



Thermal Conductivity Enhancement of Epoxy Adhesives Using Boron Nitride and Alumina Ceramic Fillers

Sajede Aghasi¹, Seyed Hassan Jafari², Mahdi Golriz^{*3}

Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 2, No. 2, pp.: 103-114
2022

DOI:

10.22034/jsssta.2022.327782.1067

Article Info

Received: 2022-2-2
Accepted: 2022-11-30

Keywords

Thermal diffusivity, Epoxy
adhesive, Ceramic fillers,
Boron Nitride, Alumina,
Thermal conductivity

How to Cite this article

Sajede Aghasi, Seyed Hassan Jafari, Mahdi Golriz, "Thermal Conductivity Enhancement of Epoxy Adhesives Using Boron Nitride and Alumina Ceramic Fillers". *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 2 (2), p.: 103-114, 2023.

1. Polymer Group, Department of Chemical Engineering,
University of Tehran, Tehran, Iran, m.golriz@isrc.ac.ir

2. Polymer Group, Department of Chemical Engineering,
University of Tehran, Tehran, Iran, shjafari@ut.ac.ir

3. Space Transportation Research Institute, Tehran, Iran,
M.Golriz@isrc.ac.ir, Corresponding Author

Abstract

One of the methods for improving thermal conductivity of epoxy adhesives is the incorporation of conductive ceramic, metal or carbon fillers. As the main goal of this research is to improve the thermal conductivity of epoxy resin and keep its electrical insulating property, the effect of Alumina (Al_2O_3) ceramic filler individually, and in combination with Boron Nitride (BN) ceramic filler with high thermal conductivity and electrical resistivity is investigated. Scanning Electron Microscopy (SEM) observations showed a proper dispersion and an acceptable connection between fillers. The results of the thermal diffusivity measurements revealed that by incorporating conductive ceramic fillers, either individually or in combination, regardless of the type of the hardener, thermal diffusivity would increase due to the formation of thermal conductive networks. Although, in hybrid system, because of bridging effect between particles, thermal diffusivity will notably increase; therefore, using hybrid system of Alumina/BN along with long chain polyamine curing agent is a suitable choice for the preparation of thermally conductive yet electrically insulating epoxy adhesives in space industries. The results showed that the thermal conductivity of hybrid system of Alumina/BN has raised to 1.7 (W/mK), which is about 0.4 (W/mK) for epoxy system without filler. The most important achievement of this research is to achieve proper thermal conductivity while keeping mechanical properties, dielectric constant, and lap shear strength of Alumina/BN hybrid system within acceptable range of thermal conductive adhesive for space applications.



دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

بهبود رسانایی حرارتی چسب‌های اپوکسی با استفاده از فیلهای سرامیکی بورنیتريد و آلومينا

ساجده آقاسی^۱، سيد حسن جعفری^۲، مهدی گل‌ریز^{۳*}

۱. گروه پلیمر، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، m.golriz@isrc.ac.ir

۲. گروه پلیمر، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، shjafari@ut.ac.ir

۳. پژوهشکده سامانه های حمل و نقل فضایی، تهران، ایران M.Golriz@isrc.ac.ir (نویسنده مسئول)

دو فصلنامه

علوم، فناوری و

کاربردهای فضایی

سال دوم، شماره ۲، صفحه ۱۱۴-۱۰۳
پاییز و زمستان ۱۴۰۱

DOI:

10.22034/jssta.2022.327782.1067

چکیده

یکی از راهکارهای بهبود رسانایی حرارتی چسب‌های اپوکسی، استفاده از فیلهای رسانای سرامیکی، فلزی یا کربنی است. از آن‌جا که هدف اصلی این پژوهش، بهبود رسانایی حرارتی رزین اپوکسی و حفظ خاصیت عایق الکتریسیته آن است، تاثیر فیلر سرامیکی آلومینا به تنهایی و به صورت ترکیبی با فیلر سرامیکی بورنیتريد بر رسانایی حرارتی چسب‌های اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهدات انجام‌شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، نشان از پخش مناسب ذرات و اتصال آن‌ها به یکدیگر دارد. نتایج حاصل از آزمون نفوذ حرارتی نشان داد که با وارد کردن فیلهای رسانای سرامیکی به ماتریس اپوکسی چه به صورت تکی و چه به صورت ترکیبی، فارغ از نوع سیستم پخت مورد استفاده، نفوذ حرارتی به علت تشکیل شبکه‌های رسانای حرارتی افزایش می‌یابد. اگرچه سیستم هیبریدی، به علت پدیده پل‌زنی میان ذرات، سبب افزایش چشم‌گیر نفوذ حرارتی می‌شود؛ بنابراین، استفاده از سیستم هیبریدی آلومینا/بورنیتريد، به همراه عامل پخت پلی-آمین بلند زنجیر، انتخابی مناسب برای ساخت چسب‌های اپوکسی رسانای حرارت و عایق الکتریسیته، در صنایع فضایی است. نتایج نشان داد، ضریب رسانایی حرارتی چسب هیبریدی آلومینا/بورنیتريد به مقدار ۱/۷ وات بر متر بر کلون رسیده است که این مقدار برای سیستم اپوکسی بدون فیلر حدود ۰/۴ وات بر متر بر کلون است. مهم‌ترین دستاورد در این پژوهش، دستیابی به خواص رسانایی حرارتی مناسب با حفظ خواص مکانیکی، ثابت دی الکتریک و استحکام برشی سیستم چسب هیبریدی در محدوده مجاز چسب‌های هادی حرارتی با کاربردهای فضایی است.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۹

واژه‌های کلیدی

ضریب نفوذ حرارتی، چسب اپوکسی،
فیلهای سرامیکی، بورنیتريد،
آلومینا، رسانایی حرارتی

نحوه استناد به این مقاله

ساجده آقاسی، سيد حسن جعفری،
مهدی گل‌ریز. "بهبود رسانایی حرارتی
چسب‌های اپوکسی با استفاده از
فیلهای سرامیکی بورنیتريد و آلومینا".
دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای
فضایی، جلد دوم، شماره دوم، صفحات
۱۱۴-۱۰۳، ۱۴۰۱.

۱-مقدمه

مدیریت گرما یکی از چالش‌های مهم در فناوری‌های اخیر به شمار می‌آید، چراکه با کوچک شدن دستگاه‌های الکترونیکی و عملکرد آن‌ها در فرکانس و شرایط توانی بالا، حرارت زیادی در حین کار تولید می‌شود که در صورت عدم اتلاف حرارتی گرمای تجمع یافته، عملکرد نادرست یا خراب شدن قطعه دور از انتظار خواهد بود [۱].

چسب‌های اپوکسی یکی از موادی هستند که به علت چسبندگی مناسب به سطوح مختلف، استحکام مکانیکی (کششی، خمشی، فشاری)، مقاومت شیمیایی، مقاومت خستگی و مقاومت خوردگی بالا، فرایندپذیری قابل کنترل و کاهش ابعادی^۱ بسیار کم [۲] مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما پایین بودن ضریب هدایت حرارتی و بالابودن چگالی اتصالات عرضی پس از پخت [۳] که به ترتیب منجر به افزایش دمای موضعی قطعه و شکنندگی آن‌ها می‌شود، کاربرد این چسب‌ها را محدود کرده است.

