

کاربرد و معرفی نانوکامپوزیت‌های سرامیکی

در این مقاله، سعی شده پتانسیل پلیمر و کامپوزیت‌های زمینه سرامیک در کاربردهای هوایی و فضایی مورد بررسی قرار گیرد. خواص ویژه، منحصر به فرد و چند منظوره ناشی از پراکندگی نانو ذرات در کامپوزیت‌های زمینه سرامیک و فلزات به صورت خلاصه مورد بحث و سپس طبقه‌بندی قرار گرفته است. این بررسی در زمینه برنامه‌های کاربردی از جمله: سازه، پوشش، نظارت بر سلامت ساختاری و حفاظت است. خواص مواد نانوکامپوزیت به همراه معایب آنها مانند هزینه‌ها و مشکلات پردازش نیز مورد بحث قرار گرفته است. این مقاله پس از بحث در مورد دیدگاه‌های آینده و چالش‌های احتمالی در پیاده‌سازی و توسعه مواد پلیمری و نانوکامپوزیت سرامیکی، نتیجه‌گیری می‌کند.

واژه‌های کلیدی: نانوکامپوزیت، هوافضا، ساختار، نظارت بر سلامت، ماتریس پلیمر، ماتریس سرامیکی.

مریم‌السادات قوامی^{۱*}، کارشناس ارشد، خلبان
دوم، شرکت هواپیمایی ایران ایر،

*نویسنده مخاطب، آدرس تهران، کد پستی:
۱۹۹۵۶۱۴۳۱۷

msghavami1990@gmail.com

Application and Introduction of Ceramic Nanocomposites

This paper reviews the potential of polymer and ceramic matrix composites for aerospace/space vehicle applications. Special, unique, and multifunctional properties arising due to the dispersion of nanoparticles in ceramic and metal matrix are briefly discussed and classified based on aerospace applications. In this regard, polymer matrix composites comprising majority of aerospace applications in structures, coating, structural health monitoring, and electromagnetic shielding is presented. Furthermore, properties of resulting nanocomposite material with its disadvantages such as cost and processing difficulties are discussed. The obtained results are also presented after the investigating the possible future perspectives and challenges in implementation and further development of polymer and ceramic nanocomposite materials.

Keyword: Nanocomposites, Polymer matrix, Ceramic matrix

M.S. Ghavami Masouleh^{1*}, M. Sc.
Iran Air first Officer

*Corresponding Author, Postal
Code: 1995614317, Tehran, IRAN

msghavami1990@gmail.com

مقدمه

نانوکامپوزیت از جمله مواد تولید شده در قرن بیست و یکم است که با توجه به قابلیت‌های چند منظوره، نرخ رشد سالیانه ۲۵ درصدی را دارد. امکانات و ویژگی‌های منحصر به فرد این نوع مواد مانند قابلیت ترکیب نانوکامپوزیت‌ها، توجه پژوهشگران زیادی را در سراسر جهان به خود جلب کرده است. در پروژه‌های فضایی، خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی، شیمیایی و زیست تخریب‌پذیری و همچنین، اعمال شیمیایی مانند: مقاومت یا انفجار و خوردگی اهمیت زیادی دارد. صرف‌نظر از نیازمندی به وزن کم سازه‌های هوافضا، نیاز به خواص مکانیکی برای طراحی مانند: قدرت، عمر خستگی، مقاومت در برابر ضربه و مقاومت در برابر خراش نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. انتخاب مناسب نانوفیلرها و ماتریس‌ها کلید دستیابی به خواص چند منظوره بیان شده برای کاربردهای هوافضایی است [۱].

انواع نانومواد

نانومواد را می‌توان بر اساس ابعادشان طبقه‌بندی کرد [۲]. نانوذرات سه بعدی در نانومادی مانند: سیلیس، ذرات فلزی و ذرات نیمه‌هادی وجود دارند [۳]. نانولوله‌ها و ساندویچ‌ها از نوع دوم نانوذرات دوبعدی هستند که دارای دو بعد در مقیاس نانومتری (۱۰۰ نانومتر) بوده و بعد سوم آن ساختاری دراز شده را تشکیل می‌دهد (نسبت عرضی بیش از ۱۰۰) [۴].

نانوفیلرها با حجم ۱ تا ۵ درصدی خود می‌توانند خواص مواد کامپوزیتی را در مقایسه با میکروفیلر معمولی با حجم ۱۵ تا ۴۰ درصد، افزایش دهند. نانوفیلرها دارای ویژگی‌های استثنایی هستند، زیرا ساختار پایه‌ای آنها به صورت کریستال و بدون نقص است. هر نوع نانوفیلر دارای مزایا، معایب و خصوصیات منحصر به فرد خود است. انواع نانوکامپوزیت‌ها بسته به نوع ماتریس استفاده شده به سه دسته تقسیم می‌شوند (مانند میکرو کامپوزیت‌ها): نانو کامپوزیت‌های ماتریکس پلیمر (PMNCs)، نانو کامپوزیت‌های ماتریکس سرامیکی (CMNCs) و نانو کامپوزیت‌های ماتریس فلزی. PMNC و CMNC برنامه‌های کاربردی در هواپیما و فضاپیماها را پیدا کرده‌اند (شکل ۱). در حالی که استفاده از نانوکامپوزیت ماتریس فلز به دلیل محدودیت‌های پردازش تاکنون محدود بوده است.

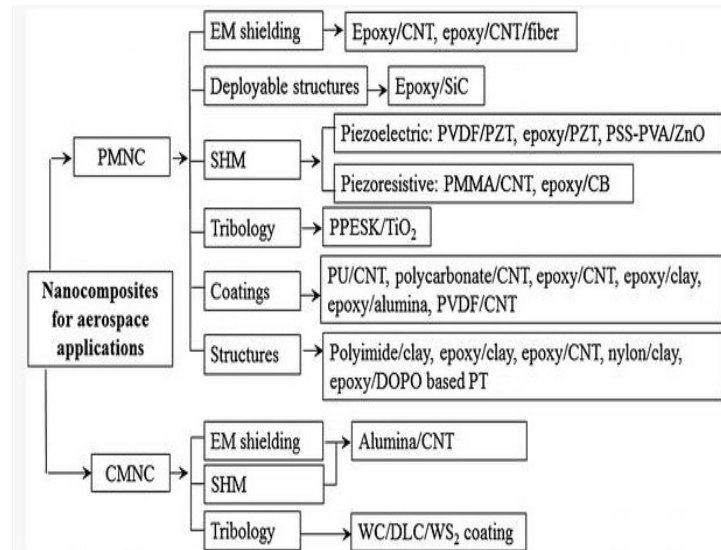
با توجه به سهولت تولید PMNCها، این مواد به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵]. معایبی از جمله مدول کم و مقاومت برشی ماتریکس پلیمری با اضافه کردن فیبرها، بر طرف شده است. افزودن فیبرهای معدنی باعث افزایش

مقاومت مکانیکی، مقاومت ضربه، پایداری حرارتی و بازدارندگی شعله می‌شوند که برای کاربردهای هوافضا مورد نیاز است [۶]. در ماموریت‌های فضایی آینده قرار است از قطعات بسیار سبک با قابلیت حفظ ۳۰ ساله خواص خود استفاده شود. این مواد همچنین توانایی ماندگاری بالایی در محیط‌های بسیار خشن؛ مانند قرار گرفتن در معرض اکسیژن اتمی و تابش خورشید دارند [۷].

نمونه‌های پرکاربرد PMNCsها پلیمر/آلومینیوم (polymer/Al) و پلیمر/آلومینا (polymer/Al₂O₃) است که برای تهیه سوخت موشک از آنها استفاده شده و سبب بهبود عملکرد موشک‌های بالستیک می‌شود. اما زمانی چالش‌ها رخ می‌دهد که بخواهیم خواص نانوفیلرها را از نانوکامپوزیت‌ها به دست آوریم [۸]. این عیب ناشی از نانوذرات ضعیف پراکنده و تعامل نانوذرات با ماتریس است [۹]. بسته به نوع ماتریس مورد استفاده، عملکرد پراکندگی نانوفیلرها و تعامل در ماتریس بهبود داده می‌شود.

سرامیک ماتریس نانوکامپوزیت‌ها دارای ترکیبی از ویژگی‌های سرامیکی مانند: مقاومت به سایش، پایداری حرارتی بالا و پایداری شیمیایی با ویژگی‌های نانوفیلرها است [۱۰]. نانوفیلرهایی نظیر: ساندویچ، الیاف و پلاکت‌ها، چقرمگی شکست سرامیک را افزایش می‌دهند و باعث کاهش شکستگی آنها می‌شوند. علاوه بر این، از تقویت ترک و گسترش آن جلوگیری می‌کند. مرحله انتقال و گسترش حجم در CMNC باعث سخت‌تر شدن و تقویت آن می‌شود [۱۱]. تحقیقات نشان داده که نانوکامپوزیت‌هایی مانند آلومینا/سیلیس کاربرد (Al₂O₃/SiC) باعث افزایش چقرمگی شکست در مکانیسم ترک خوردگی تقویت‌کننده‌های نانو ساختار می‌شوند [۱۲]. نتیجه ترکیب نانو فیبرها در ماتریکس سرامیکی سبب بروز سختی بالا با خواص شکننده می‌شود [۱۳]. نمودار شکل ۱ PMNCها و CMNCهای مناسب برای کاربردهای هوافضا را نشان می‌دهد.

خواص نانوکامپوزیت‌ها با تنظیم ویژگی‌ها، تعامل با ماتریس، شکل، ترتیب و کسر حجم نانوفیلرها را کنترل می‌کند. عملکرد و خصوصیات فله نانوکامپوزیت از طریق اندازه‌گیری تقویت، مورفولوژی، فاصله بین تقویت‌کننده و تعامل تقویت‌کننده ماتریس کنترل می‌شود. به دنبال نمودار در شکل ۱ این مقاله، خواص و پتانسیل PMNCها و CMNCها در کاربردهای هوافضا بررسی می‌کند. صنایع هوافضا یک صنعت بسیار متنوع است که شامل حمل و نقل، وسایل نقلیه نظامی، ماهواره‌ها، فضاپیماها، سیستم‌های پرتاب فضایی، وسایل نقلیه میکروآرایی، وسایل نقلیه بدون سرنشین، روتور، سیستم‌های زمینی و غیره است.



شکل ۱- نانو کامپوزیت‌های کاربردی هوافضا. اختصارات شکل عبارتند از: نانو کامپوزیت ماتریکس پلیمر؛ نانو کامپوزیت ماتریکس سرامیکی؛ دی هیدروفسفات نتاترناکسید؛ فسفر تتراژلیدید؛ پلی الکل وریدی؛ پلی اورتان؛ کربن نانولوله؛ وینیلیدین فلوراید؛ پلی فتالازینون اتر سولفون کتون؛ دی اکسید تیتانیوم؛ متیل متاکریلات؛ تیتانات زیرکونات سرب؛ کاربرد تنگستن؛ کربن مانند؛ الماس؛ سولفید تنگستن؛ پلی سیلیکون کاربرد.

مقاومت کمتری نسبت به ضربه دارند و دارای خاصیت جذب رطوبت، تخریب محیط زیست و پیر شدگی^۳ با مرور زمان را نیز دارند [۱۵].

پلیمر / رس

سیلیکات‌های رسوبی یا لایه‌ای (LS) نانوفیلرهایی هستند که داخل پلیمر به لایه نانو کامپوزیت‌ها متصل می‌شوند. این مواد به راحتی با هزینه‌های کم به همراه عملکرد سختی قابل پیش‌بینی در نانو کامپوزیت‌ها قابل تولید هستند. توانایی تنظیم شیمیایی سطوح از طریق واکنش تغییر یونی با کاتیون‌های آلی و غیر آلی، باعث پیوند قوی میان LS و ماتریکس پلیمری می‌شود. همچنین، به دلیل قابلیت درزگیری و دسترسی آسان خاک رس، این ماده به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقایسه با کامپوزیت‌های میکروفیبر، نانو کامپوزیت‌های مبتنی بر LS دارای قابلیت‌هایی مانند: بهبود در ماژول، مقاومت در برابر حرارت و تجزیه زیستی همراه با کاهش قابلیت اشتعال و نفوذ پذیری گاز را از خود نشان داده‌اند. این توانایی باعث می‌شود که نانو کامپوزیت‌های مبتنی بر LS برای کاربردهای هوافضا بسیار جذاب باشد [۱۶].

نانو کامپوزیت Polyimide/Clay توسط فرآیند سل-ژل تهیه شده که حاوی مونومرها و مولکول‌های آلی در ماتریس‌های سل-ژل است. پیوند شیمیایی تشکیل شده توسط معرفی گروه‌های آلی منجر به تشکیل ماتریس سل-ژل در داخل پلیمر می‌شود که به طور هم‌زمان شبکه‌های

پلیمرها، ماکرومولکول‌هایی هستند که از واحدهای مکرر (مونومرها) به صورت پیوندهای کوآتومی^۱ تشکیل شده‌اند. با پراکندگی نانومواد در پلیمرها، نانو ساختار پلیمرها می‌تواند اصلاح شود. پلیمر هم‌زمان با تقویت مولکول‌های پلیمر خواص آن را حفظ می‌کند. نانو کامپوزیت‌های پلیمری به سه نوع تقسیم می‌شوند: نانو کامپوزیت‌های تقویت‌کننده دائمی، نانو کامپوزیت‌های تقویت لایه‌ای و نانو کامپوزیت‌های تقویت‌شده CNT^۲.

برنامه‌های کاربردی ساختاری

در بعضی از برنامه‌های فضایی، صرف‌نظر از اصل سبک بودن تجهیزات، عملکرد بالا در ساختارهای هوافضایی مانند: محوطه تجهیزات، داخل هواپیما، پوشش‌ها، کابین خلبان، محل خدمه، لوله‌های انقباض گرما، آینه‌های با دوام در فضای باز، محفظه‌ها، پوشش‌ها، نازل‌ها و زیربنای آرایه‌های خورشیدی، اهمیت زیادی دارد. مواد کامپوزیت نیز به دلیل سبک وزن بودن، پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر آتش به همراه هزینه پایین، تولید و عملیات این موارد بسیار مورد توجه‌اند.

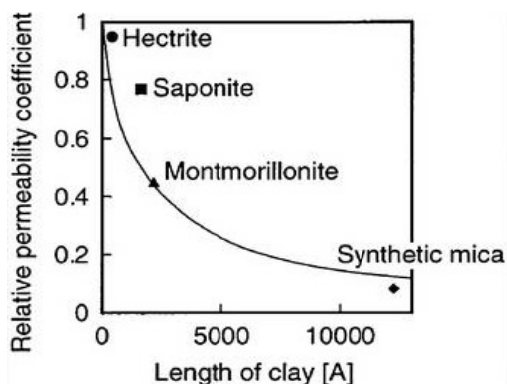
کاربرد کامپوزیت‌ها به سه دلیل اصلی در ساختارهای هوافضایی محدود شده است اولاً، مقاومت الکتریکی بالایی دارند که باعث محدودیت کاربرد آنها در محافظ الکترومغناطیسی، مدار، آنتن و حفاظت از برخورد رعد و برق می‌شود [۱۴]. ثانیاً، هدایت حرارتی پایین کامپوزیت‌ها، بار سیستم‌های گسیختگی بر اساس بخاری‌های الکتریکی را افزایش می‌دهد. ثالثاً، کامپوزیت‌ها

1. Quantum bonds
2. Carbon Nanotube Nanocomposites (CNT)

3. Aging

است [۲۲]. کاهش در نفوذپذیری در گازهایی مانند: اکسیژن (O₂)، بخار آب (H₂O)، هلیوم (He)، دی اکسید کربن (CO₂) و بخار اتیل استات در نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر رس روی می‌دهد. بارگذاری خاک رس wt% ۲ درصد ضریب نفوذ بخار آب را ۱۰ برابر افزایش می‌دهد.

در شکل ۴ نفوذپذیری نانوکامپوزیت‌های پلی امید به دست آمده با انواع مختلف پرکننده‌های بارگذاری شده با wt% ۲ درصد نشان داده شده است [۲۳]. کاهش نفوذپذیری در نانوکامپوزیت‌ها با افزایش طول، بیشتر می‌شود. LS کاملاً لایه‌برداری شده، پایین‌ترین میزان نفوذپذیری را در پی ایجاد مسیر توزیع بیش از حد، داراست. علاوه بر این خواص نانوکامپوزیت‌های پلی امید/رس دارای ویژگی سایش بسیار زیاد و مقاومت در برابر حرارت است و به همین دلیل، در اتومبیل به عنوان پوشش کف بدنه و در هواپیماهای تجاری، در قسمت باری مورد استفاده قرار می‌گیرد.



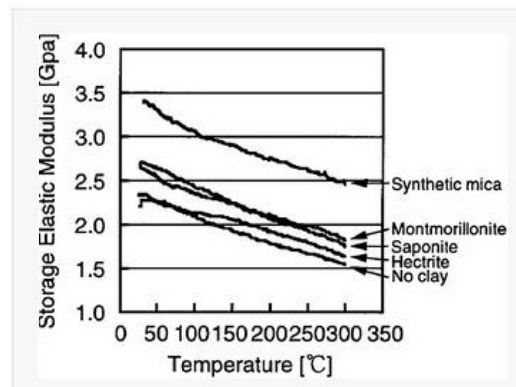
شکل ۴- تغییر ضریب نفوذپذیری نسبی با طول رس [۲۴].

اپوکسی/رس و اپوکسی/CNT

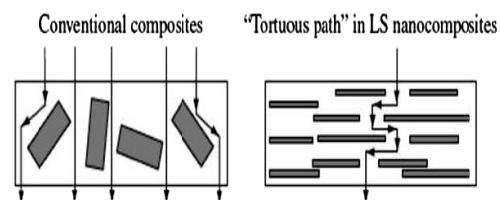
پردازش نانوکامپوزیت‌های پلیمری/رس یا پلیمری/CNT شامل پراکندگی رس یا CNT در رزین اپوکسی با استفاده از امواج اولتراسونیک به مدت ۳۰ دقیقه انجام می‌شود. آزمایش مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با پرکننده‌های رس و یا CNT نشان دهنده افزایش مدول الاستیسیته است که در جدول ۱ نشان داده شده است. اپوکسی/رس و اپوکسی/CNT خواص ترمومکانیکی بهتری نسبت به ماتریس نابالغ دارند. نانولوله کربنی اپوکسی/چند ضلعی (epoxy/MWCNT) دارای استحکام کششی 121.8 MPa بوده در حالی که اپوکسی خالص دارای استحکام کششی 95 MPa است. افزایش غلظت CNT، مدول الاستیسیته را افزایش می‌دهد، اما مقاومت کششی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این نانوذرات تا ۲ درصد کم می‌شوند، زیرا خواص رئولوژیکی از این سطح به بعد بدتر می‌شود [۲۵].

آلی/غیرمعدنی را تشکیل می‌دهد [۱۷]. نانوکامپوزیت‌های Polyimide/Clay نشان دهنده افزایش تنش و طول شکست می‌باشد [۱۸]. خاک رس مونتموریلونیت (MMT) با هگزادسیل آمونیوم مبادله شده که با افزایش ۵ درصد وزنی خود، خواص فله‌ای را افزایش می‌دهد. بیشتر از این میزان بارگذاری، خواص با افزایش شکنندگی، کاهش می‌یابد. افزایش مدول ذخیره‌سازی در هر درجه حرارت که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای نانو کامپوزیت مبتنی بر پلی امید پر شده با wt% ۲ درصد از خاک رس آلی است.

در این حالت، درجه حرارت انتقال شیشه با افزایش میزان رس، کاهش می‌یابد. بهینه‌سازی نانوکامپوزیت مبتنی بر میکا، به دلیل لایه‌های سیلیکات با طول حدود ۲۱۸ نانومتر و ضخامت حدود یک نانومتر است. خاکستر میکا و MMT دارای ساختارهای نفوذی هستند، در حالی که آپونیت دارای ساختار تقریباً نفوذناپذیر است و نانوکامپوزیت مبتنی بر Hectorite دارای مورفولوژی درونی است. پلیمر LS خواص ضد عفونی گاز به علت مسیر پیچشی خود (پیچ و خم) که توسط LS ایجاد شده در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۹].



شکل ۲- تغییر مدول الاستیسیته ذخیره با دمای نانو کامپوزیت‌های مبتنی بر فیلیامید پر از wt% ۲ درصد نانورس [۲۰].



شکل ