

بررسی استحکام اتصال آلومینیوم به نانوکامپوزیت پلی اتیلن / نانولوله کربنی به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

تکتم کیان‌افشار^۱، مهدی هامون‌پیما^۲، سمانه صاحبیان سقی^۳، محسن حداد سبزوار^۴

t.kianafshar@gmail.com

چکیده

توجه روزافزون بسیاری از محققان به نانولوله‌های کربنی به سبب خواص عالی رسانایی الکتریکی، حرارتی و استحکامی آن‌ها در سال‌های اخیر ایجاد شده است. در دهه اخیر مبحث اتصال دهی فاز پلیمری و کامپوزیت‌های پلیمری به ورق‌های آلومینیوم بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش به بررسی استحکام اتصال نانوکامپوزیت زمینه پلی اتیلن تقویت شده با نانولوله‌های کربنی به ورق‌های آلومینیوم به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور تأثیر درصد نانولوله‌ی کربنی افزوده شده به پلی‌اتیلن خالص با دانسیته‌ی بالا و مدت زمان ماندگاری پین دستگاه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، بر استحکام کششی ناحیه اتصال، به عنوان متغیرهای پژوهش در نظر گرفته شدند. آزمایشات انجام شده در این مطالعه نشان می‌دهند که هدایت حرارتی پلیمرها با افزودن غلظت نسبتاً پایینی از نانولوله‌های کربنی (۱ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی) به مقدار قابل توجهی افزایش یافته، که همین امر سبب افزایش استحکام اتصال آلومینیوم به نانوکامپوزیت می‌گردد.

کلمات کلیدی: نانولوله‌ی کربنی چند جداره، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، استحکام کششی، مدت زمان ماندگاری پین، پلی‌اتیلن خالص با دانسیته‌ی بالا، انتقال الکتریکی و حرارتی.

^۱ دانشجو، کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی گرایش شناسایی و انتخاب مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ دانشجو، دکتری مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ استادیار، دکتری مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۴ استاد، دکتری مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

۱- مقدمه

نانولوله‌های کربنی^۵ (CNTs) بر خلاف سایر مواد کربنی مانند گرافیت^۶، الماس^۷ و غیره، جزء مواد کربنی یک بعدی محسوب می‌شوند که به دلیل دارا بودن خواص فیزیکی برجسته ای مانند مدول یانگ^۸ بالا، رسانایی الکتریکی و حرارتی، به طور گسترده مورد مطالعه قرار می‌گیرند. نانولوله‌های کربنی یک آلوتروپ^۹ کربن بوده که شامل زنجیره بلندی از مولکول کربن تشکیل شده از اتم‌های کربن می‌باشند. این مواد کربنی در یک شبکه شش ضلعی قرار گرفته‌اند و یک ساختار لوله‌ای را تشکیل می‌دهند. بسته به تعداد دیوارها، آن‌ها به صورت تک جداره^{۱۰}، دو و یا چند جداره^{۱۱} طبقه بندی می‌شوند. به طور معمول، نانولوله‌ها حدود ۲۰-۱۵۰ نانگستروم قطر و حدود ۱۰۰۰-۲۰۰۰ نانگستروم طول دارند. این نانولوله‌ها در دهه‌ی گذشته به دلیل خواص عالی و کاربردهای متعدد مورد مطالعه گسترده محققان قرار گرفته‌اند. از جمله این خواص قابل توجه می‌توان به خاصیت مکانیکی فوق العاده‌ی نانولوله‌های کربنی اشاره کرد که آن‌ها را به مواد پرکننده برای تقویت نانو کامپوزیت‌ها تبدیل نموده است [۱]. از آن زمان، تلاش قابل توجهی جهت استفاده از نانولوله‌های کربنی با پلیمرها برای افزایش استحکام و رسانایی آن‌ها انجام شده است. اعتقاد بر این است که نانوکامپوزیت‌های پلیمری حاوی نانولوله‌های کربنی به دلیل وزن سبک، مقاومت در برابر خوردگی عالی، قابلیت فرایندپذیری خوب و هزینه ساخت کمتر، ایده آل ترین مواد رسانای حرارتی محسوب می‌شوند. با این حال، اگرچه رسانایی حرارتی CNT ها بسیار زیاد است (حدود ۳۰۰۰ w/m^۲k) اما هدایت حرارتی زمینه پلیمری فقط در محدوده ۰/۵-۰/۲ است. هدایت حرارتی نانوکامپوزیت‌های پلیمری/CNT تحت تأثیر عوامل زیادی مانند پراکندگی نانولوله‌های کربنی، برهم کنش سطحی بین نانولوله‌های کربنی و زمینه پلیمری و ساختار بلوری زمینه پلیمری می‌باشد [۲]. به گفته‌ی هان و فینا [۲] پراکندگی مناسب نانولوله‌های کربنی در زمینه پلیمری برای ایجاد یک مسیر رسانای موثر و به حداقل رساندن مقاومت حرارتی در فصل مشترک پلیمر/CNT موثر می‌باشد. همچنین قطر و طول دو پارامتر هستند که بر هدایت حرارتی نانولوله‌های کربنی تأثیر می‌گذارند. همچنین هدایت حرارتی این نانوکامپوزیت‌ها- های تقویت شده با CNT تحت تأثیر کسر حجمی نانولوله‌های کربنی نیز قرار می‌گیرد. یانگ و همکارانش [۳] تأثیر مقدار CNT بر هدایت حرارتی نانوکامپوزیت‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که هدایت

