانی ۵ تا ۱۰ ثانیه روند افزایشی استحکام اتصال مشاهده می‌شود و پس از آن کاهش استحکام اتصال در زمان‌های طولانی‌تر دیده می‌شود. علت افزایش استحکام اتصال با افزایش

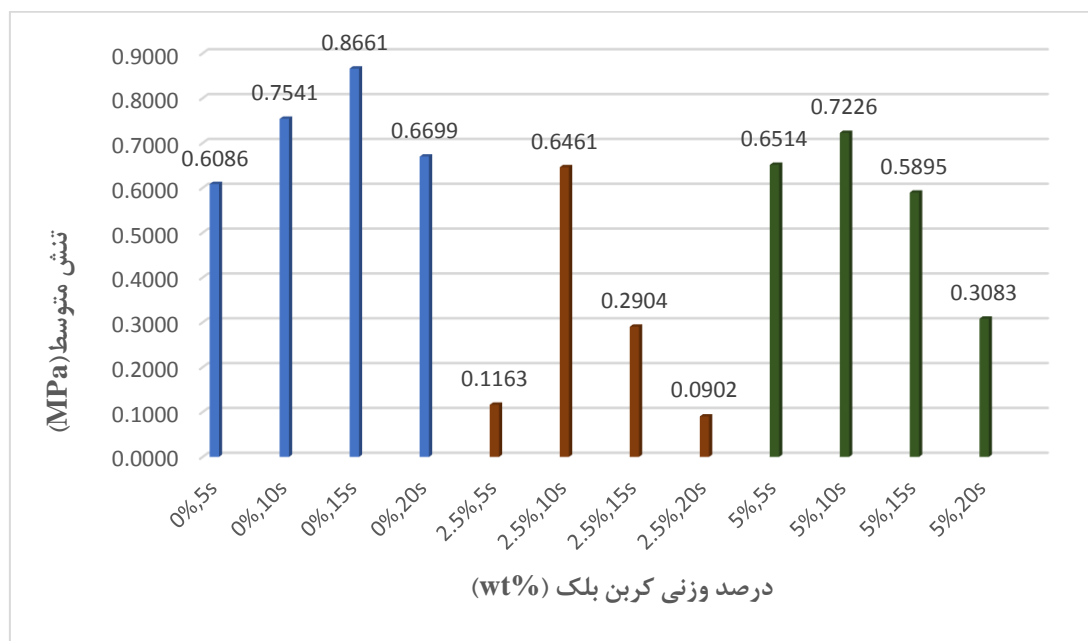
جدول ۴ نتایج به دست آمده از آزمون کشش برشی و سطح مقطع اتصال نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با ۵ و ۲/۵ درصد وزنی کربن بلک در مدت زمان‌های ماندگاری ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه

نمونه‌ها	نیروی بیشینه (N)	سطح مقطع (mm ²)	نیروی متوسط (N)	تنش متوسط (Mpa)	سطح مقطع متوسط (mm ²)
% ۲/۵ , ۵s	۲۴۷	۲۰۰۷	۲۳۲/۵	۰/۱۱۶	۱۹۹۸/۵
	۲۱۸	۱۹۹۰			
% ۲/۵ , ۱۰s	۱۲۶۰	۲۲۰۵	۱۴۰۰/۵	۰/۶۵	۲۱۷۱/۵
	۱۵۴۱	۲۱۳۸			
% ۲/۵ , ۱۵s	۵۳۱	۲۱۱۴	۶۶۱	۰/۲۹	۲۲۷۴
	۵۸۲	۲۴۱۰			
	۸۷۰	۲۲۹۸			
% ۲/۵ , ۲۰s	۲۱۸	۲۴۶۲	۲۱۹/۷	۰/۰۹	۲۴۳۳/۷
	۲۰۹	۲۳۳۸			
	۲۳۲	۲۵۰۱			
% ۵ , ۵s	۹۷۴	۱۸۲۵	۱۱۶/۵	۰/۶۵	۱۷۳۱
	۱۲۵۹	۱۶۳۷			
% ۵ , ۱۰s	۱۱۸۲	۲۰۲۶	۱۴۶۳	۰/۷۲	۲۰۲۶/۳
	۱۵۸۸	۱۹۴۵			
	۱۶۱۹	۲۱۰۸			
% ۵ , ۱۵s	۱۳۱۶	۲۲۳۲	۱۲۷۷	۰/۵۹	۲۱۶۶
	۱۲۳۸	۲۱۰۰			
% ۵ , ۲۰s	۴۸۳	۲۳۷۴	۷۱۹/۳	۰/۳۱	۲۳۰۸
	۴۷۲	۴۷۲			
	۱۲۰۳	۱۲۰۳			