به منظور بهبود رسانایی حرارتی رزین اپوکسی و به طور کلی پلیمرها، دو راهکار پیشنهاد می‌شود: (۱) تغییر طراحی مولکولی یا سنتز شیمیایی پلیمری با کارکردهای مد نظر و (۲) کامپوزیت-سازی با افزودن فیلهای رسانا. از آن‌جا که روش اول نیازمند صرف زمان و هزینه زیاد است، عمدتاً روش دوم مورد توجه صنایع مختلف قرار گرفته است [۴]. فیلهای رسانا بسته به نوع هندسه-شان می‌توانند یک، دو و سه بعدی و بر مبنای خانواده خود [۵]، به فیلهای سرامیکی، کربنی و فلزی تقسیم‌بندی شوند. رسانایی حرارتی فیلهای از طریق حالت^۲ انتقال حرارت در آن‌ها قابل تعیین است [۶]. انتقال حرارت در فیلهای کربنی و فلزی، از طریق حرکت حامل‌های بار (الکترون‌ها) و انتقال فونون‌ها ($k_e + k_p$) است. از این‌رو، دارای رسانایی حرارتی و الکتریکی هستند و در کاربردهایی که رسانایی الکتریکی، معضلی برای مدار ایجاد نکند (همانند اتصال کوتاه در مدارهای الکتریکی)، مورد استفاده قرار می‌گیرند. انتقال حرارت در فیلهای سرامیکی تنها از طریق انتقال فونون‌ها (k_p) انجام می‌شود، بنابراین، تنها دارای رسانایی حرارتی بوده و رسانایی الکتریکی ندارند و بیش‌تر در کاربردهای بسته‌بندی

میکروالکترونیک^۳ و بردهای مدار چاپی^۴ کاربرد دارند [۷-۱۱]. در پژوهشی، ون‌دونگ^۵ و همکاران [۱۲] به بررسی رسانایی حرارتی کامپوزیت‌های اپوکسی پر شده با فیلهای آلومینا و بورنیتريد پرداختند. در این مطالعه، فیلر آلومینا شبکه اصلی انتقال حرارت را تشکیل داده و فیلر بورنیتريد در بین فیلهای آلومینا قرار می‌گیرد. از آن‌جا که بورنیتريد دارای ساختار غیرایزوتروپ بوده و جهت‌گیری آن در رسانایی حرارتی نهایی کامپوزیت موثر است، این محققان تلاش کردند تا با تنظیم درصد فیلر، جهت‌گیری این ذرات را کنترل کنند. مشاهده شد که با افزودن ۳.۶۳٪ و ۵.۳۲٪ درصد وزنی فیلر بورنیتريد به کامپوزیت حاوی ۷۲.۶۹٪ درصد وزنی فیلر آلومینا، رسانایی حرارتی از ۲.۷۷ W/mK به ۳.۳۵ و ۴.۴۴ W/mK می‌رسد. در این حالت، به علت جهت‌گیری تصادفی فیلهای بورنیتريد، انتقال حرارت بیش‌تر در جهت صفحات بورنیتريد اتفاق می‌افتد و از آن‌جا که رسانایی حرارتی جهت صفحات این فیلر بیش‌تر از انتقال حرارت در جهت عرض صفحات آن است ۴۰۰ W/mK در مقابل ۲ W/mK، رسانایی حرارتی بهبود می‌یابد اما با افزایش مقدار فیلر بورنیتريد به ۶.۳۲٪ حجمی، به علت تغییر جهت‌گیری آن‌ها از حالت تصادفی به منظم، انتقال حرارت بیش‌تر در عرض صفحات صورت گرفته، بنابراین، رسانایی حرارتی با وجود افزایش مقدار فیلر بورنیتريد کاهش یافته و به مقدار ۴.۰۵ W/mK می‌رسد. این محققان هم‌چنین علت افزایش رسانایی حرارتی در نمونه‌ها نسبت به رزین اپوکسی پایه را، رسانایی حرارتی بالای ذاتی فیلر آلومینا (۳۳ W/mK) و بورنیتريد (۴۰۰ W/mK) و تشکیل مسیرهای رسانایی حرارتی موثر به علت اتصال بین آن‌ها دانسته‌اند. یالسینکایا^۶ [۱۳] در پژوهش خود، به بررسی رسانایی حرارتی کامپوزیت‌های اپوکسی بورنیتريد در دماها و درصدهای متفاوت فیلر پرداخت. مشاهدات وی حاکی از آن بود که با افزایش دما از ۰ °C تا ۱۰۰ °C و افزایش درصد فیلر از ۰ تا ۲۰٪ وزنی، رسانایی حرارتی کامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. برای مثال، در کامپوزیت حاوی ۵٪ وزنی بورنیتريد، با افزایش دما از ۵۰ °C تا ۱۰۰ °C، رسانایی حرارتی این کامپوزیت از ۰.۲۲۵ W/mK به حدود ۰.۲۴ W/mK می‌رسد. هم‌چنین مشاهده شد که با افزودن مقدار زیادی از فیلر، به علت

4 Printed circuit board
5 Van-Dung
6 Yalcynkaya

1 Shrinkage
2 Mode
3 Microelectronic packaging

چقرمگی رزین اپوکسی پخت شده است. جمشیدی و همکاران [۱۷] نیز در پژوهش خود دریافتند که عامل پخت پلی‌اتر آمین، کرنش در شکست و چقرمگی را بهبود می‌دهد. هم‌چنین حضور دی‌سیان دی‌آمید^۶ به همراه پلی‌اتر آمین تاثیر هم‌افزایی در انعطاف‌پذیری رزین اپوکسی داشته است.

با بررسی نتایج حاصل از کارهای پژوهشی بر روی چسب‌های اپوکسی تاکنون می‌توان دریافت که علت روی آوردن به این ماده، چسبندگی مناسب آن به انواع زیرلايه‌ها، خواص مکانیکی عالی، قیمت مناسب و پایداری ابعادی و شیمیایی خوب آن است. اما، از نقاط ضعف در کاربردهای این چسب‌ها به عنوان عامل اتصال قطعات الکترونیکی، خاصیت عایق حرارتی و شکنندگی آن‌ها پس از پخت است که سبب افزایش دمای موضعی، آسیب رساندن به قطعات مجاور و کاهش انعطاف آن‌ها می‌شود. به همین سبب، به منظور حفظ کاربرد چسب‌های اپوکسی، بهبود رسانایی حرارتی و بهبود چقرمگی آن‌ها، امری مهم تلقی می‌شود. به علاوه، با توجه به کاربرد این چسب‌ها در اتصالات قطعات الکترونیکی و سازه‌های فضایی، مطالعه و پژوهش در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. آنچه به عنوان ادامه مسیر تحقیق در این کار پژوهشی مورد نظر واقع شد، استفاده از یک سیستم هیبریدی با حداکثر میزان بارگیری فیلر جامد و حفظ قابلیت جریان‌یابی چسب است. با توجه به کاربردی بودن این پژوهش، مسئله مقرون به صرفه بودن از نظر اقتصادی نیز از دیگر عوامل موثر در طراحی نمونه‌ها است. بنابراین، با انتخاب صحیح فیلر و دانه‌بندی آنها سعی می‌شود، با حفظ خواص جریان‌یابی، خواص مکانیکی و عایق بودن از نظر الکتریکی، چسبی با هدایت حرارتی بالا و چسبندگی مناسب تولید شود.

