نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ویژه ۲ ، سال ۱۴۰۰، صفحات ۱۳۲۱ تا ۱۳۳۰
DOI: 10.22060/mej.2019.16939.6479

پایش وضعیت اتصالات چسبی تک‌لبه معیوب با استفاده از نانولوله‌های کربنی

امید سام دلیری[۱و۲]، محمدرضا فراهانی[۱،*]

[۱] دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۲] انستیتو تکنولوژی سیستم های هوشمند، دانشگاه کلاگنفورت، کلاگنفورت، اتریش

خلاصه: اتصالات چسبی در سازه‌های مهندسی بویژه درصنایع دریایی، هوافضا، خودروسازی، نفت و گاز به‌کار می‌روند. با توجه به اینکه اتصال ضعیف‌ترین بخش یک سازه مهندسی محسوب می‌شود، احتمال شکست از محل اتصال چسبی بالا است. بنابراین، پایش وضعیت اتصال چسبی از اهمیت ویژه‌ای برخودار است. هدف از این مقاله، پایش وضعیت آسیب در اتصال چسبی تک لبه با استفاده از نانولوله‌های کربنی چند جداره است. این کار با روش ثبت تغییرات مقاومت الکتریکی طی بارگذاری مکانیکی انجام شده است. این انتشار آسیب به صورت انتشار ترک در اتصال چسبی مشاهده شده است. در ابتدا نانولوله‌های کربنی با ۹ درصد وزنی با استفاده از دستگاه آلتراسونیک درون رزین اپوکسی پراکنده شدند. پس از اضافه‌نمودن سخت‌کننده، ماده بدست‌آمده بلافاصله درون قالب اتصال چسبی تک‌لبه ریخته شد. اتصال چسبی معیوب با سطح عیب ۱۰%، ۳۰% و ۷۰% و با عیب‌های دایره‌ای و مربعی ساخته شد. این نمونه‌ها تحت آزمون کشش، قرارگرفته و پاسخ مقاومت الکتریکی آن تحت بارگذاری برشی ثبت شد. نتایج نشان داد که بیشترین تغییرات کلی مقاومت در نمونه اتصال چسبی با اندازه عیب ۳۰ درصد مربعی اتفاق افتاده و بخش زیادی از پیشرفت آسیب به صورت انتشار ترک در چسب رسانا مشاهده شد. نتایج بدست‌آمده نشان داد که زمانی که بخش بزرگی از ترک درون چسب و بخش اندکی از آن در مرز عیب رشد می‌کند، بیشترین تغییرات کلی مقاومت مشاهده می‌شود.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۸
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۷/۱۳
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۹/۰۵

کلمات کلیدی:
پایش وضعیت
ترک
نانولوله‌های کربنی چند جداره
اتصالات چسبی
تغییرات مقاومت الکتریکی
حسگر

۱. مقدمه

استفاده از چسب‌ها برای اتصال قطعات مختلف و در صنایع گوناگون مانند صنایع دریایی، هوافضا، خودروسازی، نفت و گاز و غیره در حال توسعه و گسترش است. دلیل این کاربرد گسترده، خصوصیات بالقوه اتصالات چسبی مانند استحکام به وزن بالا، انعطاف‌پذیری طراحی و توزیع تنش یکنواخت در اتصال چسبی در مقایسه با سایر اتصالات مانند اتصالات مکانیکی و متالورژیکی می‌باشند. از آنجایی که محل اتصال‌ها به‌عنوان نقاط بحرانی در یک سازه مهندسی محسوب می‌شوند؛ ایجاد اتصال با استحکام بالا و همچنین پایش وضعیت در آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به اینکه بازرسی اتصالات چسبی با روشهای غیرمخرب بسیار دشوار است، نیازمند استفاده از روش‌ها با تمهیدات ویژه است [۱, ۲]. با این حال استفاده از روش‌های پایش سلامت سازه با قابلیت‌اطمینان بالایی برای این منظور بکار می‌روند [۳]. امروزه استفاده از مواد غیرارگانیک و افزودن آنها به چسب‌ها پلیمری، منجر به توسعه و بهبود عملکرد این چسب‌ها شده است. ذرات کربنی مانند فیبرهای کربنی، بلوک‌های کربن و به تازگی استفاده از نانولوله‌های کربنی، به طور گسترده در تحقیق‌ها به منظور بهبود خواص مکانیکی [۴-۷] و الکتریکی نانو چسب [۸-۱۱] مورد استفاده قرار می‌گیرد. رفتار الکتریکی و مکانیکی مناسب نانو

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mrfarahani@ut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

چسب نانولوله کربن- اپوکسی، باعث شده تا به عنوان یک حسگر، در ارزیابی سلامت سازه‌ها بکار رود [۱۲, ۱۳]. این نانوذره کربنی به همراه چسب‌های پلیمری، نانو چسبی را ایجاد می‌کنند که نقش یک حسگر در ارزیابی سلامت سازه‌های مهندسی را دارد [۱۴, ۱۵]. در صورتی که این حسگر در مکان‌های مناسب در سازه، قرار گیرند؛ تغییرشکل‌های ناشی از نیروی اعمالی در آن سازه، باعث تغییرات مقاومت الکتریکی در حسگر خواهد شد. این نوع حسگر می‌توانند در سازه‌های تحت بار فشاری به منظور پیش‌بینی تمرکز تنش و بار بحرانی کمانش بکار رود [۱۶, ۱۷]. بنابراین مفهوم پایش وضعیت سازه، براساس تغییرات مقاومت الکتریکی حسگر در آن سازه است؛ بنابراین می‌توان شروع و توسعه آسیب‌ها در آن سازه را با رفتار تغییرات مقاومت الکتریکی بررسی نمود. نانو چسب رسانا حاوی نانولوله کربنی کاربردهای ویژه‌ای در صنایع مختلف به عنوان حسگرهای گازی [۱۸] و کرنش سنج‌ها [۱۹] دارند. زمانی که نانوذرات رسانا درون زمینه پلیمری توزیع می‌شوند، یک شبکه رسانا درون زمینه پلیمری ایجاد می‌گردد. میزان رسانایی این شبکه، تحت تاثیر درصد وزنی نانوذرات، اثرات متقابل میان نانوذرات در زمینه پلیمری و چگونگی توزیع آنها است [۲۰, ۲۱].

