

آیا نانولوله کربنی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای پلی اتیلن/آلومینیوم تأثیرگذار است؟

تکنم کیان افشار

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی گرایش شناسایی و انتخاب مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

محسن حداد سبزواری

استاد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

سمانه صاحبیان سقی

استادیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

توجه روزافزون بسیاری از محققان به استفاده از نانولوله های کربنی به سبب خواص عالی رسانایی الکتریکی، حرارتی و استحکامی آن‌ها در سال‌های اخیر در کاربری‌های متنوع به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافته است. در دهه اخیر مبحث اتصال دهی فاز پلیمری و کامپوزیت‌های پلیمری به ورق‌های آلومینیوم بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از این رو این پژوهش با هدف بررسی استحکام اتصال آلومینیوم آلیاژی ۵۰۸۳ به نانوکامپوزیت زمینه پلی اتیلن تقویت شده با نانولوله‌های کربنی به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای انجام شده است. نتایج آزمون کشش برشی بر روی نمونه‌های جوشکاری شده پلی اتیلنی و نانوکامپوزیتی با آلومینیوم نشان داد که زمان ماندگاری مطلوب جهت ایجاد اتصال مناسب در نانوکامپوزیت ۵ ثانیه بوده و با افزایش مدت زمان ماندگاری تا ۱۰ ثانیه به دلیل افزایش بیش از حد مذاب پلی اتیلن استحکام روند نزولی در پیش می‌گیرد. همچنین طبق نتایج به دست آمده دریافتیم که هدایت حرارتی پلیمرها با افزودن غلظت نسبتاً پایینی از نانولوله‌های کربنی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته، که همین امر سبب افزایش استحکام اتصال آلومینیوم به نانوکامپوزیت می‌گردد.

کلید واژه‌ها: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، پلی اتیلن با دانسیته‌ی بالا، نانولوله‌ی کربنی، تست کشش برشی.

۱- مقدمه

هدایت حرارتی پلیمرها با افزودن پرکننده های رسانا از جمله گرافیت^۱، کربن سیاه، لیاف کربن^۲، نانولوله های کربنی تک جداره^۳ (SWCNT)، نانولوله های کربنی چند جداره^۴ (MWCNT)، افزایش می یابد (Zhidong and Alberto, 2011). به همین دلیل پرکننده های پایه کربن با دارا بودن رسانایی حرارتی مناسب و وزن کم از گزینه های مورد استفاده در کامپوزیت های زمینه پلیمری محسوب می شوند. از میان پرکننده های پایه کربن، نانولوله های کربنی (CNTs) به دلیل خواص فیزیکی برجسته ای مانند مدول یانگ بالا، رسانایی الکتریکی و حرارتی عالی، به طور گسترده در کامپوزیت سازی مورد مطالعه قرار گرفته اند (Manal et al, 2012). نانولوله های کربنی آلوتروپی^۵ از کربن بوده و شامل زنجیره های بلندی از اتم های کربن می باشند که در یک شبکه شش ضلعی قرار گرفته اند و یک ساختار لوله ای شکل را تشکیل می دهند. آن ها بسته به تعداد دیوارها، به صورت تک، دو و یا چند جداره طبقه بندی می شوند. هدایت حرارتی نانولوله های کربنی نیز اساساً ویژگی جالب توجه آن محسوب می شود. قطر و طول دو پارامتری هستند که بر هدایت حرارتی نانولوله های کربنی تأثیر می گذارند (Rodney and Donald, 1995). به طور معمول، نانولوله های کربنی دارای قطر حدود ۲۰-۱۵۰ نانگستروم و طول چند ده میکرون هستند (Alexander e al, 2006).