^۵ Carbon nanotubes

^۶ Grafite

^۷ Diamond

^۸ Young's modulus

^۹ Allotrope

^{۱۰} Single walled carbon nanotube

^{۱۱} Single walled carbon nanotube

حرارتی با افزایش مقدار MWCNT افزایش می‌یابد. همچنین با افزودن مقدار کمی MWCNT هدایت حرارتی را می‌توان بیش از ۱۰۰ درصد افزایش داد. این نتیجه تأیید می‌کند که نانولوله‌های کربنی چند جداره پرکننده-هایی با رسانایی حرارتی بالایی هستند که می‌توانند برای بهبود انتقال حرارتی کامپوزیت‌ها استفاده شوند.

پلیمرها، پلاستیک‌ها، کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با انواع مختلف پرکننده‌های رسانا مانند نانولوله‌های کربنی، کربن سیاه و پودرهای فلزی Ni، Al، Cu، به دلیل سهولت فرایند پذیری، هزینه ساخت کمتر و خواص رسانایی حرارتی و الکتریکی عالی به عنوان به پرکاربردترین مواد عصر حاضر شناخته می‌شوند. همین امر سبب شده‌است که توجه بسیاری از محققان به اتصال مواد پلیمری و یا مواد پلیمری با سایر مواد از جمله فلزات جلب شود. به همین دلیل جهت اتصال مواد ترموپلاستیک متفاوت از روش‌های مختلف جوشکاری، مانند جوشکاری ارتعاشی، جوشکاری لیزری، جوشکاری اصطکاکی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW)، پیشنهاد می‌گردد. به دلیل تفاوت زیاد خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی پلیمرها و فلزات، اعمال روش‌های مرسوم جوشکاری برای اتصال این مواد غیرممکن است. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان روشی پربازده تر مطرح شده‌است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) به عنوان یک روش جدید اتصال، در ابتدا در سال ۱۹۹۱ در انگلستان برای پیوستن آلیاژهای آلومینیوم سری ۲XXX و ۷XXX ابداع شد. سپس به دلیل ایجاد استحکام جوش بسیار بالا با صرف انرژی کم توانست کاربرد گسترده‌ای در اتصال مواد پلیمری غیرمشابه به یکدیگر و یا اتصال مواد پلیمری به مواد فلزی پیدا کند [۴].

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی حرارت ناشی از اصطکاک بین ابزار جوش (شانه و پین) و قطعه کار و همچنین تغییر شکل پلاستیک شدید مواد جوش داده شده، مواد زیر شانه و نزدیک پین را نرم می‌کند. مواد نرم شده با چرخش و حرکت ابزار از جلو به پشت پین منتقل شده و سرانجام، اتصال جوش حالت جامد در منطقه‌ای اغتشاش ایجاد می‌گردد. تحقیق حاضر بر روی اتصال مواد پلیمری به مواد فلزی متمرکز است. با این حال، تحقیقات بسیار کمی در مورد اتصال پلیمرهای غیرمشابه و یا اتصال پلیمر و فلز به یکدیگر انجام شده است [۴]. به عنوان نمونه داشاتان و همکارانش [۵] ورق‌های پلی متیل متاکریلات (PMMA) و آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) توسط FSSW به هم متصل شدند، نتایج نشان داد که FSSW یک روش امکان‌پذیر برای جوشکاری پلیمرهای متفاوت است و پارامترهای فرایند تأثیر قابل توجهی بر استحکام جوش دارند. چیچنگ گائو و همکارانش [۴] بهبود خواص مکانیکی اتصالات غیرمشابه HDPE و ABS از طریق نانولوله‌های کربنی در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که تولید اتصالات جوش عالی با استفاده از فناوری جوشکاری اصطکاکی و با افزودن نانولوله‌های کربنی امکان‌پذیر است. مقدار نانولوله‌های کربنی نقش مهمی در بهبود استحکام کششی و ریز ساختار اتصال جوش دارد. حداکثر مقدار مقاومت کششی ۱۴/۷ مگاپاسکال است که می‌تواند به بیش از ۶۵/۳ درصد از مقاومت HDPE اصلی برسد. همچنین افزودن MWCNT می‌تواند استحکام کششی را افزایش دهد، اما سختی اتصال را

کاهش می‌دهد. هانگ و همکارانش [۶] اتصال آلیاژ آلومینیوم و پلیمر را با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی لبه‌ای مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج به دست آمده از این پژوهش استحکام اتصال برشی با سرعت جوش ۵۰ میلی متر در دقیقه، ۲۰ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین یک شکاف کوچک در سطح مشترک بین پلیمر دوباره انجماد یافته و پلیمر مذاب نسبت داده شد. آمانسیو-فیلو و همکارانش [۷] قابلیت اتصال آلیاژ منیزیم AZ31 به پلیمر تقویت‌شده با الیاف را بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اتصالات اصطکاکی نقطه-ای^{۱۲} (FSpJ) دارای استحکام برشی بالاتری از اتصالات پایه چسب دارند. اما FSpJ محدود به طراحی جوشکاری نقطه‌ای است. لئو و همکارانش [۸] 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. ناگاتسوکا و همکارانش [۹] نیز از این فرایند جهت اتصال پلیمر ترموپلاست تقویت‌شده با الیاف کربن به آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ استفاده نمودند. آن‌ها نشان دادند که صفحات پایه با استفاده از لایه‌ی اکسیدی MgO اتصال یافته‌اند.

در این پژوهش پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای و همچنین درصد ذرات MWCNT در زمینه‌ی پلیمری جهت دستیابی به اتصالی با ظاهر و خواص مناسب بهینه گردیده و سپس امکان برقراری اتصال بین میان آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ و کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با نانولوله‌های کربنی با استفاده از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بررسی شده‌است.

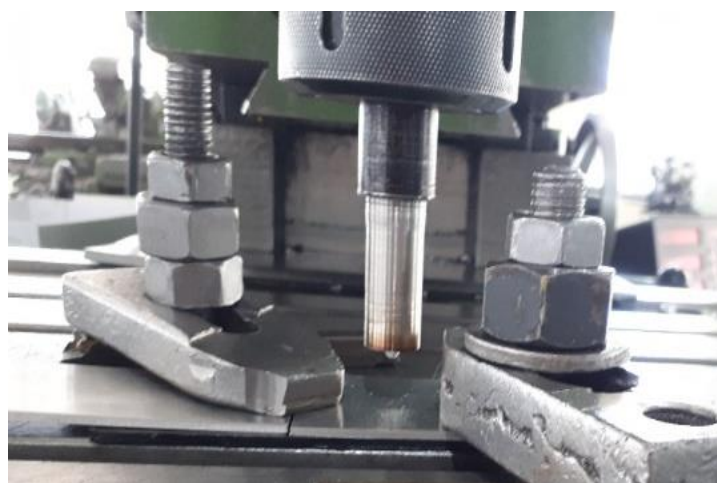
۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از ورقه‌های آلومینیوم آلیاژی ۵۰۸۳ به ضخامت ۲ میلی‌متر و نانوکامپوزیت‌های زمینه پلی‌اتیلن که با نانولوله‌ی کربنی چند جداره (MWCNT) با قطر ۶۰-۴۰ nm، مساحت سطح ویژه‌ی بیشتر از ۲۰۰ m²/g و چگالی ۲/۱ g/cm³، تقویت شده‌اند و دارای ابعاد ۵cm × ۱۰cm و ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشند، استفاده می‌شود. همچنین جهت ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی که با ۱ درصد و ۲ درصد 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 تهیه شدن نمونه‌ها یک ورق نانوکامپوزیت و یک ورق آلومینیوم با ابعاد ۵cm × ۱۰cm 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

^{۱۲} Friction spot joining

باشد و با استفاده از دستگاه فرز به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای به یکدیگر متصل شدند. شکل ۱ نحوه‌ی قرار گرفتن نمونه‌ها را در حین جوشکاری نشان می‌دهد.

روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شامل یک ابزار است که می‌تواند حرکات چرخشی و محوری (بالا و پایین) داشته‌باشد. فرایند به صورت اتصال لب به لب یا لبه رو هم که شامل ورق بالایی و ورق پایینی است انجام می‌گیرد. ابزار که در حال چرخش است؛ از ورق بالایی برای مدت زمانی مشخص به درون مواد فرو می‌رود تا حرارت اصطکاکی تولید شود. ماده‌ی حرارت دیده، نرم شده، در اطراف ابزار موجب یک جریان پلاستیکی می‌شود و در هنگام خروج ابزار از مواد، یک اتصال حالت جامد بین ورق بالایی و ورق پایینی ایجاد می‌گردد.



شکل ۱- شکل اتصال لبه روی هم قطعات آلومینیومی و نانوکامپوزیتی در دستگاه جوش FSSW.

به طور کلی می‌توان گفت که خواص جوش FSSW بستگی به شرایط جوشکاری و هندسه‌ی ابزار دارد. شرایط جوشکاری شامل سرعت چرخش ابزار، عمق نفوذ ابزار و زمان نگهداری آن در مواد تحت جوشکاری است. که در این پژوهش سرعت چرخش ابزار ۲۵۰۰ rpm، عمق فروروی ابزار ۳/۲ میلی‌متر و نرخ فروروی ابزار ۴۰ mm/min و همچنین زمان ماندگاری ابزار نیز به عنوان متغیر پژوهش، ۵ و ۱۰ ثانیه، در نظر گرفته شد.

هندسه‌ی ابزار نیز شامل شکل و اندازه‌ی شانه و پین می‌باشد، که در این تحقیق ابزاری شامل یک پین با قطرهای ۲ میلی‌متر و ۴ میلی‌متر و ارتفاع ۳/۲، به کار برده شد.

پس از جوشکاری نمونه‌ها به منظور به دست آوردن میزان استحکام کششی برشی آن‌ها، آزمایش کشش بر روی نمونه‌های نانوکامپوزیتی در دمای اتاق و با سرعت ۲ mm/min با استفاده از دستگاه یونیورسال^{۱۳} ساخت شرکت سنتام طبق استاندارد DIN EN ISO 14273 انجام شد.

۳- نتایج و بحث

در جدول ۱ نیروی متوسط و سطح مقطع متوسط برای نانوکامپوزیت زمینه پلی اتیلن تقویت شده با ۱ و ۲ درصد وزنی MWCNT در مدت زمان ماندگاری ۵ و ۱۰ ثانیه آمده است.

جدول ۱- نتایج به دست آمده از آزمون کشش برشی نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی.

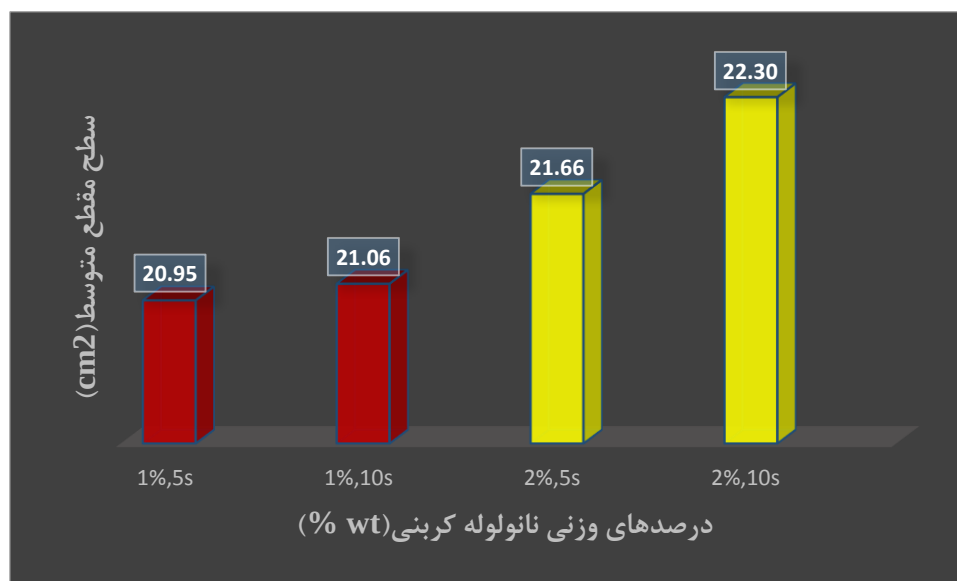
شماره	نمونه	سطح مقطع متوسط (cm ²)	نیروی متوسط (N)
۱	٪ ۱، ۵S	۲۰/۹۵	۱۷۴۷/۵
۲			
۳	٪ ۱، ۱۰S	۲۱/۰۶	۱۱۰۴/۵
۴			
۵	٪ ۲، ۵S	۲۱/۶۶	۱۲۸۵/۵
۶			
۷	٪ ۲، ۱۰S	۲۲/۳۰	۷۸۵/۰
۸			