خصوصیات حسگری نانولوله کربن- اپوکسی تحت بار مکانیکی وابسته به توزیع نانوذرات درون زمینه اپوکسی به منظور تشکیل شبکه رسانا است [۲۲-۲۴]. همچنین مقدارهای مختلف از نانوذرات کربنی روی استحکام اتصال چسبی اثرگذار می‌باشد [۱۲, ۲۵, ۲۶]. در مرجع [۲۴]، اثرات درصدهای مختلف وزنی مختلف روی قابلیت حسگری اتصال چسبی بررسی شد و سپس این قابلیت حسگری در اتصال چسبی معیوب برای بررسی مکانیزم شکست مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهش حاضر تنوع عیوب از لحاظ اندازه بیشتر بوده و به طور دقیق‌تری ارتباط میان تغییرات الکتریکی و پیشرفت ترک در اتصال چسبی معیوب مورد بررسی قرارگرفته‌است. در مرجع [۲۷]، محققان دریافتند که با افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی چندجداره به یک چسب پلیمری، اتصال چسبی دارای بیشترین استحکام بوده است و افزایش بیشتر آن باعث کاهش استحکام شد. با این حال زمانی که بحث پایش وضعیت یک اتصال چسبی وجود دارد باید به پارامترهای دیگر مانند رسانایی چسب نیز توجه شود تا بتوان یک حسگر با قابلیت پایش وضعیت مناسب داشت.

در این مقاله با بکارگیری چسب اپوکسی که با استفاده از نانولوله کربنی چند جداره رسانا شده است، به پایش وضعیت ترک در اتصال چسبی تک‌لبه می‌پردازد. ریزساختار نانوچسب با میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور داشتن انواع مختلف ترک، عیب‌های مربعی و دایره‌ای در اتصال چسبی ایجاد گردید. تغییرات نسبی مقاومت الکتریکی اتصال، هنگام بارگذاری برشی ثبت شد. نحوه رشد ترک از ارتباط میان تغییرات نسبی مقاومت و سطح شکست در اتصال چسبی، مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی بیشتر، ارتباط میان رفتار مکانیکی و پاسخ مقاومت الکتریکی یک نمونه از اتصال چسبی که بیشترین تغییرات مقاومت را نشان داده است، از ابتدای بارگذاری تحلیل شد.

۲. آزمایش‌های تجربی

۱-۲- مواد اولیه

نانوچسب رسانا شامل اپوکسی به عنوان زمینه و نانولوله‌های کربنی[1] به عنوان نانوذره رسانا است. رزین اپوکسی مورد استفاده اپوتین[2] محصول شرکت بوهلر[3] آلمان است. این رزین دارای سیالیت بالا ویسکوزیته پایین و انقباض کم است به طوری‌که می توان نانوذرات را با انرژی پایین‌تر در زمینه اپوکسی توزیع نمود. این اپوکسی یک سخت‌کننده دارد که به نسبت ۲ به ۱ با آن ترکیب می‌شود. مطابق با دستورالعمل ساخت آن، این چسب در دمای کنترل‌شده ۲۷ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۹ ساعت خشک شده و استحکام یافته و یا می‌تواند در دمای اتاق ($C25^{\circ}$) به مدت یک روز به همان استحکام برسد. نانولوله‌های کربنی از شرکت چیپ تیوپ آمریکا[4]، با سفارش اینترنتی به مقدار لازم تهیه شدند. نانولوله کربنی از نوع چندجداره بوده و قطر خارجی آن dp ، بین ۳۰ تا ۵۰ نانومتر و طول آن بین lp ، بین ۱۰ تا ۲۰ میکرومتر است. درجه خلوص آن بیش از ۹۵ درصد است. در ساخت نمونه‌های اتصال تک لبه جنس چسبنده‌ها از آلیاژ آلومینیم[5] از نوع۵۷۵۴ بوده است. چسبنده‌ها مطابق با استاندارد[6] آماده شدند. در جدول ۱ مشخصات این آلیاژ آمده است. همچنین در

1 Carbon nanotubes
2 EpoThin
3 Buehler
4 Cheaptubes (USA)
5 Al-Mg3
6 ASTMD-5868-01 standard

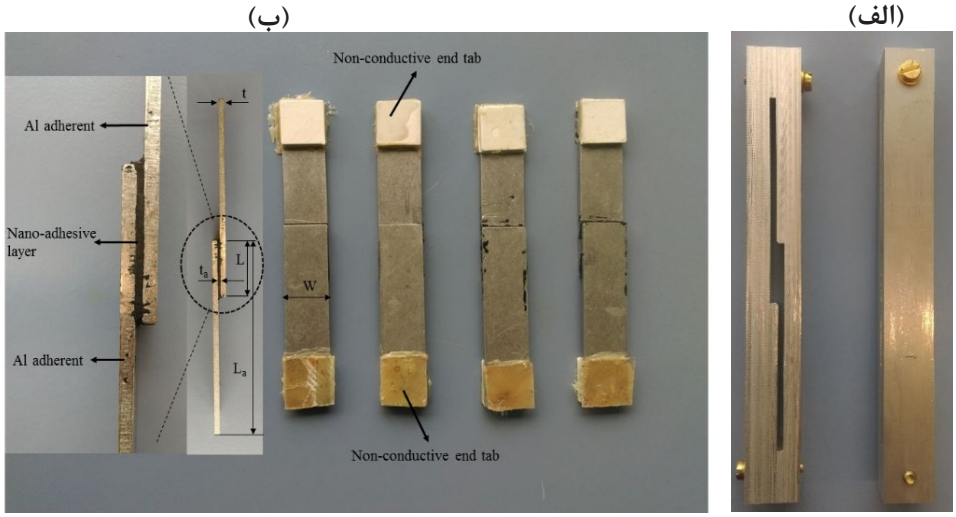

Fig.1. Single lap adhesive joints a) molds b) specimens with geometrical properties