هدایت حرارتی نانوکامپوزیت های پلیمری/CNT تحت تأثیر عوامل زیادی مانند پراکندگی نانولوله های کربنی، برهم کنش سطحی بین نانولوله های کربنی و زمینه پلیمری و ساختار بلوری زمینه پلیمری می باشد (Hossein et al, 2017). به گفته ی هان و فینا (Zhidong and Alberto, 2011) پراکندگی مناسب نانولوله های کربنی در زمینه پلیمری برای ایجاد یک مسیر رسانای موثر و به حداقل رساندن مقاومت حرارتی در فصل مشترک پلیمر/CNT موثر می باشد. همچنین قطر و طول دو پارامتر هستند که بر هدایت حرارتی نانولوله های کربنی تأثیر می گذارند. همچنین هدایت حرارتی این نانوکامپوزیت های تقویت شده با CNT تحت تأثیر کسر حجمی نانولوله های کربنی نیز قرار می گیرد. یانگ و همکارانش (Shin, 2010). تأثیر مقدار CNT بر هدایت حرارتی نانوکامپوزیت ها را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها بیان کردند که هدایت حرارتی با افزایش مقدار MWCNT افزایش می یابد. همچنین با افزودن مقدار کمی MWCNT هدایت حرارتی را می توان بیش از ۱۰۰ درصد افزایش داد.

کامپوزیت ها و نانوکامپوزیت های پلیمری تقویت شده با انواع مختلف پرکننده های رسانا به دلیل سهولت فرایند پذیری، هزینه ساخت کمتر و خواص رسانایی حرارتی و الکتریکی عالی به عنوان پرکاربردترین مواد عصر حاضر شناخته می شوند. همین امر سبب شده است که توجه بسیاری از محققان به اتصال مواد پلیمری به یکدیگر و یا مواد پلیمری با سایر مواد از جمله فلزات جلب شود. به دلیل تفاوت زیاد خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی پلیمرها و فلزات، روش های اتصال دهی شیمیایی بر پایه ی چسب یا بر پایه ی پیچ و پرچ و همچنین اعمال برخی روش های مرسوم جوشکاری برای اتصال این مواد غیرممکن است. از بین انواع جوشکاری ها، فرایند جوشکاری اصطکاکی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. این نوع جوشکاری نخستین بار در اتصال ترموپلاستیک ها به کار گرفته شد. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) در سال ۱۹۹۱ توسط موسسه جوشکاری انگلیس و با همکاری دانشگاه کمبریج