در پژوهش حاضر، از دو فیلر سرامیکی بورنیتريد و آلومینا با مورفولوژی‌های متفاوت به منظور بهبود رسانایی حرارتی چسب-های اپوکسی استفاده شده است. علت استفاده از فیلر بورنیتريد، رسانایی حرارتی ذاتی و مقاومت الکتریکی بالا، چگالی کم (2.27 g/cm^3) و پایداری حرارتی [۲۰] و ابعادی [۲۱] بالای این ماده است. هم‌چنین، فیلر بورنیتريد نسبت به واکنش با اکثر مواد سرامیکی خنثی عمل کرده و امکان تهیه کامپوزیت‌های ترکیبی

انرژی سطحی بالا و ترشوندگی ضعیف این ذرات توسط ماتریس، توزیع فیلرها به طور یکنواخت اتفاق نمی‌افتد و به سبب تشکیل خوشه‌های متراکم، از تشکیل شبکه‌های حرارتی موثر و افزایش رسانایی حرارتی جلوگیری می‌شود. یتگین^۱ و همکاران [۱۴] به بررسی تاثیر فیلرهای بورنیتريد و آلومینا بر بهبود رسانایی حرارتی رزین اپوکسی پرداختند. مشاهده شد که با افزودن فیلر، به علت رسانایی حرارتی بالای این ذرات و ایجاد مسیرهای حرارتی رسانا، رسانایی حرارتی افزایش می‌یابد. برای مثال، با افزایش درصد بورنیتريد از ۱۰٪ به ۲۰٪ وزنی، رسانایی حرارتی از 0.26 W/mK به 0.32 W/mK می‌رسد. به علاوه، با استفاده از سیستم هیبریدی، به علت تاثیر هم‌افزای فیلرها و قرارگیری نانوذرات آلومینا بین صفحات اتصال نیافته بورنیتريد و کاهش فاصله بین آن‌ها، رسانایی حرارتی افزایش می‌یابد. هم‌چنین مشاهده شد که در این سیستم-ها، تنها افزودن بورنیتريد در افزایش رسانایی حرارتی موثر نیست چراکه در ترکیب درصد ۲۲/۵٪ وزنی بورنیتريد و ۷.۵٪ وزنی آلومینا، رسانایی حرارتی 0.35 W/mK است اما در ترکیب درصد ۲۴٪ وزنی بورنیتريد و ۶٪ وزنی آلومینا، 0.34 W/mK است.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، یکی دیگر از موارد تهدید کاربرد رزین اپوکسی به عنوان چسب، شکنندگی آن پس از واکنش پخت است. یکی از روش‌های بهبود چقرمگی، رزین اپوکسی است [۱۵]. سو^۲ و همکاران [۱۵] در مطالعه‌ای، به بررسی تاثیر استفاده از عامل پخت دوجزیبی پلی‌آمید^۳ و پلی‌اتر آمین^۴ بر چقرمگی رزین اپوکسی پرداختند. مطالعات آن‌ها نشان داد که در هنگام واکنش رزین اپوکسی، به علت جدایی فازی ناشی از حضور این دو عامل پخت، چگالی اتصالات عرضی کاهش، کرنش در شکست افزایش (بالتر از ۱۰۰٪) و چقرمگی بهبود می‌یابد. مطالعات بسیاری بر بهبود چقرمگی رزین اپوکسی تمرکز داشته‌اند. استفاده از نانوذرات، آلیاژ کردن رزین اپوکسی با ترموپلاستیک‌هایی چون پلی‌پورتان^۵ [۱۶، ۱۷] یا رابرهای الاستومری^۶ چون CTBN [۱۸، ۱۹]، از روش‌های بهبود چقرمگی این رزین است. کاهش چگالی اتصالات عرضی و تنظیم ساختار شبکه‌ای رزین اپوکسی به کمک عوامل پخت نیز از دیگر روش‌های بهبود

5 Polyurethane
6 Elastomeric Rubbers
7 Dicyandiamide

1 Yetgin
2 Su
3 Polyamide
4 Polyether amine

کد نمونه	رزین اپوکسی (Wt%)	عامل پخت MTHP (Wt%)	عامل پخت Jeffamine (Wt%)	کاتالیزور BDMA (Wt%)	فیلر آلومینا (Wt%)	فیلر بورنیتريد (Wt%)
EP	۵۳,۲	۴۶,۲	۰	۰,۵	۰	۰
A0	۱۸,۶	۱۶,۲	۰	۰,۲	۶۵	۰
PEA	۶۰,۶	۰	۳۹,۴	۰	۰	۰
A1	۲۱,۲	۰	۱۳,۸	۰	۶۵	۰
A2	۱۸,۲	۰	۱۱,۸	۰	۷۰	۰
A3	۱۶,۷	۰	۱۲,۸	۰	۶۲,۵	۵

برای دستیابی به ویژگی‌های خاص با این فیلر وجود دارد [۲۲]. فیلر آلومینا نیز به علت قیمت مناسب، ساختار ایزوتروپ، رسانایی حرارتی و مقاومت الکتریکی بالا مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، تاثیر استفاد از دو هاردنر متیل تتراهیدروفتالیک انیدرید^۱ و پلی‌اترآمین بر چقرمگی فرمولاسیون‌های منظور، مورد بررسی قرار گرفته است. در این کار پژوهشی، انتخاب توزیع مناسب دانه‌بندی به طوری که بتواند بیش‌ترین بار جامد با حفظ خواص مکانیکی و چسبندگی از چسب حاصل شود، مد نظر قرار گرفت.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

رزین اپوکسی مورد استفاده در این پژوهش، دی‌گلاسیسیدیل اتر از بیس فنل F^۲ است. هاردنر پلی‌اترآمین^۳ و هاردنر متیل تتراهیدروفتالیک انیدرید^۴ به همراه شتاب‌دهنده بنزیل دی‌متیل آمین^۵ به‌عنوان سیستم پخت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. فیلرهای مورد استفاده، α -آلومینا^۶ (متوسط اندازه ذرات ۱/۷ میکرون و پهنای توزیع^۲، رسانایی حرارتی ۱۹-۳۰ W/mK، سطح ویژه ۲ m²/g، چگالی 3.80 g/cm³) و هگزاگونال بورنیتريد^۷ (متوسط اندازه ذرات ۱/۹۲ میکرون و پهنای توزیع ۲/۲۹، رسانایی حرارتی ۲۸۴-۲۶۶ W/mK، سطح ویژه ۱۷ m²/g، چگالی ۲.۲۵ g/cm³) هستند.

۲-۲- روش تهیه نمونه‌ها

کدگذاری نمونه‌ها به همراه ترکیب درصد مواد مورد استفاده در هر فرمولاسیون، در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به جدول، دو دسته نمونه ساخته شده‌اند: دسته اول، نمونه‌های پخت شده با عامل پخت MTHPA و شتاب‌دهنده BDMA (EP و A0) و نمونه‌های پخت شده با عامل پخت Jeffamine D400 (PEA تا A3).

جدول ۱. ترکیب درصد وزنی مواد مورد استفاده در فرمولاسیون

نمونه‌ها

ابتدا به منظور کاهش ویسکوزیته و افزایش فیلرپذیری رزین اپوکسی و عوامل پخت، این مواد به مدت ۸ ساعت، در آن در دمای ۶۰ °C حرارت می‌بینند، سپس برای آماده‌سازی نمونه‌ها به طریق زیر عمل می‌شود:

نمونه‌های دسته اول، به منظور تهیه نمونه EP، ۱۰۰ گرم از مجموع رزین، هاردنر MTHPA و شتاب‌دهنده BDMA به ترتیب با نسبت (۱۰۰/۸۷/۱) در یک بشر با حجم ۲۵۰ cm³ ریخته شده و به کمک همزن پره‌ای MINISTAR 20 (JKA، آلمان) به مدت ۱۰ دقیقه هم زده می‌شوند. دور همزن از ۱۰۰ rpm آغاز شده و به منظور ایجاد تنش برشی بالاتر برای همگن‌سازی موثر و شکسته شدن آگلومره‌های احتمالی، در انتهای اختلاط با افزایش ویسکوزیته به ۵۰۰ rpm می‌رسد. مخلوط آماده شده در قالب‌های استاندارد سیلیکونی که پیش‌تر به منظور جلوگیری از ایجاد حباب در گوشه‌ها و تسهیل جدایش نمونه‌ها پس از پخت، به ترتیب در آن در دمای ۶۰ °C حرارت دیده و به روغن سیلیکون آغشته شده بودند، ریخته می‌شوند و به منظور خروج حباب، به مدت ۳۰ دقیقه در آن خلا UNIVERSAL OVEN U (Mettler، آلمان) با مقدار خلا ۰.۴ torr قرار داده می‌شوند. با قطع خلا، واکنش پخت ابتدا به مدت ۱۰ ساعت و در دمای ۹۰ °C و پخت نهایی به مدت ۲ ساعت و در دمای ۱۲۰ °C انجام می‌شود.