شکل ۱: اتصال چسبی تک لبه الف)) قالب مورد استفاده ب) نمونه‌های اتصال چسبی با مشخصات هندسی

جدول ۱: خصوصیات مکانیکی آلیاژ آلومینیم Al-Mg۳

Table 1. Mechanical properties of AL-Mg3

نسبت پواسون	مدول الاستیک	استحکام نهایی	استحکام تسلیم
۰/۳۳	۶۸ MPa	۳۳۰ MPa	۲۸۰ MPa

پایش وضعیت اتصال‌های چسبی، که از روش دو پرآب[1] استفاده شد، سیم‌ها از طریق چسب فلزی به صفحات آلومینیم متصل شدند.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

مطابق با مرجع [۲۶]، به منظور پایش وضعیت، مقادیر جرمی معادل با ۹ درصد وزنی از نانولوله کربنی، روی ترازوی دیجیتالی وزن شده و با مقدار مشخص‌شده از رزین اپوکسی به صورت مکانیکی ترکیب می‌گردد. سپس با استفاده از دستگاه آلتراسونیک با توان ۱۲۰ کیلووات با فرکانس ۶۰ کیلوهرتز عملیات پراکندگی نانولوله‌های کربنی درون رزین اپوکسی انجام می‌شود. مدت زمان پراکندگی نمونه‌ها ۱۰ دقیقه است. ماده بدست‌آمده به مدت ۲۰ دقیقه با استفاده از پمپ خلا حباب زدایی شد. سپس رزین حاوی نانوذرات به صورت مکانیکی و روی همزن به مدت ۱۵ دقیقه با هاردنر به نسبت ۲ به ۱ مخلوط گردید.

به منظور داشتن ضخامت یکنواختی از چسب برابر با ۱ میلی متر، دو قالب برای اتصال تک‌لبه مطابق با شکل ۱ طراحی گردید. مطابق با پژوهش انجام‌شده برای پایش اتصالات چسبی، ضخامت لایه چسب یک سوم ضخامت چسبنده درنظرگرفته شد [۲۸]. در شکل دو قالب از اتصال تک‌لبه مشاهده می‌شود (شکل ۱ الف). ابتدا صفحات داخلی قالب را با واکس جداساز کمی آغشته کرده تا چسبنده‌های آلومینیومی بعد از آماده‌سازی به راحتی خارج شوند. سپس چسبنده‌ها را داخل قالب قرار داده و پیچ‌های تنظیم کمی بسته می‌شوند. قسمت هم‌پوشانی چسبنده‌ها از قبل با سنباده نرم تمیز و با استون پاک شدند. قالب از قسمت پایین با چسب پلاستیکی مسدود شده بود. سپس نانوچسب مایع در میان دو چسبنده، درون قالب ریخته می‌شود. پیچ‌های تنظیم کاملا بسته شده و ناحیه همپوشانی نیز با گیره کمی سفت می‌شوند تا در پایان یک اتصال چسبی با استحکام لازم و ضخامت یکسان بدست آید (شکل ۱ ب). پس از مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نمونه‌های اتصال چسبی از قالب خارج شده و سطوح آن که در تماس با بدنه قالب بود با استون تمیز شدند. همچنین پلیسه‌های احتمالی تشکیل‌شده از نانوچسب با سمباده نرم برداشته شدند. به‌این‌ترتیب برای تمامی نمونه‌های اتصال، اتصالی با ضخامت یکسان چسب و با استحکام مناسب خواهیم داشت. به منظور همراستاکردن چسبنده‌ها هنگام آزمایش کشش، تب‌های نارسانا از جنس فایبرگلاس، در ناحیه‌های انتهایی و در دوطرف اتصال چسبی بوسیله چسب آرالدیت[2] چسبانده می‌شوند، به طوری‌که خط مرکزی