¹ Graphite

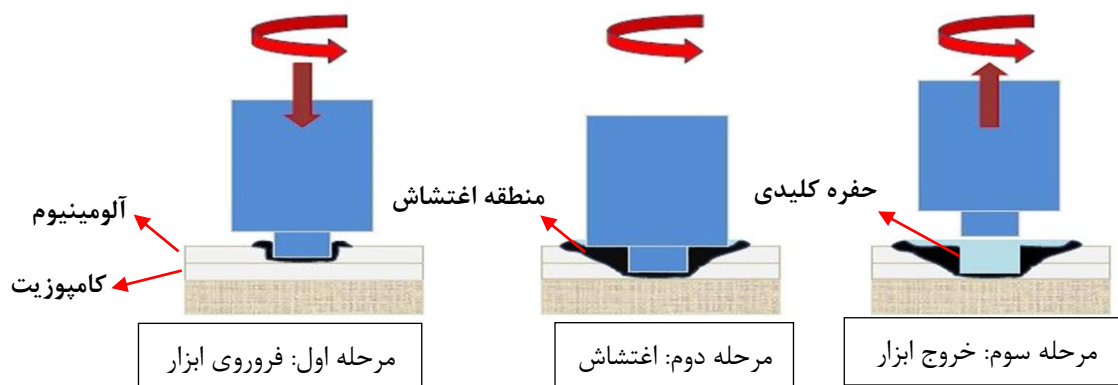
² Carbon fiber

³ Single walled nanotubes

⁴ Multi walled nanotubes

⁵ Allotrope

ابداع شد. در این روش از جوشکاری می توان بین فلزات غیر مشابه فرایند اتصال را انجام داد (Yang et al, 2014). در سال ۲۰۰۴ روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به صورت نقطه ای اجرا شد که روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای (FSSW) نام گرفته است. در فرایند FSSW از یک ابزار متشکل از پین^۶ و شانه^۷ استفاده می شود. در این فرایند ابزار مورد نظر به سطح فلز رسیده و در آن فرو می رود، به علت حرارت ایجاد شده ناشی از اصطکاک بین فلز و ابزار، فلز دچار تغییر شکل پلاستیک می شود. برآمدگی ایجاد شده در فلز، آهسته وارد پلیمر شده و در هم قفل شوندگی مکانیکی^۸ ایجاد می کند. از این جوشکاری در صنایع هوافضا و خورد و سازی استفاده می شود (Mokhtar and Victor, 2010).



شکل ۱. مراحل فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای (Mokhtar and Victor, 2010).

تحقیق حاضر بر روی اتصال مواد پلیمری به مواد فلزی با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای متمرکز است. با این حال، تحقیقات بسیار کمی در مورد اتصال پلیمرهای غیرمشابه و یا اتصال پلیمر و فلز به یکدیگر انجام شده است (Jicheng et al, 2015). به عنوان نمونه دشاتان و همکارانش (saeid et al, 2013) ورق های پلی متیل متاکریلات (PMMA) و آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) را با استفاده از فرایند FSSW به هم متصل نمودند، نتایج نشان داد که FSSW یک روش امکان پذیر برای جوشکاری پلیمرهای متفاوت است و پارامترهای فرایند تأثیر قابل توجهی بر استحکام جوش دارند. جیچنگ گائو و همکارانش [۱۷] بهبود خواص مکانیکی اتصالات غیرمشابه HDPE و ABS از طریق نانولوله های کربنی در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها دریافتند که تولید اتصالات جوش عالی با استفاده از فناوری جوشکاری اصطکاکی و با افزودن نانولوله های کربنی امکان پذیر است. مقدار نانولوله های کربنی نقش مهمی در بهبود استحکام کششی و ریز ساختار اتصال جوش دارد. حداکثر مقدار مقاومت کششی ۱۴/۷ مگاپاسکال است که می تواند به بیش از ۶۵/۳ درصد از استحکام کششی HDPE خالص برسد. هانگ و همکارانش (Yongxian, 2018) اتصال آلیاژ آلومینیوم و پلیمر را با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی لبه ای مورد بررسی قرار دادند. آن ها اعتقاد داشتند که افزایش سرعت جوشکاری منجر به کاهش ناحیه ی چسبندگی و در نتیجه تخریب شدن قفل مکانیکی می گردد. بنابراین طبق نتایج به دست آمده از این پژوهش استحکام اتصال برشی برای ایجاد قفل مکانیکی با کیفیت بالا و ایجاد اتصال مطلوب، با سرعت جوش ۵۰ میلی متر در دقیقه، ۲۰ مگاپاسکال می باشد. آمانسیو-فیلو و همکارانش (Amancio et al, 2011) قابلیت اتصال نقطه ای اصطکاکی پلی فیلن سولفید تقویت شده با فیبر

⁶ Pin

⁷ Shoulder

⁸ Mechanical interlocking

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. لیو و همکارانش (Liu et al, 2014) از FLW برای اتصال MC Nylon 6 به صفحات AA6061 استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که پارامترهای جوشکاری تاثیر بسیار زیادی بر استحکام برشی اتصال (۵-۸MPa) دارد.

موضوع مهمی که در این پژوهش به آن پرداخته شده است رفع مشکلات اتصال دهی نامتجانس^۹ قطعاتی است که دارای خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتی نسبت به یکدیگر می‌باشند مانند اتصال قطعات 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^{۱۰}، نرخ فروروی^{۱۱}، زمان ماندگاری^{۱۲} ابزار داخل قطعه کار، سرعت چرخش ابزار و همچنین درصد ذرات کربنی 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.

۲- مواد و روش تحقیق

جهت بررسی استحکام اتصال نمونه‌های نانوکامپوزیت و آلومینوم به یکدیگر از ورقه‌های آلومینوم آلیاژی ۵۰۸۳ به ضخامت ۲ میلی‌متر و نانوکامپوزیت‌های زمینه پلی‌اتیلن که با نانولوله‌ی کربنی چند جداره (MWCNT) تهیه شده از شرکت VCN Materials تقویت شده‌اند و دارای ابعاد ۱۰cm × ۵cm و ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشند، استفاده شد. ترکیب شیمیایی آلومینوم آلیاژی در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده‌است. به منظور ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی که با ۱درصد و ۲درصد وزنی MWCNT تقویت شده‌اند مراحل زیر طی گردید. در ابتدا مقداری پودر پلی‌اتیلن سنگین و نانولوله‌ی کربنی برای تهیه نمونه‌هایی با ۱ و ۲ درصد وزنی MWCNT با استفاده از دستگاه آسیاب گلوله‌ای با سرعت ۳۰۰rpm به مدت ۱۵ دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. پس از آن توسط دستگاه پرس گرم ۵۰ تن هیدرولیک مدل sph 500، تحت فشار ۴۵ تن و دمای ۱۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قطعات کامپوزیتی تهیه گردید. بعد از تهیه‌ی نمونه‌ها یک ورق نانوکامپوزیت (یا یک ورق پلی‌اتیلن خالص) و یک ورق آلومینوم با ابعاد ۱۰cm × ۵cm به صورت اتصال لبه روی هم بر روی یکدیگر قرار گرفته به گونه‌ای که فلز آلومینوم در قسمت فوقانی و نانوکامپوزیت زمینه پلیمری در قسمت تحتانی باشد و با استفاده از دستگاه به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای که از این پس به جهت رعایت اختصار FSSW نامیده می‌شود؛ به یکدیگر متصل شدند.

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

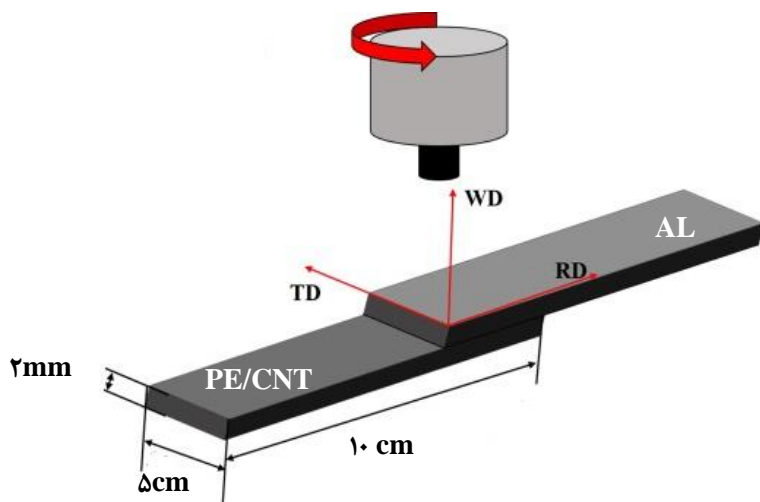
⁹ Heterogeneous

¹⁰ Plunging depth

¹¹ Plunging rate

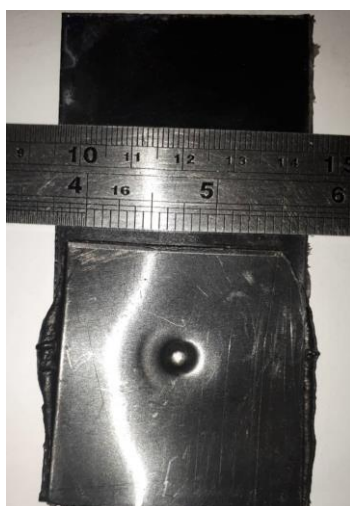
¹² Dwell time

پس از ساخت نمونه‌ها یک ورق نانوکامپوزیت و یک ورق آلومینیوم به صورت اتصال لبه روی هم بر روی یکدیگر قرار گرفته به گونه‌ای که فلز آلومینیوم در قسمت فوقانی و کامپوزیت زمینه پلیمری در قسمت تحتانی باشد و با استفاده از دستگاه فرز به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای به یکدیگر متصل شدند. شکل ۲ نحوه‌ی قرار گرفتن نمونه‌ها را در حین جوشکاری به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۲- شکل شماتیک اتصال لبه روی هم قطعات آلومینیومی و نانوکامپوزیتی در دستگاه جوش FSSW.

استحکام کشش برشی نمونه‌ها با آزمون کشش برشی در دمای اتاق و با سرعت 2 mm/min با استفاده از دستگاه یونیورسال^{۱۳} ساخت شرکت سنتام طبق استاندارد DIN EN ISO 14273 انجام شد. شکل ۳ نمونه‌ی جوشکاری شده‌ی نانوکامپوزیت تقویت شده با ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی را پس از تست کشش برشی نشان می‌دهد.

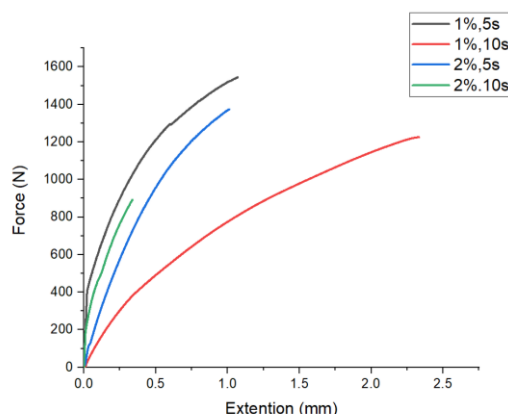


شکل ۳- نمونه‌ی نانوکامپوزیت ۵S - ۱٪ پس از تست کشش برشی.

بررسی های میکروسکوپی نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی^{۱۴} (FESEM) مدل LMU TESCAN BRNO-Mira3 برای نمونه ی ۱-۵٪ و نمونه ی پلی اتیلن خالص انجام شد. به این منظور نمونه ها با استفاده از واترجت با اندازه-های ۱cm×۱cm برش عرضی زده شده و سپس نمونه ها توسط لایه بسیار نازکی از یک ماده رسانا (طلا)، پوشش داده شد. مهمترین قسمت فرایند جوشکاری تعیین پارامترهای فرایند است. به منظور تعیین مطلوب ترین شرایط برای انجام جوشکاری، سرعت چرخش ابزار، عمق فروری و نرخ فروری را ثابت و به ترتیب برابر با ۲۵۰۰rpm، ۳/۲mm و ۴۰mm/min در نظر گرفته شد و تنها مدت زمان ماندگاری ابزار داخل قطعه کار متغیر فرض شده است. پارامترهای متغیر در این پژوهش شامل مدت زمان های ماندگاری ۵ و ۱۰ ثانیه برای نمونه های نانوکامپوزیتی تقویت شده با ۱ و ۲ درصد وزنی فاز تقویت کننده ی نانولوله کربنی می باشند.

۳- نتایج و بحث

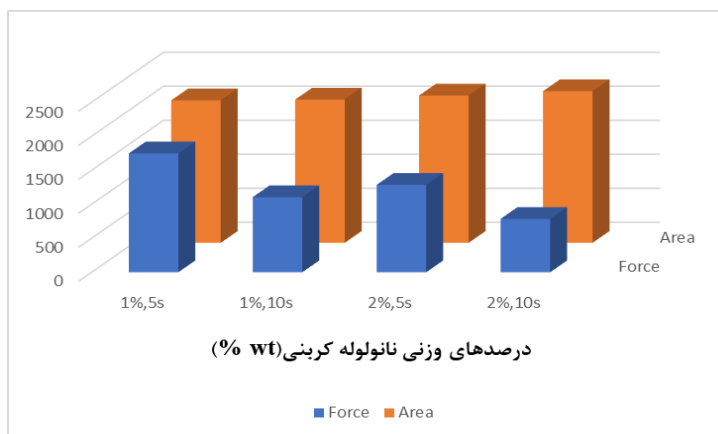
منحنی تغییرات نیرو بر حسب جابجایی نمونه ی نانوکامپوزیت زمینه پلی اتیلن تقویت شده با ۱ و ۲ درصد وزنی نانولوله ی کربنی در مدت زمان ماندگاری ۵ و ۱۰ ثانیه در شکل ۴ آمده است.



شکل ۴- تغییرات نیرو-جابجایی نانوکامپوزیتی پلی اتیلن تقویت شده با ۱ درصد و ۲ درصد وزنی نانولوله ی کربنی در مدت زمان ماندگاری ۵ و ۱۰ ثانیه.

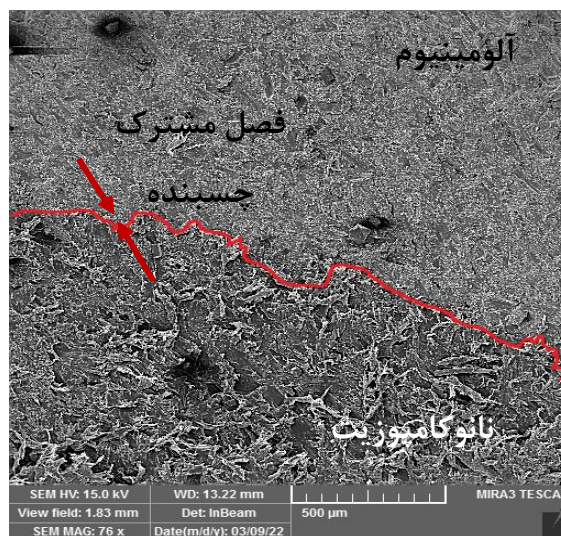
با توجه به شکل ۴ افزایش قابل ملاحظه ی نرخ توزیع حرارت، در مدت زمان ماندگاری ۵ ثانیه، زمان کافی جهت ایجاد اتصال مطلوب فراهم شده و همین امر سبب افزایش سطح ترشده ی آلومینیوم توسط کامپوزیت و ذوب شدگی و تغییر شکل شدید کامپوزیت در حین جوشکاری می گردد، در نتیجه نیروی لازم جهت شکست اتصال مقدار بالایی است، به عبارتی در این درصد وزنی در بازه ی زمانی ۵ ثانیه استحکام برشی فصل مشترک حداکثر مقدار خود را داراست. اما با افزایش زمان تا ۱۰ ثانیه روند کاهش استحکام مشاهده می شود زیرا که افزایش بیش از حد رسانایی حرارتی به واسطه ی افزایش میزان نانولوله ی کربنی در زمینه ی پلیمری باعث افت خواص منطقه اتصال می گردد.

به منظور مقایسه ی بهتر نتایج به دست آمده، نمودارهای میله ای نیروی متوسط و سطح مقطع متوسط -درصد وزنی نانولوله کربنی برای تمام حالت ها در شکل ۵ آورده شده است. طبق این شکل سطح مقطع متوسط اتصال در نمونه کامپوزیتی با افزایش درصد نانولوله کربنی روند صعودی دارد. در نتیجه استحکام اتصال در همه ی زمان های ماندگاری فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با افزایش درصد نانولوله کربنی به سبب سطح مقطع بیشتر کاهش یافته است.



شکل ۵- نمودار میله‌ای سطح مقطع و نیروی متوسط اتصال در درصدهای وزنی (۱ و ۲ درصد نانولوله کربنی).