برای تهیه نمونه A0، ۳۵ گرم از سیستم اپوکسی/انیدرید همانند شرایط قبل آماده و پس از اختلاط، فیلر آلومینا (مطابق جدول ۱) به تدریج به بشر اضافه شده و اختلاط به مدت ۲۰ دقیقه در همان دور ادامه می‌یابد.

5 BDMA, (Accelerator DY 062, Huntsman Advanced Materials)
6 α -Alumina, (NO 715-10, NABAOX®)
7 hBN, PT180, (Momentive Performance materials Inc)

1 Methyl Tetra Hydro Phthalic Anhydride (MTHPA)
2 Diglycidyl Ether of Bisphenol F (DGEF), (EPONTM Resin862, HEXIONTM)
3 Jeff amine® D400, (Huntsman Advanced Materials)
4 MTHPA, (Aradure® 917-1#, Huntsman Advanced Materials)

۲-۵- بررسی‌های کالریمتری

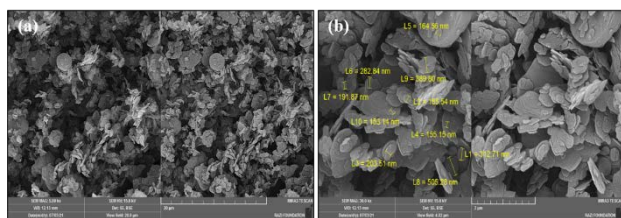
برای ارزیابی ظرفیت گرمایی ویژه (Cp) نمونه‌ها، از آزمون کالریمتری روبشی تفاضلی (DSC⁷)، به کمک دستگاه DSC822e (Mettler Toledo، ایالات متحده آمریکا)، به صورت غیر هم‌دمای تحت اتمسفر نیتروژن با دبی ۵۰ ml/min، از دمای ۳۰ °C تا ۹۰ °C، با نرخ حرارتی ۲۰ °C/min استفاده شد.

۲-۶- بررسی‌های خواص مکانیکی و چسبندگی

این آزمون با هدف بررسی تغییرات خواص مکانیکی رزین اپوکسی خالص و پس از فرمولاسیون به صورت چسب هادی حرارت است. این آزمون در مُد کششی با دستگاه (Table 50kN UNITED Testing Systems، کالیفرنیا) طبق استاندارد ASTM D638-14 با بارگذاری ۵۰۰۰ نیوتن، سرعت کششی ۵ mm/min و برای دو تا سه نمونه دمبلی (طول ۱۶۵ mm، عرض ۱۹ mm) برای هر فرمولاسیون انجام شد. استحکام چسبندگی برشی نمونه‌های پخت شده نیز با سرعت کششی ۵۰ mm/min انجام شد. زیرپایه‌های فلزی آلومینیومی برای تست peel، با حلال استون شسته شده تا عاری از هرگونه آلودگی باشند.

۳- نتایج و بحث

شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی (FESEM) فیلر میکروآلومینا و بورنیتريد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 1(a)، فیلرهای میکرو آلومینا دارای شکل بیضوی با متوسط اندازه ذرات ۱.۷ μm هستند.



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از فیلرهای (a) آلومینا و (b) بورنیتريد.

نمونه‌های دسته دوم، به منظور تهیه نمونه PEA، ۱۰۰ گرم از مجموع رزین و هاردنر Jeff amine D400 به ترتیب با نسبت (65/100) در بشر با حجم ۲۵۰ cm³ ریخته شده و همانند شرایط مشابه نمونه EP، آماده و پخت می‌شوند. برای تهیه نمونه A1، ۳۵ گرم از سیستم پخت همانند شرایط پیشین آماده و پس از اختلاط، فیلر آلومینا (مطابق جدول ۱) به تدریج به بشر اضافه شده و اختلاط به مدت ۲۰ دقیقه در همان دور ادامه می‌یابد.

۲-۳- بررسی‌های مورفولوژیکی

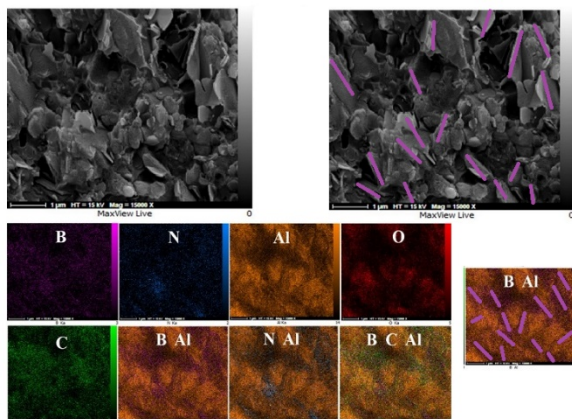
مورفولوژی فیلرها، مورفولوژی سطح مقطع نمونه‌های کامپوزیتی، میزان پخش ذرات به کار رفته در ماتریس، آنالیز عنصری و صفحه‌ای (Map) توسط میکروسکوپ‌های الکترونی نشر میدانی (FESEM^۱) مورد بررسی قرار گرفت. آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS^۲ یا EDX) با ولتاژ شتابنده ۱۵ keV^۳، جریان پرتو ۱۰۰۰ nA^۴ و بزرگ‌نمایی ۳۰۰^۵ و آزمون FESEM با دستگاه مدل MIRA3 (TESCAN، چک) انجام شد و آماده‌سازی نمونه‌ها با کمک پوشش طلا به ضخامت ۲۰ μm بود.

۲-۴- اندازه‌گیری ضریب نفوذ حرارتی

آزمون نفوذ حرارتی طبق استاندارد ASTM E1461 و با تابش زنون^۶ به کمک دستگاه XFA ۵۰۰ (Linseis، آلمان) با نرخ حرارت-دهی ۲ °C/min، از دمای ۲۵ °C تا دمای ۷۵ °C برای نمونه‌های EP و A0 و از دمای ۲۵ °C تا ۱۰۰ °C برای نمونه‌های PEA، A1، A2 و A3 در اتمسفر خلا (2*10⁻² bar) انجام شده است. برای هر فرمولاسیون، یک نمونه دیسکی به قطر ۲.۵۴ mm و ضخامت ۱ mm نیاز است. به منظور افزایش یکنواخت دمای سطح نمونه‌ها، از اسپری گرافیت استفاده می‌شود. نتایج به‌دست آمده، میانگین پنج داده آزمایشگاهی برای هر فرمولاسیون است.