با توجه به جدول ۱ در نمونه‌ی ۱ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی با توجه به افزایش قابل ملاحظه‌ی نرخ توزیع حرارت، در مدت زمان ماندگاری ۵ ثانیه، زمان کافی جهت ایجاد اتصال مطلوب فراهم شده و همین امر سبب افزایش سطح ترشده‌ی آلومینیوم توسط کامپوزیت و ذوب شدگی و تغییر شکل شدید کامپوزیت در حین جوشکاری می‌گردد، 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. اما با افزایش زمان تا ۱۰ ثانیه روند کاهش استحکام مشاهده می‌شود زیرا که افزایش بیش از حد رسانایی حرارتی به واسطه‌ی افزایش میزان نانولوله‌ی کربنی در زمینه‌ی پلیمری باعث افت خواص منطقه اتصال می‌گردد.

به منظور مقایسه‌ی بهتر نتایج به دست آمده، نمودارهای میله‌ای سطح مقطع متوسط چسبندگی- درصد وزنی نانولوله کربنی برای تمام حالت‌ها در شکل ۲ آورده شده است.

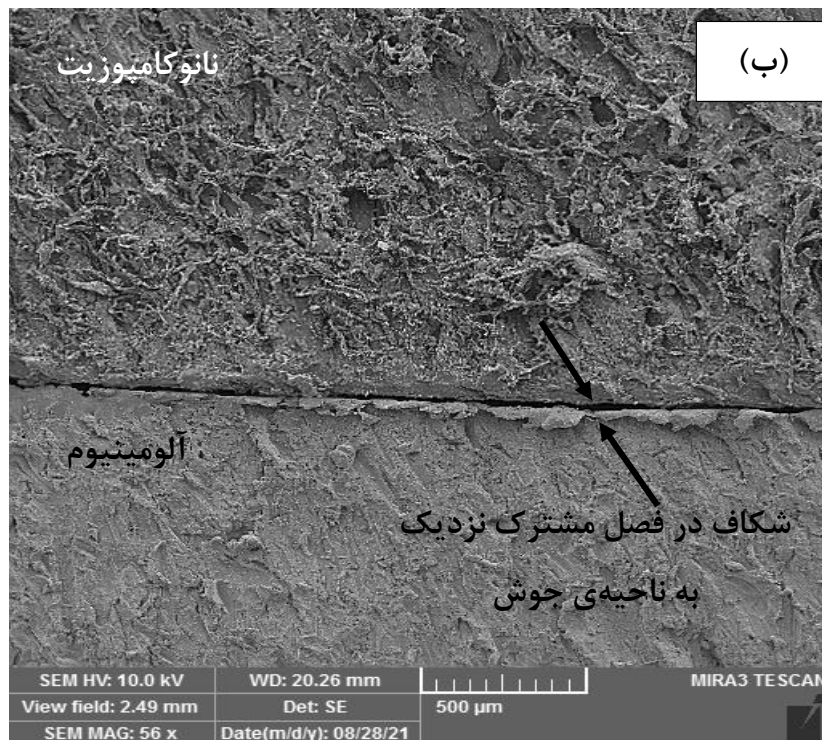
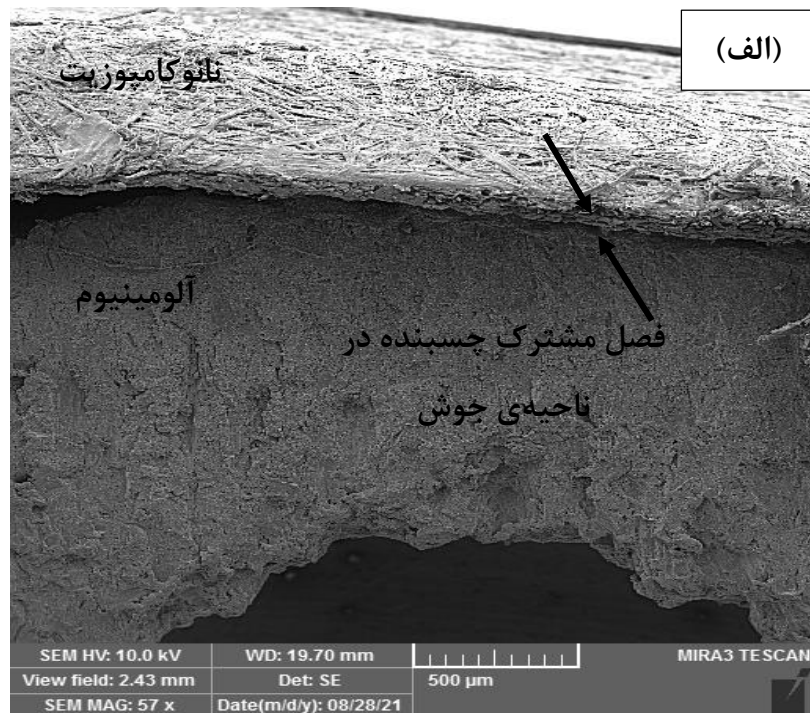
^{۱۳} Universal