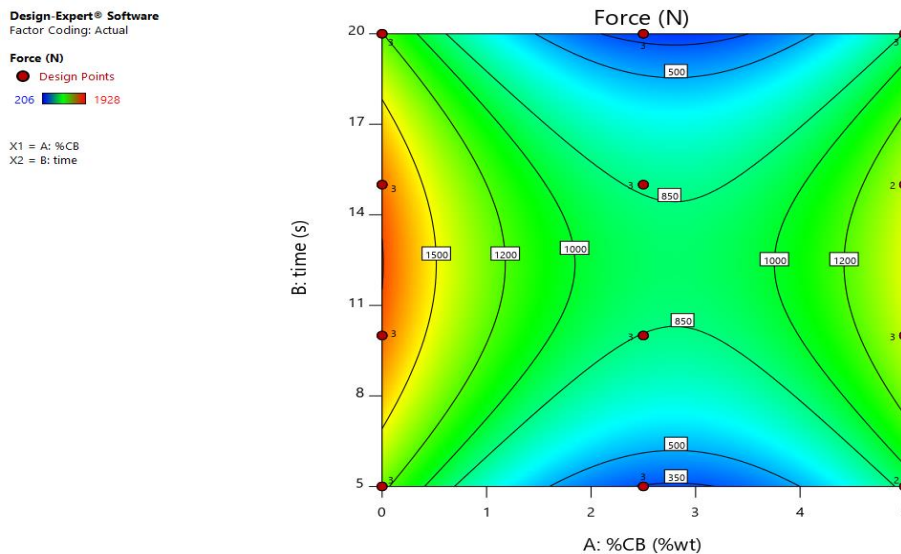
بیشترین میزان استحکام را داراست و سپس با افزایش زمان ماندگاری از ۱۵ تا ۲۰ ثانیه به دلیل کاهش استحکام مجدد رنگ منحنی از قرمز به سبز تغییر می‌یابد. برای نمونه‌های تقویت شده با ۲/۵٪ و ۵٪ کربن بلک در زمان ۱۰ ثانیه که این نمونه‌ها بیشترین مقدار استحکام را دارند، رنگ منحنی سبز بوده و با افزایش زمان ماندگاری و در نتیجه کاهش استحکام رنگ منحنی به آبی که نشان دهنده کمترین میزان نیرو است، تغییر می‌یابد. تصاویر به دست آمده از مقطع عرضی اتصال نمونه‌ی کامپوزیتی تقویت شده با ۵ درصد وزنی کربن بلک در نقطه‌ی جوش با استفاده از میکرو سکوپ الکترونی روبشی (SEM) در شکل (۷) مشاهده می‌شود، این شکل یک فصل مشترک چسبنده بین آلومینیوم و کامپوزیت را نشان می‌دهد. شکل (۸) نیز تصویر به دست آمده از مقطع عرضی اتصال نمونه‌ی پلی اتیلن خالص را با استفاده از میکرو سکوپ الکترونی نشر میدانی (FESEM) خالص نشان می‌دهد. در این تصاویر ناهمواری‌های ایجاد شده در فصل مشترک بین آلومینیوم و کامپوزیت یا پلی اتیلن خالص نشان دهنده‌ی ایجاد قفل‌شوندگی مکانیکی بین نمونه‌ها و در نتیجه ایجاد یک فصل مشترک چسبنده (اتصال مطلوب) می‌باشد.

به منظور مقایسه‌ی بهتر نتایج حاصل از آزمون کشش، نمودار میله‌ای مقایسه تنش متوسط برای پلی اتیلن و کامپوزیت-های آن در زمان‌های ماندگاری مختلف در شکل (۵) رسم شده است. با توجه به شکل در نمونه پلی اتیلن خالص مدت زمان ماندگاری ۱۵ ثانیه جهت ایجاد اتصال مناسب مورد نیاز است و در ساختارهای کامپوزیتی مدت زمان ۱۰ ثانیه جهت نیل به بیشینه استحکام کافی است. نمونه‌ی کامپوزیتی شامل ۲/۵ درصد وزنی به سبب هدایت حرارتی کمتر کمینه استحکام اتصال و سطح در تماس با آلومینیوم را داراست. لازم به ذکر است که استحکام و پایداری حرارتی مطلوب‌تر ساختار کامپوزیتی در حضور کربن بلک نسبت به پلی اتیلن مشاهده شده است [4]