5 Magnification
6 Xenon Flash
7 Differential Scanning Calorimetry

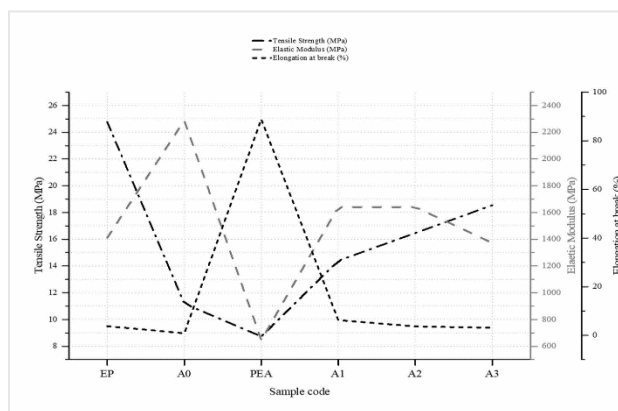
1 Field Emission Scanning Electron Microscope
2 Energy dispersive (X-ray) spectroscopy
3 Accelerating voltage
4 Beam current



شکل ۴. تصاویر آنالیز عنصری و Map در نمونه A3. خطوط پراکنده به رنگ بنفش مطابق با آنالیز اتم‌های B در آنالیز Map رسم شده‌اند. (تصویر B Al)

اندازه‌گیری خواص مکانیکی

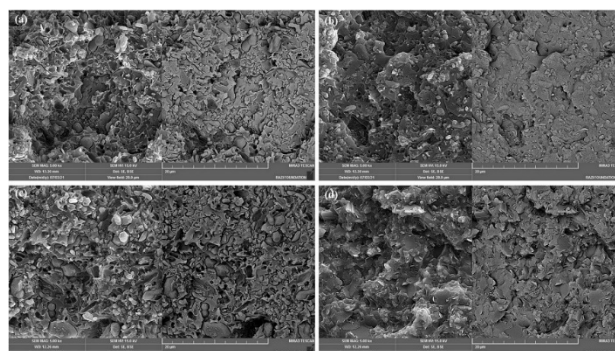
استحکام کششی، کرنش در شکست و مدول الاستیک نمونه‌ها از نتایج آزمون خواص مکانیکی است که در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. نتایج آزمون خواص مکانیکی نمونه‌ها: استحکام کششی (خط تیره نقطه)، مدول الاستیک (خط تیره کوتاه) و کرنش در شکست (خط تیره).

در مقایسه دو نمونه EP و A0 که هر دو دارای عامل پخت اندریدی MTHPA هستند، با افزودن ۶۵٪ وزنی فیلر میکروآلومینا در نمونه A0، استحکام کششی رزین اپوکسی از

شکل (b) ۱ نیز تصویر FESEM فیلر بورنیتريد را نشان می‌دهد. با توجه به آن، این فیلرها به صورت صفحه‌ای و دو بعدی بوده و سبب ایجاد تماس صفحه‌ای با ماتریس می‌شوند. با توجه به نتایج FESEM، ملاحظه می‌شود که این فیلرها دارای ابعاد در حد نانومتر هستند. شکل ۲، تصاویر FESEM نمونه‌های A0، A1، A2 و A3 را مقایسه می‌کند.



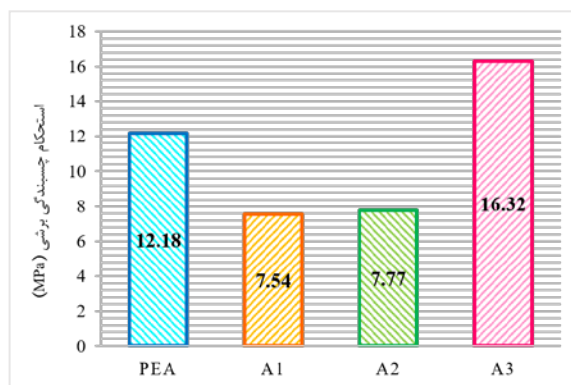
شکل ۲. تصاویر FESEM نمونه‌های A0 (a)، A1 (b)، A2 (c) و A3 (d)

در خصوص دو نمونه A0 و A1، مشاهده می‌شود که پخش ذرات آلومینا به خوبی در داخل ماتریس صورت گرفته است. این بررسی با توجه به تصاویر آنالیز عنصری و Map صورت گرفته قابل مشاهده است. فیلر آلومینا دارای تعداد زیادی گروه هیدروکسیلی بوده که می‌توانند با گروه‌های هیدروکسیلی یا آمینی در سیستم دو جزئی اپوکسی و عامل پخت، پیوند هیدروژنی و کوآلنسی برقرار کنند (شکل 4(a) [۲۳])؛ بنابراین، پخش مناسب ذرات می‌تواند به علت وجود پیوندهای هیدروژنی و بهبود برهم‌کنش فیلر و ماتریس باشد.

با توجه به تصویر FESEM نمونه A2، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد فیلر میکروآلومینا از ۶۵٪ به ۷۰٪ وزنی، فیلرها به یکدیگر فشرده‌تر شده و با کاهش فاصله بین فیلرها، مسیر آزاد متوسط فونون‌ها به عنوان حاملان اصلی انرژی، طولانی‌تر می‌شود. شکل (d) ۲ نیز تصویر FESEM نمونه A3 را نشان می‌دهد. با توجه به آن، فیلرهای میکروآلومینا (ذرات درشت)، شبکه اصلی انتقال حرارت را تشکیل داده و فیلرهای بورنیتريد در میان آن‌ها پخش شده‌اند (شکل ۴).

مقادیر استحکام چسبندگی برشی

به منظور بررسی میزان استحکام چسب‌های متصل به زیرلایه‌های فلزی، از آزمون Lap Shear Strength با نام اختصاری LSS مطابق استاندارد ASTM D1002 استفاده می‌شود. بر طبق این استاندارد، یک تیغه فلزی به‌عنوان زیرلایه مورد استفاده قرار می‌گیرد که می‌تواند از جنس فولاد ضدزنگ، آلومینیوم، مس، برنج، پلی-کربنات، یا ABS باشد. در این تیغه، ابتدا مساحت برش^۱، طبق شکل زیر برحسب in^2 یا cm^2 محاسبه شده و انتهای هر دو تیغه در قسمت کششی دستگاه قرار می‌گیرد. سپس نیرویی با نرخ کنترل شده (1200-1400 psi/minute) بر نمونه اعمال می‌شود تا شکست اتفاق بیفتد. در این حالت، ماکزیم نیرو و نوع شکست مشخص می‌شود. تنش برشی ماکزیم با تقسیم نیروی ماکزیم بر مساحت برش به‌دست می‌آید که برحسب kg/cm^2 یا psi است. شکست نیز می‌تواند جدا شدن چسب از زیرلایه^۲ یا شکست در خود چسب^۳ یا هر دو حالت باشد.



شکل ۶. نتایج آزمون lap shear strength نمونه‌های پخت شده با Jeffamine D400

نتایج بررسی‌های نفوذ حرارتی

جدول ۲، نتیجه آزمون نفوذ حرارتی نمونه‌های EP و A0 را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزودن ۶۵٪ وزنی فیلر رسانای آلومینا به رزین اپوکسی پخت شده با هاردنر MTHPA، در هر

۲۴.۷۷ Mpa به ۱۱.۱۹ MPa کاهش و کرنش در شکست، از ۳.۷۵٪ به ۰.۸۵٪ کاهش می‌یابد. در مقایسه دو نمونه EP و PEA ملاحظه می‌شود که استحکام کششی از ۲۴.۷۷ Mpa به ۸/۷۳ کاهش، کرنش در شکست از ۳.۷۵٪ به ۰.۸۸٪ افزایش می‌یابد. علت تفاوت چشم‌گیر در خواص مکانیکی این دو نمونه، استفاده از عوامل پخت متفاوت در تهیه آن‌ها است.