1 Two Probe Method

2 Araldite 2015

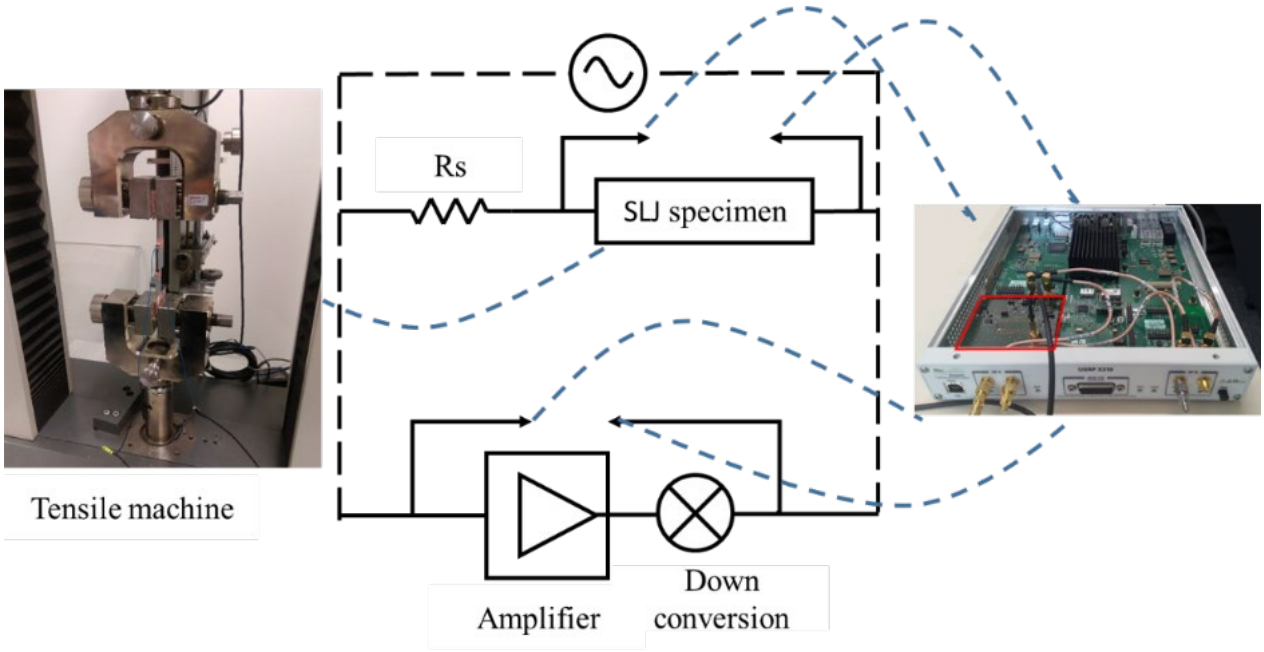

Fig.2. Illustration of electro-mechanical setup for structural health monitoring of single lap adhesive joint

شکل۲: طرحواره سیستم الکترو- مکانیکی پایش وضعیت نمونه‌های اتصال چسبی

ناحیه بالایی و پایینی تب‌ها از وسط ناحیه چسب عبور کند [۲۹]. علت نارسانابودن تب‌ها این است که درهنگام اندازه‌گیری تغییرات الکتریکی جریان الکتریکی از فک‌های رسانای دستگاه آزمایش کشش عبور نکند. برای ساخت اتصال چسبی معیوب، عیب‌های مصنوعی در شکل‌ها دایره‌ای و مربعی و در اندازه‌های مختلف ۱۰%، ۳۰% و ۷۰% در مرکز ناحیه اتصال قرار داده می‌شوند. نانوچسب بدست آمده، فورا به داخل قالب اتصال چسبی ریخته شد و پس از ۲۴ ساعت و در دمای اتاق کاملا خشک گردید.

۳-۲- سیستم اندازه‌گیری الکتریکی- مکانیکی نمونه‌ها

اندازه‌گیری الکتریکی در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول، فرکانس وابسته به مقاومت اولیه توسط ال سی آر متر[1]مشخص شد. این دستگاه دارای فرکانس‌های مختلف می‌باشد. مقاومت اولیه اتصال چسبی در فرکانس‌های مختلف بدون اعمال بار مکانیکی توسط ال‌سی‌آرمتر اندزه‌گیری شد. این کار به این منظور انجام شد تا فرکانس مناسب برای اعمال بر دستگاه اندازه‌گیری تغییرات الکتریکی مشخص شود. مرحله دوم اندازه‌گیری تغییرات مقاومت الکتریکی در زمان انجام آزمایش کشش است. در آزمایش کشش از دستگاه کشش اونیورسال زویک-روئل[2] برای اعمال نیرو استفاده شد. جابجایی میان دو نقطه اتصال با استفاده از کشش‌سنج[3] کنترل و توسط دستگاه آزمایش کشش ثبت شد. این کار با استفاده از یک سیستم اندازه‌گیری با سرعت و قابلیت تفیک‌پذیری بالا انجام‌گرفته‌است. طرحواره سیستم اندازه‌گیری الکترومکانیکی در شکل ۲ نشان داده‌شده‌است. سمت چپ این شکل، محل قرارگیری نمونه اتصال چسبی تک‌لبه در دستگاه آزمایش کشش است. یک سمت نمونه به ورودی تقویت‌کننده آنالوگ که به عنوان بخشی از سخت‌افزار اندازه‌گیری مقاومت متصل گردید. سمت دیگر نمونه به خروجی سخت‌افزار وصل شد که شامل تولیدکننده سیگنال سینوسی است. در دامنه دیجیتال، الگوریتم لازم برای فرآیند پردازش سیگنال (تبدیل پایینی[4] سیگنال دریافتی)، توسط ساختار برنامه[5] اندازه‌گیری، فراهم شده است. فرکانس بالاتر می‌تواند اثر نویزهای دستگاه‌های الکتریکی اطراف را بر روی حسگر پایش وضعیت کاهش دهد. از طرف دیگر این سیستم اندازه‌گیری برای خواندن مقاومت نمونه‌هایی که مقاومت اولیه آنها بالاست، نیز مناسب است.

1 Extech LCR meter

2 Zwick/Roell Z020
3 Extensometer
4 Down conversion
5 Platform

۳. نتایج و بحث

۱-۳- پاسخ مقاومت الکتریکی فیلم نانوماده مرکب نانولوله کربن- اپوکسی

به طورکلی مکانیزم‌های رسانایی در یک زمینه چسب اپوکسی حاوی نانوذرات رسانا شامل سه مورد است. در شکل ۳، طرحواره‌ای از مکانیزم‌های رسانایی نشان داده شده است. شبکه رسانای متشکل از رشته‌های نانولوله کربنی درون زمینه اپوکسی می‌تواند ناشی از پدیده تونل‌زنی میان رشته‌های نانولوله کربنی مجاور هم اتفاق بیافتد (شکل ۳ الف). با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی، پدیده تونل‌زنی می‌تواند میان کلوخه‌های تشکیل‌شده از نانولوله کربن- اپوکسی به عنوان مکانیزم غالب رسانایی باشد (شکل ۳ ب) و یا حتی با افزایش بیشتر ماده رسانا، مکانیزم رسانایی ناشی از پدیده مقاومت تماسی میان رشته‌های نانولوله کربنی و یا میان کلوخه‌ها است (شکل ۳ ج). شکل ۳ (د) تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی نانوچسب را نشان می‌دهد. ترکیبی از مکانیزم‌های مختلف رسانایی می‌تواند در نانوچسب رسانا اتفاق بیافتد. میکروساختار بدست‌آمده از نمونه واقعی نشان می‌دهد که با توجه به انباشتگی رشته‌های نانولوله کربنی، مکانیزم غالب از نوع تماسی است ولی سایر مکانیزم‌های رسانایی نیز می‌تواند رخ داده باشد. پیکان‌های نشان‌داده‌شده در شکل ۳ (د) می‌توانند همان پدیده تونل‌زنی میان رشته‌های مجاور از نانولوله کربنی باشد