با توجه به جدول ۱ و شکل ۲ سطح مقطع متوسط اتصال در نمونه کامپوزیتی با افزایش درصد نانولوله کربنی روند صعودی دارد. در نتیجه استحکام اتصال در همه‌ی زمان‌های ماندگاری فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با افزایش درصد نانولوله کربنی به سبب سطح مقطع بیشتر کاهش یافته است.



شکل ۲- نمودار میله‌ای نتایج حاصل متوسط سطح مقطع در درصدهای وزنی ۱ و ۲ درصد نانولوله کربنی.

تصاویری از فصل مشترک بین آلومینیوم و کامپوزیت تقویت شده با ۱ درصد و ۲ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی نیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) تهیه شد، که در شکل ۳ (الف) و (ب) نشان داده شده‌است. همانطور که در تصاویر میکروسکوپی این نمونه‌ها نیز مشهود است، تفاوت ضرایب انبساط حرارتی پلیمر و فلز در حین سرمایش پلیمر مذاب به صورت تنش‌های حرارتی پسماند آزاد شده و باعث ایجاد شکاف‌هایی در فصل مشترک فلز-کامپوزیت می‌شوند. این در حالی است که در فصل مشترک نانوکامپوزیت تقویت شده با ۱ درصد وزنی MWCNT چسبندگی بیشتری نسبت به نمونه‌ی ۲ درصد وزنی MWCNT مشاهده می‌شود.



شکل ۳: تصویر FESEM از فصل مشترک ما بین آلومینیوم و کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با (الف) ۱ درصد وزنی و (ب) ۲ درصد وزنی نانولوله ی کربنی.

۴- نتیجه‌گیری:

- (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) تصاویر میکروسکوپی نشان‌دهنده‌ی ایجاد شکاف‌هایی در فصل مشترک فلز-کامپوزیت می‌باشند، که در اثر تفاوت ضرایب انبساط حرارتی پلیمر و فلز در حین سرمایش پلیمر مذاب و ایجاد تنش پسماند ایجاد شده‌اند.

۵- مراجع:

- [۱] M.Haddadi et al, "Thermal conductivity of Polymer/Carbon nanotube composites", materials science, 714,99-113.
- [۲] Zhidong Han & Alberto Fina, "Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites", Progress in Polymer Science,36,914-944.
- [۳] S.-Y. Yang et al, "Effect of functionalized carbon nanotubes on the thermal conductivity of epoxy composites", carbon,48,5 9 2 –6 0 3.
- [۴] J. Gao et al, "Improvements of mechanical properties in dissimilar joints of HDPE and ABS via carbon nanotubes during friction stir welding process", Materials & Design , 86, 289-296.
- [۵] SH.D et al, "Friction stir spot welding of dissimilar polymethyl methacrylate and acrylonitrile butadiene styrene sheets", Materials & Design, 45, 135-141.
- [۶] Y.H et al, "Joining of aluminum alloy and polymer via friction stir lap welding", Materials Processing Tech,257, 148-154.
- [۷] S.T. Amancio-Filho et al, "On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures", Materials Science and Engineering,528, 3841-3848.
- [۸] F.C. Liu et al, "Joining of metal to plastic using friction lap welding", Materials and Design, 54, 236-244.

[۹] k. Nagatsuka et al, “Direct joining of carbon-fiber–reinforced plastic to an aluminum alloy using friction lap joining”, 73, 82-88.