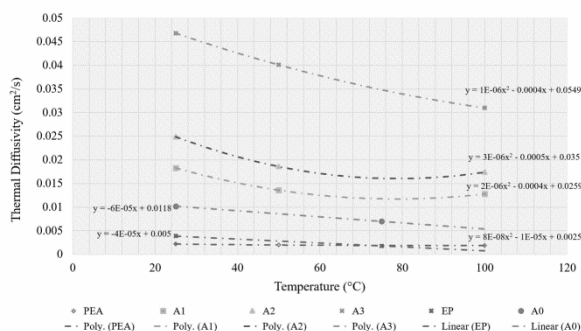
در مقایسه نمونه‌های PEA، A1، A2 و A3 با عامل پخت یکسان و درصد فیلرهای متفاوت، ملاحظه می‌شود که با افزودن فیلر و استفاده از سیستم هیبریدی، استحکام کششی افزایش، کرنش در شکست کاهش، مدول ینگ ابتدا افزایش و سپس به‌صورت تدریجی کاهش می‌یابد. علت این موضوع می‌تواند پخش بهتر ذرات فیلر در ماتریس اپوکسی پخت شده با هاردنر آمینی باشد که توسط تصاویر SEM اثبات شد. با توجه به ساختار عوامل پخت که پیش‌تر بررسی شد، عامل پخت Jeff amine D400، دارای اتم-های الکترونگاتیو بیش‌تری در مقایسه با هاردنر MTHPA است. بنابراین، انتظار می‌رود برهم‌کنش فیلرها با ماتریس (چون اتصالات هیدروژنی) بیش‌تر باشد و از این‌رو، پخش فیلرها و چسبندگی آن‌ها به ماتریس بهبود و در نتیجه استحکام سطح مشترک [۲۳] و استحکام کششی افزایش می‌یابد. حضور فیلر بورنیتريد در نمونه A3 منجر به تماس صفحه‌ای این فیلر با ماتریس و جلوگیری از رشد ترک توسط این فیلرها می‌شود و به بهبود استحکام کششی نمونه‌ها کمک کرده‌است اما از طرفی به علت سطح ویژه بالای خود سبب کاهش بیشتر کرنش در شکست نمونه‌ها شده است. هم-چنین، استحکام کششی نمونه‌های مذکور از نمونه EP کم‌تر است که این موضوع، به علت حضور هاردنر پلی‌اتر آمین و تاثیر آن بر خواص مکانیکی است که پیش‌تر توضیح داده شد. حضور فیلرها هم‌چنین سبب تحدید حرکت زنجیرها و جلوگیری از حرکت آن‌ها و کاهش کرنش در شکست نمونه‌ها شده‌اند. با وجود اینکه حضور فیلر موجب کاهش ازدیاد طول در شکست و در نتیجه کاهش ضربه‌پذیری شده اما در نمونه پلی‌اتر آمین با کاهش ازدیاد طول در شکست در اثر وجود فیلر باز محدودده کرنش به دست آمده در محدوده مجاز چسب گرید فضایی (طبق دیتا شیت چسب خارجی ازدیاد طول در نقطه شکست حدود ۲ درصد است) قرار گرفت.

3 Cohesive

1 Shear area
2 Adhesive

آلومینا، بهبود انتقال فونون‌ها و افزایش چشم‌گیر نفوذ حرارتی می‌شود.

شکل ۷، وابستگی نفوذ حرارتی نمونه‌ها نسبت به دما (طیف XFA) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش دما، نفوذ حرارتی کاهش می‌یابد. علت این موضوع، پدیده پخش فونون است که تابع دماست. هنگامی که دما افزایش می‌یابد، طول موج فونون‌ها طبق قانون جابه‌جایی وین^۱ کاهش و فرکانس و انرژی جنبشی آن‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش انرژی جنبشی فونون‌ها و افزایش پدیده پخش فونون، مسافت آزاد متوسط فونون‌ها و در نتیجه نفوذ حرارتی کاهش می‌یابد [۶].



شکل ۷. طیف XFA نمونه‌ها (مقادیر نفوذ حرارتی نمونه‌های EP و A۰ در دمای ۱۰۰ °C برون‌یابی شده‌اند)

نتایج رسانایی حرارتی

با توجه به نتایج حاصل از نفوذ حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی نمونه‌ها، می‌توان رسانایی حرارتی نمونه‌ها را به کمک معادله ($K = \alpha \rho C_p$) محاسبه کرد. جدول ۴، نتایج این محاسبات را نشان می‌دهد.

دما، نفوذ حرارتی نسبت به رزین اپوکسی پایه افزایش می‌یابد. البته این روند در همه نمونه‌ها مشاهده می‌شود و نکته مهم، میزان افزایش مقادیر در مقایسه با دیگر کارهای پژوهشی است که در ادامه آورده شده است.

جدول ۲. نتایج آزمون نفوذ حرارتی نمونه‌های EP و A0

Temperature	۲۵ ° C		۷۵ ° C	
Sample code	A0	EP	A0	EP
(cm ² /s) $\bar{\alpha}$	0.0102	0.0039	0.0077	0.0018

جدول ۳، نتایج آزمون نفوذ حرارتی نمونه‌های PEA، A1، A2 و A3 را نشان می‌دهد. در خصوص این نمونه‌ها نیز مشاهده می‌شود که در هر دما، با افزودن ۶۵٪ و ۷۰٪ وزنی فیلر آلومینا و ۶۷/۵٪ وزنی سیستم هیبریدی، نفوذ حرارتی نسبت به رزین اپوکسی پایه افزایش می‌یابد.

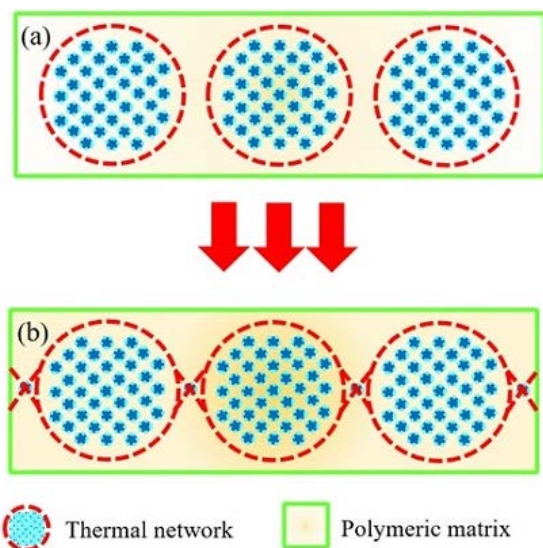
جدول ۳. نتایج آزمون نفوذ حرارتی نمونه‌های PEA، A1، A2 و A3

Temperature	۲۵ ° C			
Sample code	A3	A2	A1	PEA
(cm ² /s) $\bar{\alpha}$	0.0468.0	0.0249	0.0183	0.0022.