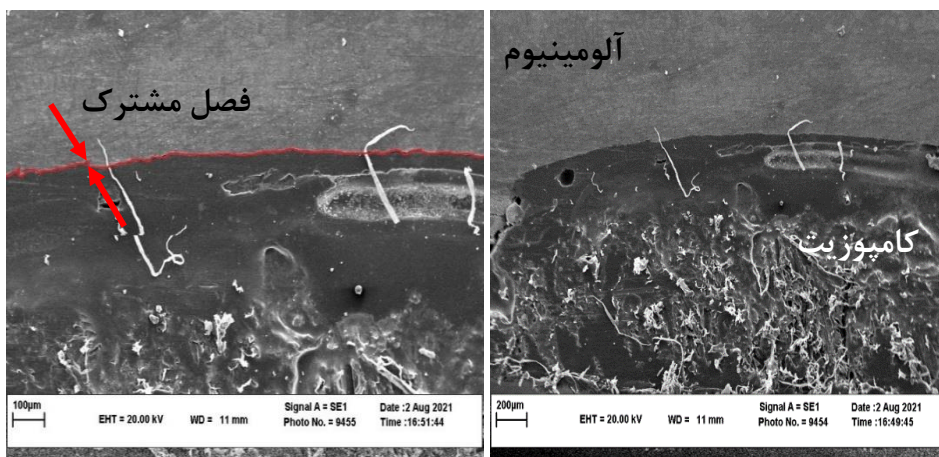
پس از انجام آزمایش، با استفاده از نرم‌افزار آماری Design expert طبق منحنی به دست آمده در شکل (۶) که به آن منحنی contour گفته می‌شود، از صحت نتایج به دست آمده از آزمون کششی برشی اطمینان حاصل شد. در این منحنی با حرکت از رنگ آبی به رنگ قرمز میزان نیروی به دست آمده در درصد‌های وزنی مختلف کربن بلک، در زمان‌های ماندگاری متفاوت افزایش می‌یابد. به همین ترتیب برای نمونه‌ی پلی اتیلن خالص از زمان ماندگاری ۱۰ تا ۱۵ ثانیه رنگ زمینه از سبز به قرمز تغییر می‌یابد، زیرا که پلی اتیلن خالص در زمان ماندگاری ۱۵ ثانیه



شکل ۵ نمودار میله‌ای استحکام متوسط پلی اتیلن خالص و کامپوزیت‌های آن در زمان‌های ماندگاری مختلف



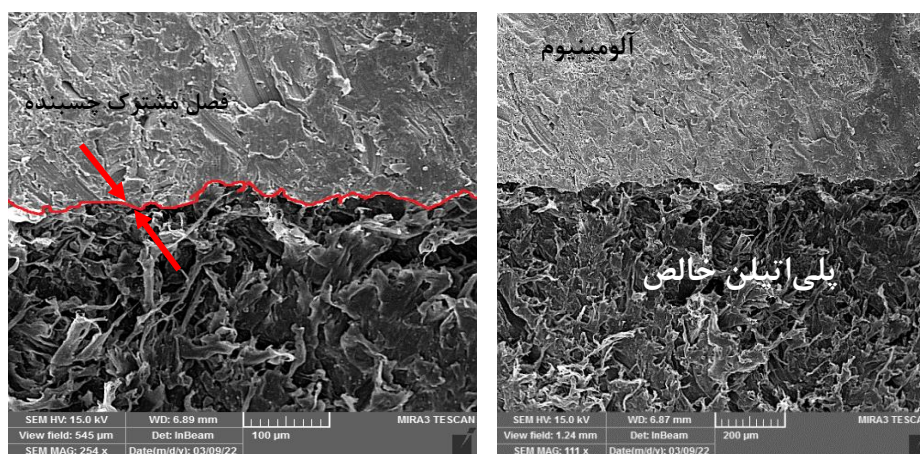
شکل ۶ نمودار contour حاصل از نتایج پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار Design expert برای کامپوزیت تقویت شده با کربن بلک



(ب)

(الف)