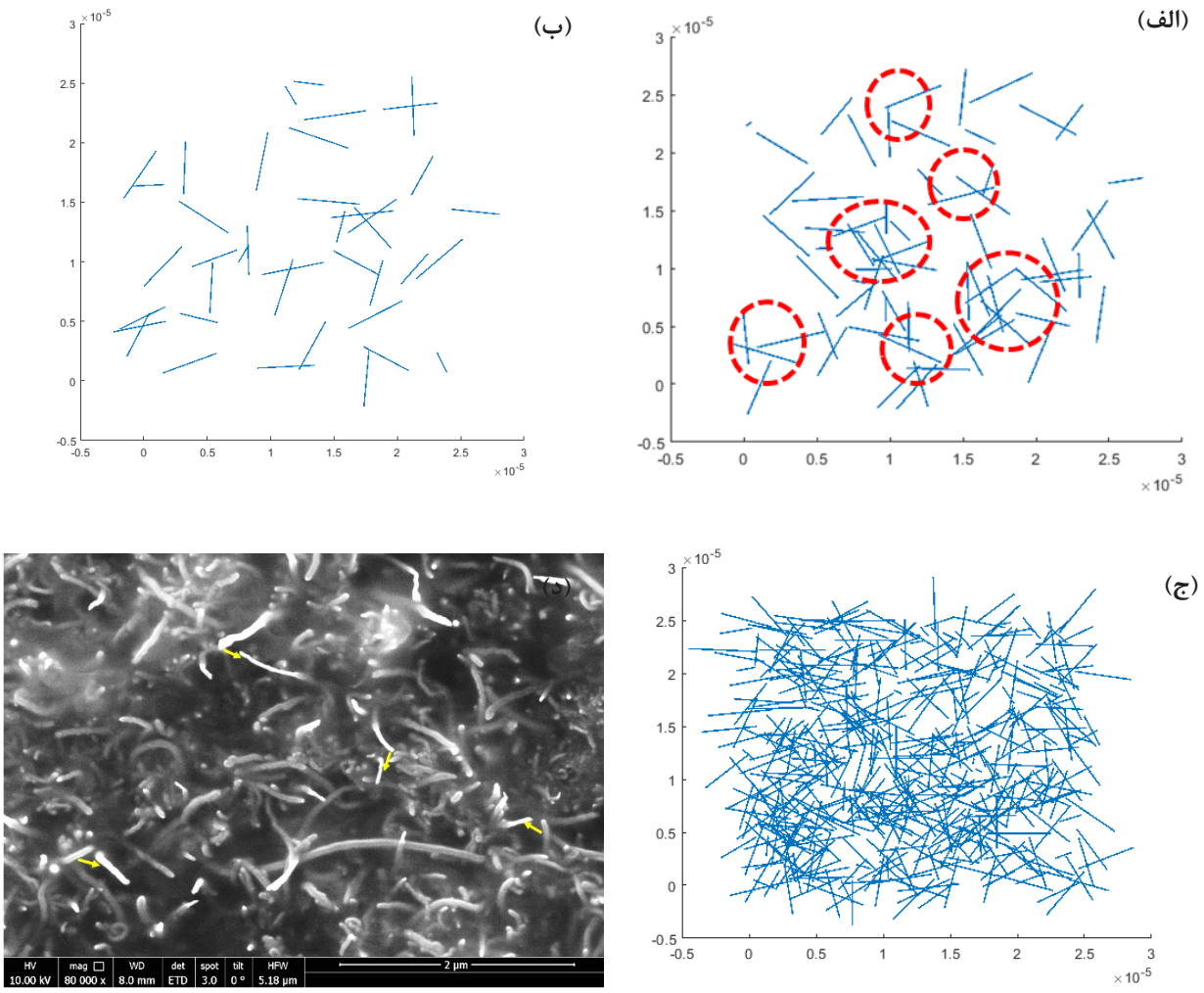

Fig.3. Illustration of conductivity mechanisms a) tunneling resistance between carbon nanotubes b) Resistance tunneling between agglomerated zones and c) Real microstructure of conductive nanoadhesive

شکل ۳: طرحواره‌ای از مکانیزم‌های رسانایی الف) مقاومت تونلی میان رشته‌های مجاور نانولوله کربنی، ب) مقاومت تونلی میان کلوخه‌های ایجاد شده و ج) مقاومت الکتریکی تماسی. د) میکروساختار نمونه واقعی نانوچسب رسانا

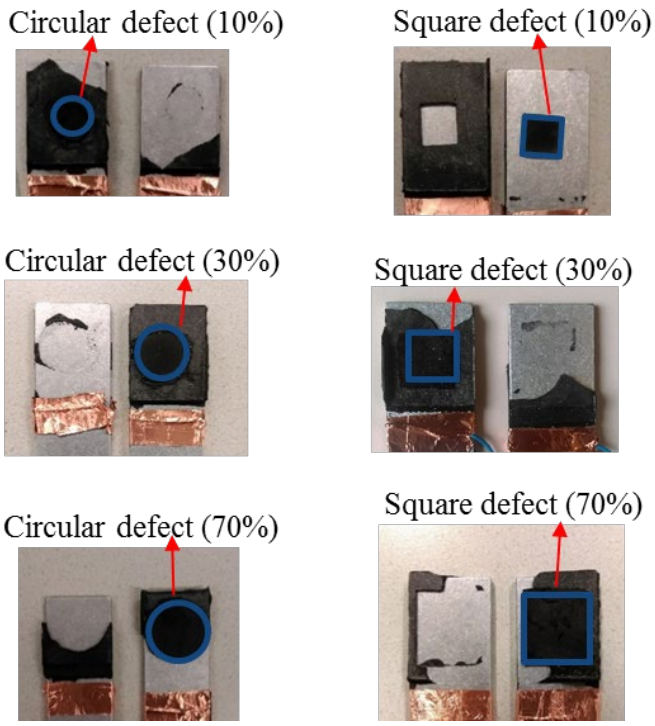

Fig.4. Fracture surface for different defective adhesive joints

شکل ۴: سطح شکست اتصال‌های چسبی برای انواع مختلف عیب

که یک مکانیزم رسانایی است.

۳-۲- اثر عیوب مصنوعی بر روی پاسخ امپدانسی در نمونه‌های اتصال چسبی نانولوله کربن- اپوکسی

تغییرات کلی ΔR/R اتصال چسبی با اندازه عیوب ۱۰، ۳۰ و ۷۰ درصد برای دو نوع عیب دایره‌ای و مربعی در این بخش بررسی شده است. بیشترین ΔR/R مربوط به اتصال چسبی معیوب با سطح عیب ۳۰% و شکل عیب مربعی است. میزان ΔR/R در این اتصال ۲۲۰% است. این درحالی است که میزان ΔR/R در سایر نمونه‌های اتصال چسبی کمتر از ۲۰ درصد است. شکل ۴، سطح شکست اتصال‌های چسبی معیوب، شامل عیوب دایره‌ای و مربعی‌شکل در سه اندازه مختلف نشان داده شده است. برای اتصال چسبی با سطح عیب ۱۰%، اتصال همراه با عیب دایره‌ای نسبت به مربعی تغییرات مقاومت بیشتری را نشان داده است. با توجه به سطح شکست، در یکی از این دو اتصال، بخشی از ترک از درون چسب انتشار یافته است و به مرز عیب نرسیده است، در حالی که در اتصال دیگر، شکست کاملا از مرز میان چسب و چسبنده آلومینیومی انتشار یافته است و ΔR/R بیشتری را نشان داده است (۱۸%). برای اتصال چسبی با سطح عیب ۳۰% مربعی، نسبت به سطح عیب ۳۰% دایره‌ای، ΔR/R به طور قابل‌ملاحضه‌ای تفاوت دارد. علت این است که در اتصال مربعی با عیب ۳۰ درصد بخش زیادی ار ترک درون چسب رشد کرده به طوری که به مرز عیب مربعی رسیده و تغییرمسیر داده است در حالی که در اتصال مشابه با عیب دایره‌ای بخش زیادی از انتشار آسیب از مرز میان چسب و چسبنده رخ داده است. زمانی که اندازه عیب در اتصال چسبی افزایش یافته، احتمال انتشار ترک از مرز عیب نیز رو به افزایش است. این پدیده در اتصال چسبی معیوب با سطح عیب ۷۰% در هر دو نوع عیب دایره‌ای و مربعی مشاهده شده است (شکل ۴). این نوع اتصال‌ها نسبت به سطح عیب ۳۰% مربعی، داری مقدار ΔR/R بسیار کوچکتری هستند زیرا بخش زیادی از انتشار ترک در مرز نارسانای عیب بوده است. به عبارت دیگر، زمانی که ترک از مرز عیب نارسانا رشد می‌کند، در یک سمت ترک چسب رسانا و در سمت دیگر آن عیب نارسانا است و ΔR/R بسیار کم است.

در این تحقیق نانوچسب با ۹ درصد وزنی برای پایش وضعیت اتصال چسبی معیوب نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات مقاومت الکتریکی متاثر از مسیر ترک و یا پیشرفت آسیب در لایه چسب است. به‌طورخلاصه تغییرات کلی مقاومت برای این نوع اتصالات در جدول ۲ آمده است. این جدول برگرفته از نتایج شکل ۴ است.

با توجه به اینکه نمونه اتصال چسبی با ۳۰% عیب مربعی دارای بیشترین درصد تغییرات در ΔR/R است، به منظور بررسی بیشتر ارتباط میان رفتار مکانیکی و تغییرات الکتریکی آن در طی بارگذاری برشی مورد ارزیابی قرارگرفتند. دلیل افزایش ΔR/R ، شکسته‌شدن رشته‌های نانولوله کربنی بر اثر اعمال نیروی مکانیکی است، به عبارتی بر اثر شکسته‌شدن شبکه‌های مقاومتی متشکل از نانولوله‌های کربنی، رسانایی کاهش می‌یابد [۱۲]. شکل ۵ ارتباط میان پاسخ مقاومت الکتریکی و رفتار مکانیکی اتصال چسبی را طی آزمون کشش نشان می‌دهد. اتصال چسبی بعد از ۰/۰۱ میلی‌متر جابجایی برشی در لایه چسب، افزایش در ΔR/R را نشان داده است. این بیانگر آن است که این نانوچسب یا همان حسگر نسبت به جابجایی برشی حساس است و با استفاده از این نمودار می‌توان رشد آسیب در لایه چسب را