جدول ۳. نتایج آزمون نفوذ حرارتی نمونه‌های PEA، A1، A2 و A3 (ادامه)

Temperature	50 ° C			
Sample code	A3	A2	A1	PEA
(cm ² /s) $\bar{\alpha}$	0.0401	0.0186	0.0136	0.0022

نمونه A3 دارای حداکثر مقدار نفوذ حرارتی در مقایسه با سه نمونه دیگر است. این موضوع به علت بالاتر بودن ضریب رسانای حرارتی ذاتی فیلر بورنیتريد نسبت به فیلر آلومینا، شکل صفحه‌ای و سایز کوچک‌تر فیلرهای بورنیتريد و ایجاد پدیده پل‌زنی [۲۳] است که سبب قرارگیری آن‌ها در میان فیلرهای اتصال نیافته



شکل ۸. شماتیک تاثیر میزان پرشدگی بر آستانه پرکولیشن حرارتی

علت کاهش رسانایی حرارتی نمونه A3 با استفاده از سیستم هیبریدی نسبت به نمونه A2 و A1، می‌تواند به موارد زیر مربوط باشد: (۱) مقدار فیلر آلومینای مورد استفاده در نمونه A2 و A1، برابر ۷۰٪ و ۶۵٪ وزنی است اما در نمونه A3، این مقدار کاهش یافته و به مقدار ۶۲.۵٪ وزنی می‌رسد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، حد رسیدن به پرکولیشن حرارتی در سیستم‌های مورد مطالعه، بین ۶۵ تا ۷۰٪ وزنی است و از آن‌جا که مقدار فیلر آلومینای مورد استفاده در نمونه A3، کمتر از آستانه پرکولیشن است، بنابراین، حتی استفاده از ۵٪ وزنی فیلر بورنیتريد با رسانایی حرارتی بالاتر، کاهش درصد فیلر آلومینا در این نمونه را جبران نکرده و رسانایی حرارتی آن، از نمونه‌های مذکور کمتر است (شکل ۸). (۲) از دیدگاه چگالی، از آن‌جا که چگالی فیلر آلومینا بیش‌تر از بورنیتريد است، کاهش درصد فیلر آلومینا سبب کاهش چگالی - نمونه A3 نسبت به نمونه A1 شده و از آن‌جا که رسانایی حرارتی با چگالی رابطه مستقیم دارد، کاهش چگالی نمونه A3، منجر به کاهش رسانایی حرارتی آن نسبت به نمونه A1 شده است. (۳) همان‌طور که در نتایج حاصل از ظرفیت گرمایی مشاهده شد، ظرفیت گرمایی نمونه A3 کمتر و به دنبال آن، رسانایی حرارتی آن کمتر از نمونه‌های A2 و A1 خواهد بود. به‌طور کلی، درخصوص پلیمرهای نیمه کریستالی، ظرفیت گرمایی ویژه دارای اهمیت

جدول ۴. مقادیر رسانایی حرارتی

Sample code	Volume fraction of filler(s)	Thermal diffusivity (cm ² /s)	C _p (J/g°C)	Density (g/cm ³)	Thermal Conductivity (W/mK)
EP	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰۴	۰.۹۹۰	۱.۲۱۲	۰.۴۵۶
A۰	۰.۳۶۸	۰.۰۰۱۰	۰.۶۶۰	۱.۹۰۰	۱.۳۵۴
PEA	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰۲	۱.۲۶۰	۱.۱۳۳	۰.۳۲۴
A۱	۰.۳۴۶	۰.۰۰۱۶	۰.۶۶۰	۱.۸۹۷	۱.۹۶۶
A۲	۰.۳۹۹	۰.۰۰۲۳	۱.۰۰۵	۱.۹۸۹	۴.۷۴۱
A۳	۰.۳۸۴	۰.۰۰۴۴	۰.۴۰۰	۱.۹۴۹	۱.۷۰۷

با توجه به نتایج حاصل، می‌توان گفت در مقایسه رسانایی حرارتی نمونه‌های اپوکسی خالص با کامپوزیت‌های پُر شده با فیلرهای رسانا، نمونه‌های پُر شده طبیعتاً رسانایی حرارتی بالاتری خواهند داشت که به علت استفاده از فیلرهای رسانا با رسانایی حرارتی بالاتر از ماتریس اپوکسی، تشکیل شبکه‌های رسانا توسط فیلرها و افزایش مسافت آزاد فونون‌ها است.

در مقایسه رسانایی حرارتی دو نمونه A1 و A2، نمونه A2 دارای رسانایی حرارتی بالاتری نسبت به A1 است. این موضوع به علت افزایش درصد فیلر آلومینا، تشکیل شبکه‌های موثرتر، پیوستگی شبکه‌های حرارتی ایجاد شده و بالاتر بودن ظرفیت گرمایی ویژه در این نمونه است. با توجه به افزایش ۱۴۱ درصدی رسانایی حرارتی نمونه A2 نسبت به نمونه A1، در حالی که تنها ۵٪ وزنی فیلر آلومینا اضافه شده است، می‌توان احتمال رسیدن شبکه‌های حرارتی به پرکولیشن حرارتی^۱ [۵] و تشکیل شبکه‌های سراسری انتقال حرارت در ماتریس پلیمری را تایید نمود.

در خصوص رسانایی حرارتی نمونه A3، مشاهده می‌شود که رسانایی حرارتی آن، از رسانایی حرارتی نمونه A0 بالاتر است. این موضوع، به علت استفاده از سیستم هیبریدی (آلومینا/ بورنیتريد) در نمونه A3 است. رسانایی حرارتی این نمونه اما از رسانایی حرارتی نمونه‌های A2 و A1 کمتر است. این موضوع، برخلاف مشاهدات مربوط به نفوذ حرارتی نمونه‌هاست. بنابراین، نفوذ حرارتی بالاتر به معنای رسانایی حرارتی بالاتر نخواهد بود؛ چراکه نفوذ حرارتی، فرایند تعادل حرارتی را کمی می‌کند اما رسانایی حرارتی، توانایی ماده در انتقال حرارت را بیان می‌نماید [۲۴].

1 Thermal percolation

است و نقش منفردی را در تعیین ضریب رسانایی حرارتی در محدوده‌ی دمایی ذوب پلیمر (دمای اتاق تا دمای ذوب) دارد [۵].

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و ولتاژ شکست دی‌الکتریک

برای جلوگیری از خرابی یا مداخله در مدار الکتریکی، مواد مورد استفاده باید خاصیت عایق الکتریسیته داشته باشند و به همین علت، ویژگی‌هایی چون مقاومت الکتریکی و ولتاژ شکست دی‌الکتریک در خصوص چسب‌های تهیه شده باید در این زمینه مورد بررسی قرار گیرد.

استحکام شکست دی‌الکتریک و مقاومت الکتریکی نمونه‌های EP، A2 و A3، به ترتیب مطابق استانداردهای ASTM D149 و ASTM D257 در دمای محیط و رطوبت ۴۱٪ و به کمک دستگاه سنجشگر عایق^۱ (Megger، ایالات متحده آمریکا) اندازه‌گیری شده‌اند. نتایج آزمون، در جدول ۵ نشان داده شده‌اند.

جدول ۵. نتایج آزمون مقاومت الکتریکی و ولتاژ شکست نمونه‌های

EP، A2 و A3

نام نمونه	مقاومت الکتریکی ($\Omega \cdot \text{cm}$)	ولتاژ شکست (kV/mm)
EP	1.92×10^9	> 10
A2	1.31×10^9	> 10
A3	1.15×10^9	> 10

با توجه به نتایج حاصل، مقاومت الکتریکی رزین اپوکسی خالص (EP)، برابر با $1.92 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ است، بنابراین، می‌تواند به عنوان یک ماده عایق الکتریسیته شناخته شود چراکه حداقل مقدار مقاومت الکتریکی مورد نیاز برای آن که یک ماده به عنوان عایق الکتریسته شناخته شود، $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ است [۲۵].