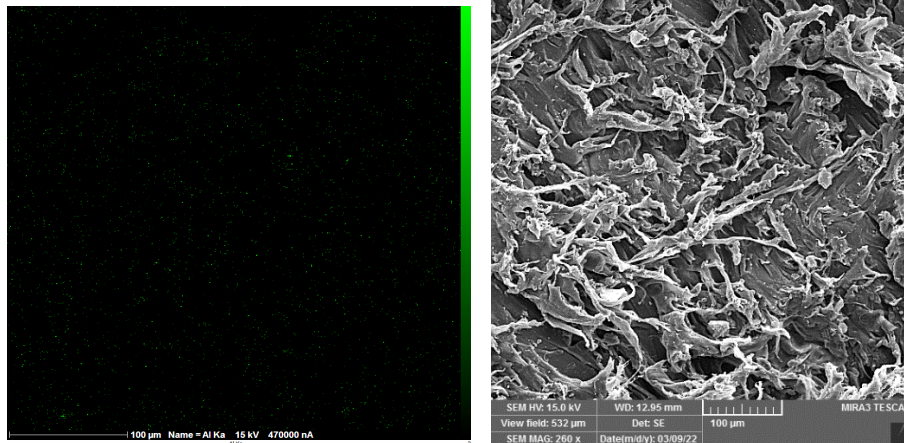
شکل ۷ تصویر SEM از فصل مشترک ما بین آلومینیوم و کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با ۵ درصد وزنی کربن بلک در مدت زمان ۱۰s در بزرگنمایی‌های (الف) ۱۰۰x و (ب) ۲۰۰x



(ب)

(الف)

شکل ۸ تصویر FESEM از فصل مشترک ما بین آلومینیوم و پلی اتیلن خالص در مدت زمان ماندگاری ۱۵s و در بزرگنمایی‌های (الف) ۱۰۰x و (ب) ۲۵۰x



(ب)

(الف)

شکل ۹ آنالیز عنصری نمونه‌ی پلی اتیلن خالص در منطقه‌ی اغتشاش

در نظر گرفته شد. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که با افزایش زمان ماندگاری ابزار و افزایش دما در منطقه اتصال در نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با ۲/۵ و ۵ درصد وزنی کربن بلک که رسانایی حرارتی بالاتری نسبت به پلی اتیلن خالص دارند در بازه‌ی زمانی ۵ تا ۱۰ ثانیه روند افزایشی استحکام اتصال مشاهده می‌شود، در حالی که این مشاهدات را برای پلی اتیلن در زمان‌های بیشتر از ۱۵ ثانیه می‌توان دید. نتایج به دست آمده در این مطالعه با نتایج حاصل شده از تحلیل‌های آماری کاملاً مطابقت دارد.

۲. تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی نشان‌دهنده‌ی ایجاد فصل مشترک مطلوب بین آلومینیوم و پلی اتیلن خالص و همچنین آلومینیوم و کامپوزیت زمینه پلی اتیلن تقویت شده با کربن بلک می‌باشد.

همچنین از نمونه‌ی پلی اتیلن خالص اتصال یافته به آلومینیوم آنالیز عنصری تهیه گردید که در شکل (۹) آورده شده است. طبق شکل ذرات آلومینیوم در ناحیه‌ی اغتشاش در زمینه‌ی پلی اتیلنی مشاهده می‌شوند. به عبارتی در اثر اغتشاش بین ابزار در داخل قطعه و با سرعت بالا تکه‌های آلومینیوم جدا شده از فلز آلومینیوم در منطقه‌ی اغتشاش وارد زمینه‌ی پلیمری شده که این ذرات آلومینیوم باعث تقویت زمینه‌ی پلی اتیلنی می‌گردند.

نتیجه‌گیری

۱. در این تحقیق به بررسی حضور کربن بلک بعنوان فاز تقویت کننده در زمینه پلی اتیلن در ایجاد اتصال مطلوب به آلومینیوم به روش جو شکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای پرداخته شد. به این منظور دو پارامتر درصد وزنی کربن بلک و مدت زمان ماندگاری ابزار در قطعه کار بعنوان متغیرهای فرایند

مراجع

1. Moshwan, R., Rahmat, S., Yusof, F., Hassan, M., Hamdi, M. and Fadzil, M., "Dissimilar friction stir welding between polycarbonate and AA 7075 aluminum alloy", *Materials Research*, Vol.106, No. 3, pp. 258-266, (2015).
2. Khodabakhshi, F., Haghshenas, M., Sahraeinejad, S., Chen, J., Shalchi, B., Li, J., "Microstructure-property characterization of a friction-stir welded joint between AA5059 aluminum alloy and high-density polyethylene", *Materials Characterization*, Vol. 98, pp.73-82, (2014).
3. Liu, F.C., Liao, J. and Nakata, K., "Joining of metal to plastic using friction lap welding", *Materials and Design*, Vol. 54, pp. 236-244, (2014).
4. Formela, K., Kuranska, M. and Barczewski, M., "Recent Advances in Development of Waste-Based Polymer Materials", *Polymers*, Vol. 14, No. 5, p.1050, (2022).

5. Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M. and Elhafi, A., "Polymer composite materials: A comprehensive review", *Composite Structures*, Vol. 262, p. 113640, (2021).
6. Arefin, A. M. E., Khatri, N. R., Kulkarni, N. and Egan, P. F., "Polymer 3D Printing Review: Materials, Process, and Design Strategies for Medical Applications", *Polymers*, Vol. 13, No. 9, p. 1499, (2021).
7. Formela, K., Zedler, L., Hejna, A. and Tercjak, A., "Reactive extrusion of bio-based polymer blends and composites – Current trends and future developments", *Express Polymer Letters*, Vol. 12, No.1, pp. 24-57, (2018).
8. Wong, K. and Abbas Jawad, Z., "A review and future prospect of polymer blend mixed matrix membrane for CO₂ separation", *Polymer Research*, Vol. 26, No. 12, pp. 1-18, (2019).
9. Roy, K., Debnath, S. C. and potiyaraj, P., "A Review on Recent Trends and Future Prospects of Lignin Based Green Rubber Composites", *Polymers and the Environment*, Vol.28, No. 2, pp. 367-387, (2020).
10. Karami Pabandi, H., Movahedi, H., Kokabi, A. H., "A New Refill Friction Spot Welding Process for Aluminum/Polymer Composite Hybrid Structures", *Composites Structures*, Vol. 174, pp. 59-69, (2017).
11. Yousefpour, A., Hojjati, M. and Immarigeon, J. P., "Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites", *Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 17, No. 4, pp. 303-341, (2004).
12. Mishra, R. S. and Ma, Z. Y., "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering*, Vol. 50, No. 1-2, pp. 1-78, (2005).
13. Yang, X. W., Fu, T. and Li, W. Y., "Friction Stir Spot Welding: A Review on Joint Macro and Microstructure, Property, and Process Modelling", *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2014, p. 11, (2014).
14. Aghajani Derazkola, H., Kashiry Fard, R. and Khodabakhshi, F., "Effects of processing parameters on the characteristics of dissimilar friction-stir-welded joints between AA5058 aluminum alloy and PMMA polymer", *welding in world*, Vol. 62, No. 1, pp. 117-130, (2018).
15. Kemal Bilici, M. and Irfan Yukler, A., "Effects of welding parameters on friction stir spot welding of high density polyethylene sheets", *Materials & Design*, Vol. 33, pp. 545-550, (2012).
16. Ratanathavorn, W. and Melander, A., "Dissimilar joining between aluminium alloy (AA 6111) and thermoplastics using friction stir welding", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 20, pp. 222-228, (2015).
17. Shahmiri, H., Movahedi, M. and Kokabi, A.M., "Friction stir lap joining o aluminum alloy to polypropylene sheets", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 22, No. 2, pp. 20-126, (2017).
18. Lionetto, F., Balle, F., Maffezzoli, A., "Hybrid ultrasonic spot welding of aluminum to carbon fiber reinforced epoxy composites", *Materials Processing Technology*, Vol. 247, pp. 289-295, (2017).
19. Ogawa, Y., Xiong, Y., Akebono, H., Kato, M., Tanaka, K. and Sugeta, A., "Fatigue properties of friction stir welds of treated Al to carbon fibre- reinforced Plastic", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 23, No. 1, pp. 79-86, (2018).
20. Aghajani Derazkola, H., and Simchi, A. R., "An investigation on the dissimilar friction stir welding of T-joints between AA5754 aluminum alloy and poly(methyl methacrylate)", *Thin-Walled structures*, Vol. 135, pp. 376-384, (2019).
21. Amancio-Filho, S. T., Bueno, C., Santos, J. F., Huber, N. and Hage Jr, E., "On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures", *Materials Science and Engineering*, Vol. 528, No. 10-11, pp. 3841-3848, (2011).