تصویری از فصل مشترک بین آلومینیوم و کامپوزیت تقویت شده با ۱ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی نیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) تهیه شد، که در شکل ۶ نشان داده شده است. در این تصاویر ناهمواری‌های ایجاد شده در فصل مشترک بین آلومینیوم و نانوکامپوزیت نشان‌دهنده‌ی ایجاد قفل‌شوندگی مکانیکی بین نمونه‌ها و در نتیجه ایجاد یک فصل مشترک چسبنده (اتصال مطلوب) می‌باشد.



شکل ۶: تصویر FESEM از فصل مشترک ما بین آلومینیوم و نانوکامپوزیت تقویت شده با ۱ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی در بزرگنمایی ۷۰x.

۴- نتیجه گیری:

(۱) در مدت زمان ماندگاری ۵ ثانیه، زمان کافی جهت ایجاد اتصال مطلوب فراهم شده است، در نتیجه نیروی لازم جهت شکست اتصال مقدار بالایی است، به عبارتی در این درصد وزنی در بازه‌ی زمانی ۵ ثانیه استحکام برشی فصل مشترک حداکثر مقدار خود را داراست.

(۲) سطح مقطع متوسط اتصال در نمونه کامپوزیتی با افزایش درصد نانولوله کربنی روند صعودی دارد. در نتیجه استحکام اتصال در تمامی زمان‌های ماندگاری با افزایش درصد نانولوله کربنی به سبب سطح مقطع بیشتر کاهش یافته است.

(۳) تصویر میکروسکوپی تهیه شده از نانوکامپوزیت نشان‌دهنده‌ی ایجاد قفل‌شوندگی مکانیکی بین نمونه‌ها و در نتیجه ایجاد یک فصل مشترک چسبنده (اتصال مطلوب) می‌باشد.

۵- منابع:

- [۱] Zhidong Han and Alberto Fina (2011), Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites, *Journal of Progress in Polymer Science*, Vol. 36, pp. 914-944.
- [۲] Manal Hadadi, Boudjemaa Agoudjil, Abderrahim Boudenne, "Thermal conductivity of Polymer/Carbon nanotube composites", *Journal of materials science*, vol: 714, pp: 99-113, (2012).
- [۳] Rodney S. Ruoff and Donald C. Lorents (1995), *Journal of Mechanical and thermal properties of carbon nanotubes*", carbon, Vol. 33, pp. 925-930.
- [۴] Alexander Kalamkarov et al (2006), Analytical and numerical techniques to predict carbon nanotubes properties, *Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, pp. 6832-6854.
- [۵] Hossein Shahmiri, Mojtaba Movahedi and Amir Hossein Kokabi (2017), Friction stir lap joining of aluminium alloy to polypropylene sheets, *Journal of Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 22, pp. 120-126.
- [۶] SY Yang et al (2010), Effect of functionalized carbon nanotubes on the thermal conductivity of epoxy composites, *Journal of carbon*, Vol. 48, pp. 592-603.
- [۷] XW Yang et al (2014), Friction Stir Spot Welding: A Review on Joint Macro and Microstructure, Property, and Process Modelling, *Journal of Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2014.
- [۸] Saeid Hoseinpour Dashatan et al (2013), "Friction stir spot welding of dissimilar polymethyl methacrylate and acrylonitrile butadiene styrene sheets", *Journal of Materials & Design*, Vol. 45, pp. 135-141.
- [۹] Jicheng Gao et al (2015), Improvements of mechanical properties in dissimilar joints of HDPE and ABS via carbon nanotubes during friction stir welding process, *Journal of Materials & Design*, Vol. 86, pp. 289-296.
- [۱۰] Yongxian Hang et al (2018), Joining of aluminum alloy and polymer via friction stir lap welding, *Journal of Materials Processing Tech*, Vol. 257, pp. 148-154.
- [۱۱] Amancio Filho et al (2011), On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures, *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 528, pp. 3841-3848.
- [۱۲] FC Liu et al (2014), Joining of metal to plastic using friction lap welding, *Journal of Materials and Design*, Vol. 54, pp. 236-244.