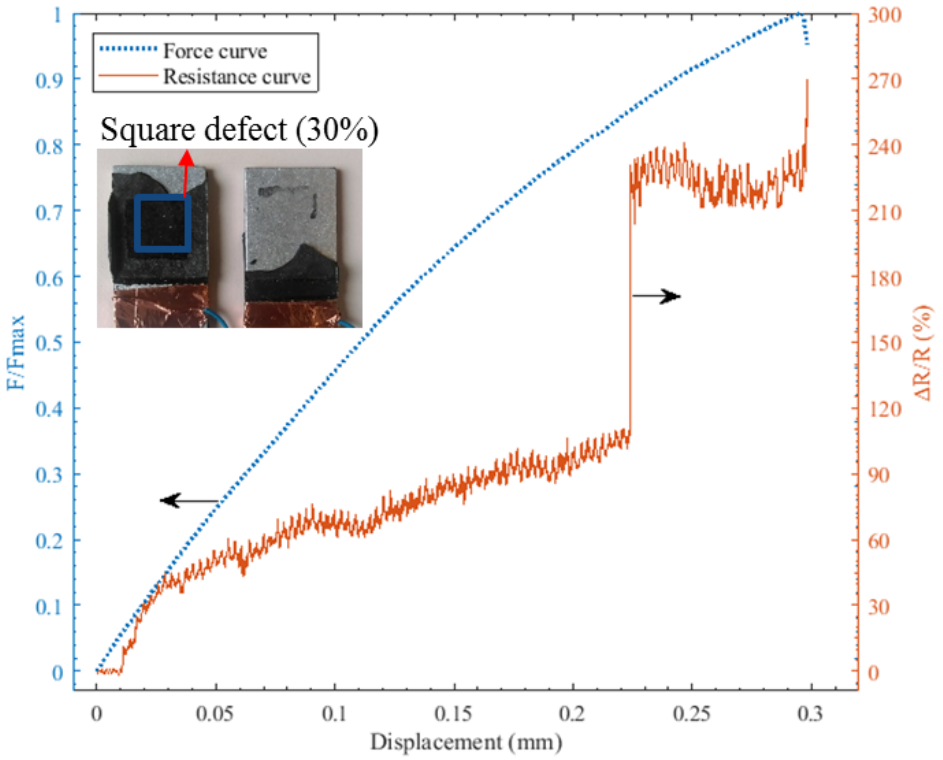

Fig. 5. Mechanical and electrical response of SLJ with adhesive layer with 9 wt.% CNT and 30% square defect area

شکل ۵: پاسخ الکتریکی و مکانیکی نمونه اتصال چسبی با ۹ درصد وزنی نانولوله کربنی همراه با نمایش سطح شکست اتصال با عیب ۳۰ درصد مربعی شکل

جدول ۲: تغییرات کلی مقاومت برای اتصال چسبی معیوب شامل عیب‌های مختلف دایره‌ای و مربعی

Table2. General Impedance change of defective adhesive joints with different circular and square defects

اندازه عیب	$\Delta R/R$ (%) در اتصال چسبی با عیب دایره‌ای	$\Delta R/R$ (%) در اتصال چسبی با عیب مربعی
٪۱۰	٪۱۸ (رشد ترک در چسب)	٪ ۳/۵ (جدایش در مرز میان زمینه و چسب)
٪۳۰	٪۱۵ (جدایش در مرز میان زمینه و چسب)	٪۲۲۰ (رشد ترک در چسب)
٪۷۰	٪۶ (رشد ترک در مرز عیب)	٪۷ (رشد ترک در مرز عیب)

تحلیل نمود. با افزایش بیشتر نیروی برشی در لایه چسب، شبکه‌های رسانای بیشتری متلاشی شده و ΔR/R نیز تقریبا به صورت پیوسته افزایش یافته است. این افزایش تا نقطه ۰/۲۳ میلی‌متر جابجایی برشی و ۸۰ درصد از اعمال نیرو، مشاهده شده است (شکل ۵). در این مقدار جابجایی برشی افزایش ناگهانی در نمودار ΔR/R مشاهده شده است که می‌تواند ناشی از سرعت بالای رشد ترک و یا پیشرفت سریع آسیب در اتصال باشد. با توجه به شکل ۵ با اینکه نیرو به صورت تقریبا خطی در حال افزایش است ولی ترک در اتصال چسبی ایجاد شده و در حال رشد می‌باشد ولی هنوز اتصال شکسته نشده و نیرو همچنان در حال افزایش می‌باشد، با این حال در منحنی تغییرات نسبی مقاومت، اثر رشد سریع ترک، به وضوح قابل‌مشاهده است که نشان‌دهنده بالابودن قابلیت حسگری لایه چسب است. با اعمال نیروی بیشتر، اتصال به

شکست خواهد رسید. هنگامی که گفته می‌شود، رشد ترک در داخل چسب اتفاق افتاده است یعنی بخش بزرگی از آسیب به صورت انتشار ترک در داخل چسب رشد کرده است، این بدان معنی نیست که آسیب در مرز میان زمینه فلزی و چسب رخ نداده است، بلکه تغییرات نسبی مقاومت متاثر از مکانیزم غالب پیشرفت آسیب بوده که به صورت انتشار ترک در چسب رخ داده است. به عنوان مثال انتشار ترک و تغییر جهت آن در هنگام رسیدن به مرز عیب مربعی ۳۰% ، عامل اصلی تغییرات عمده مقاومت در این اتصال چسبی معیوب بوده است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله نانوچسب نانولوله کربن- اپوکسی با استفاده از روش آلتراسونیک و با ۹ درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی آماده شد. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی، ریزساختار نانوماده مرکب مورد ارزیابی قرار گرفت؛ به طوری که توزیع اتفاقی و یکنواخت نانولوله کربنی چندجداره درون زمینه چسب اپوکسی مشاهده گردید. به این ترتیب رسانایی مناسب برای نانوچسب حاصل گردید. نتایج نشان داد که بیشترین تغییرات کلی مقاومت در نمونه اتصال چسبی حاوی نانوذرات نانولوله کربنی با اندازه عیب ۳۰ درصد مربعی اتفاق افتاده و بخش زیادی از پیشرفت آسیب به صورت انتشار ترک در چسب رسانا مشاهده شد. نتایج نشان داد که می‌توان از نانوچسب رسانا به عنوان یک حسگر برای پایش وضعیت مکانیزم شکست در اتصال چسبی استفاده نمود.

قدردانی و تشکر

بدین وسیله نویسندگان کمال قدردانی و تشکر خود را بابت حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور بابت پروژه شماره ۹۸۰۱۲۵۵۸ اعلام می نماید.

مراجع

[1] P. Ghabezi, M. Farahani, A. Shahmirzaloo, H. Ghorbani, N.M. Harrison, Defect evaluation of the honeycomb structures formed during the drilling process, International Journal of Damage Mechanics, Published online (2019).

[2] F. Heidarpour, M. Farahani, P. Ghabezi, Experimental investigation of the effects of adhesive defects on the single lap joint strength, International journal of adhesion and adhesives, 80 (2018) 128-132.

[3] K. Worden, E.J. Cross, N. Dervilis, E. Papatheou, I. Antoniadou, Structural health monitoring: from structures to systems-of-systems, IFAC-PapersOnLine, 48(21) (2015) 1-17.

[4] J. Suhr, N. Koratkar, P. Keblinski, P. Ajayan, Viscoelasticity in carbon nanotube composites, Nature materials, 4(2) (2005) 134.

[5] F. Gojny, M. Wichmann, U. Köpke, B. Fiedler, K. Schulte, Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content, Composites science and technology, 64(15) (2004) 2363-2371.

[6] M. Tabasi, M. Farahani, M. Givi, M. Farzami, A. Moharami, Dissimilar friction stir welding of 7075 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy using SiC nanoparticles. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 86(1-4) (2016) 705-715.

[7] C. Stetco, O. Sam-Daliri, L.-M. Faller, H. Zangl, Piezocapacitive Sensing for Structural Health Monitoring in Adhesive Joints, in: 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE, (2019) 1-5.

[8] F. Du, J.E. Fischer, K.I. Winey, Effect of nanotube alignment on percolation conductivity in carbon nanotube/polymer composites, Physical Review B, 72(12) (2005) 121404.

[9] B. Vigolo, C. Coulon, M. Maugey, C. Zakri, P. Poulin, An experimental approach to the percolation of sticky nanotubes, Science, 309(5736) (2005) 920-923.

[10] L. Wang, Z.-M. Dang, Carbon nanotube composites with high dielectric constant at low percolation threshold, Applied physics letters, 87(4) (2005) 042903.

[11] P. Ghabezi, M. Farahani, Trapezoidal traction–separation laws in mode II fracture in nano-composite and nano-adhesive joints. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 37(11) (2018) 780-794.

[12] O. Sam-Daliri, L.-M. Faller, M. Farahani, A.

[21] M. Moniruzzaman, K.I. Winey, Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes, Macromolecules, 39(16) (2006) 5194-5205.

[22] L. Vertuccio, L. Guadagno, G. Spinelli, P. Lamberti, V. Tucci, S. Russo, Piezoresistive properties of resin reinforced with carbon nanotubes for health-monitoring of aircraft primary structures, Composites Part B: Engineering, 107 (2016) 192-202.

[23] A. Bouhamed, A. Al-Hamry, C. Müller, S. Choura, O. Kanoun, Assessing the electrical behaviour of MWCNTs/ epoxy nanocomposite for strain sensing, Composites Part B: Engineering, 128 (2017) 91-99.

[24] P. Ghabezi, M. Farahani, Characterization of cohesive model and bridging laws in mode I and II fracture in nano composite laminates. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 12(4) (2018) 4329-4355.

[25] M. Khoran, P. Ghabezi, M. Frahani, M. Besharati, Investigation of drilling composite sandwich structures. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 76(9-12) (2015) 1927-1936.

[26] O. Sam-Daliri, L.-M. Faller, M. Farahani, A. Roshanghias, A. Araee, M. Baniassadi, H. Oberlercher, H. Zangl, Impedance analysis for condition monitoring of single lap CNT-epoxy adhesive joint, International Journal of Adhesion and Adhesives, 88 (2019) 59-65.

[27] S. Yu, M.N. Tong, G. Critchlow, Wedge test of carbon-nanotube-reinforced epoxy adhesive joints, Journal of Applied Polymer Science, 111(6) (2009) 2957-2962.

[28] E.T. Thostenson, T.W. Chou, Carbon nanotube networks: sensing of distributed strain and damage for life prediction and self healing, Advanced Materials, 18(21) (2006) 2837-2841.

[29] L. Nunes, Mechanical characterization of hyperelastic polydimethylsiloxane by simple shear test, Materials Science and Engineering: A, 528(3) (2011) 1799-1804.

Roshanghias, H. Oberlercher, T. Mitterer, A. Araee, H. Zangl, MWCNT–epoxy nanocomposite sensors for structural health monitoring, Electronics, 7(8) (2018) 143.

[13] J.N. Coleman, U. Khan, W.J. Blau, Y.K. Gun'ko, Small but strong: a review of the mechanical properties of carbon nanotube–polymer composites, Carbon, 44(9) (2006) 1624-1652.

[14] D.D. Chung, Self-monitoring structural materials, Materials Science and Engineering: R: Reports, 22(2) (1998) 57-78.

[15] O. Sam Daliri, A. Vatani, A. Bozorgmehr, Investigation of the strain sensing sensitivity of the CNT-epoxy nanocomposite via changes in electrical resistance, Aerospace Knowledge and Technology Journal, 8(1) (2019) 73-81 (In Persian).

[16] O. Daliri, M. Farahani, M. Farhang, A combined numerical and statistical analysis for prediction of critical buckling load of the cylindrical shell with rectangular cutout, Engineering Solid Mechanics, 7(1) (2019) 35-46.

[17] O. Sam Daliri, M. Farahani, Characterization of Stress Concentration in Thin Cylindrical Shells with Rectangular Cutout Under Axial Pressure, ADMT Journal, 10(2) (2017) 133-141.

[18] C. Li, E.T. Thostenson, T.-W. Chou, Sensors and actuators based on carbon nanotubes and their composites: a review, Composites science and technology, 68(6) (2008) 1227-1249.

[19] E.T. Thostenson, T.W. Chou, Carbon nanotube networks: sensing of distributed strain and damage for life prediction and self healing, Advanced Materials, 18(21) (2006) 2837-2841.

[20] M. R. Hajideh, M. Farahani, N. M. Ramezani, Reinforced dissimilar friction stir weld of polypropylene to acrylonitrile butadiene styrene with copper nanopowder. Journal of Manufacturing Processes, 32 (2018) 445-454.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

O. Sam-Daliri, M. Farahani, Condition monitoring of defective single lap adhesive joint using carbon nanotubes, AmirKabir J. Mech Eng., 53(special issue 2) (2021) 1321-1330.

DOI: 10.22060/mej.2019.16939.6479

این صفحه عمداً خالی است