کامپوزیت‌های A2 و A3، مقاومت الکتریکی کم‌تری نسبت به رزین اپوکسی خالص نشان داده‌اند. مقادیر این مشخصه برای کامپوزیت‌های مذکور به ترتیب برابر $1.31 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ و $1.15 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ است. علت کاهش مقاومت الکتریکی، می‌تواند استفاده

از درصد بالای فیلر، تشکیل کلوخه و پدیده قطبش در فصل مشترک فیلر و ماتریس و در خود رزین اپوکسی باشد. هنگامی که میدان خارجی بر یک ماده عایق اعمال می‌شود، در اثر حرکت حاملان بار، قطبش اتفاق می‌افتد. این پدیده شامل سه نوع قطبش الکترونیک، قطبش دو قطبی و قطبش بین سطحی است. رزین اپوکسی یک ماده قطبی بوده که در آن، قطبش دوقطبی و الکترونیک مشاهده می‌شوند اما قطبش دو قطبی در آن بیش‌تر است. با افزودن فیلرها به ماتریس، قطبش بین سطحی در فصل مشترک فیلر و ماتریس ایجاد می‌شود. هم‌چنین، فیلرهای افزوده شده دارای اتم‌های الکترونگاتیو بوده که به قطبش دو قطبی کمک می‌کنند [۲۶]. بنابراین، هر سه نوع قطبش در کامپوزیت‌های ساخته شده مشاهده می‌شود. با ایجاد پدیده قطبش، ثابت دی‌الکتریک افزایش [۲۷] و مقاومت الکتریکی کاهش خواهد یافت. بنابراین، کاهش مقاومت الکتریکی نمونه‌های کامپوزیتی A2 و A3 با افزودن ۷۰٪ وزنی فیلر آلومینا و ۶۷.۵٪ وزنی سیستم هیبریدی فیلر (۶۲.۵٪ وزنی فیلر آلومینا + ۵٪ وزنی فیلر بورنیتريد) در مقایسه با کامپوزیت رزین اپوکسی خالص به علت پدیده مذکور دور از انتظار نخواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، استفاده از سیستم هیبریدی (آلومینا/ بورنیتريد) بر رسانایی حرارتی و استفاده از دو عامل پخت Jeffamine D400 و MTHPA بر چقرمگی چسب‌های اپوکسی موضوع مطالعه بود. مشاهده شد که "سیستم هیبریدی فیلرهای رسانا" با ایجاد خاصیت پل‌زنی و تشکیل شبکه‌های موثر رسانای حرارت و "عامل پخت Jeffamine D400" با تنظیم ساختار رزین پخت‌شده، کاهش پخش فونون‌ها و افزایش مسافت آزاد متوسط فونون‌ها، بر بهبود نفوذ حرارتی، رسانایی حرارتی، خواص مکانیکی و استحکام چسبندگی برشی چسب‌های اپوکسی تاثیر مثبتی نشان داده‌اند. برای مثال، رسانایی و نفوذ حرارتی رزین اپوکسی، به ترتیب از 0.324 W/mK و $0.002 \text{ cm}^2/\text{s}$ به 1.707 W/mK و $0.044 \text{ cm}^2/\text{s}$ برای نمونه حاوی ۶۷.۵٪ وزنی سیستم هیبریدی (۶۲.۵٪ وزنی فیلر آلومینا و ۵٪ وزنی فیلر بورنیتريد) رسیده است. استفاده از سیستم هیبریدی هم‌چنین در بهبود استحکام کششی

زمین آهنگ با استفاده از پوشش؛ فصلنامه علمی-پژوهشی علوم و فناوری فضایی، جلد ۱۰، شماره ۳، ص. ۳۵-۲۹، ۱۳۹۶.

- [9] Davis, V.A., Mandell, M.J., Cooke, D.C. Wheelock, Mateo, Payan, A. J.C.D. and Koga, K., "Comparison of Low Earth Orbit Wake Current Collection Simulation Using Nascap-2k, SPIS, and MUSCAT Computer Codes," IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.41, No.12, 2013.
- [10] G. Galgani, M. Antonelli, M. Bandinelli, E. Scione and E. Scorzafava, "Charging Analysis Approach on COSMO Skymed Second Generation Spacecraft," 2016 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC), Valencia, 2016, pp. 1-3.
- [11] Imhof, C. "Simulation of the Electrostatic Charging of the MetOp-SG Satellites in the Polar Auroral Zone," CEAS Space Journal, 2019.
- [12] Imhof, C., Mank, H., Lange, J., "Charging Simulations for a Low Earth Orbit Satellite with SPIS Using Different Environmental Input ", 14th Spacecraft Charging Technology Conference, ESA/ESTEC, Noordwijk, NL, 04-08 APRIL 2016.
- [13] Vania Jordanova Raluca Ilie Margaret Chen; "Ring Current Investigations: The Quest for Space Weather Prediction." 1st edition, Elsevier, 2020.
- [14] B. Thiébault, J. M. Velez, J. Forest, P. Sarrailh, "SPIS 6, User Manual", Version: 3, 2019.
- [15] M. M. Finckenor, Multilayer Insulation Material Guidelines, NASA, 1999
- [16] D. G. Gilmore, "Spacecraft Thermal Control Handbook Volume I: Fundamental Technologies", 2002.
- [17] Waets, F. Cipriani and S. Ranvier, "LEO Charging of the PICASSO Cubesat and Simulation of the Langmuir Probes Operation," IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 47, Issue 8, 3689-3698, 2019.
- [18] ECSS, Spacecraft Charging, ECSS-E-ST-20-06C, 2019.



COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

چسب‌های اپوکسی تاثیر به‌سزایی داشته و مقدار این مشخصه از ۸.۷۳ مگا پاسکال برای رزین اپوکسی خالص، به ۱۸.۵۵ مگا پاسکال برای نمونه حاوی سیستم هیبریدی می‌رسد. هم‌چنین، استفاده از مقدار زیادی از فیلر رسانا سبب رسیدن سیستم به پركولیشن حرارتی و افزایش چشم‌گیر رسانایی حرارتی می‌شود. برای مثال، رسانایی حرارتی نمونه حاوی ۷۰٪ وزنی فیلر آلومینا، با افزایش ۱۴.۶ برابری نسبت به رزین اپوکسی خالص، به ۴.۷۴ W/mK می‌رسد. به علاوه، استفاده از فیلرهای سرامیکی، خاصیت عایق الکتریسیته رزین اپوکسی را حفظ کرده و تاثیر منفی بر آن نداشته است. بنابراین، فیلرهای سرامیکی، انتخاب مناسبی برای ساخت چسب‌های رسانای حرارت و عایق الکتریسیته هستند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] LAI, SHU T.; "Fundamentals of Spacecraft Charging: Spacecraft Interactions with Space Plasmas," Princeton; Oxford: Princeton University Press, 2012, chapter1.
- [2] Mikaelian, T., *Spacecraft Charging and Hazards to Electronics in Space*, arXiv: Space Physics, 2009.
- [3] ECSS, Space Environment, ECSS-E-ST-10-04C, 2020.
- [4] Green, J.C., Likar, J., and Shprits, Y., "Impact of Space Weather on the Satellite Industry", Space Weather, vol. 15, no. 6, pp. 804–818, 2017.
- [5] J.C. Matéo-Vélez, C. Pignal, N. Balcon, D. Payan, P. Sarrailh, et al. "GEO Spacecraft Worst-Case Charging Estimation by Numerical Simulation," Spacecraft Charging Technology Conference 2014 (13th SCTC), Jun 2014.
- [6] J. -C. Matéo-Vélez et al., "Simulation and Analysis of Spacecraft Charging Using SPIS and NASCAP/GEO," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 43, no. 9, pp. 2808-2816, Sept. 2015.
- [7] L. S. Novikov et al., "Charging of Geostationary Satellite Electro-L2 in the Earth Shadow"; in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, no. 8, pp. 3931-3936, Aug. 2019.

[۸] صمدی، آرمان؛ ابراهیمی کجویی، مسعود؛ جهانبخش، حسین؛ "بهبود توزیع پتانسیل الکتریکی روی سطوح ماهواره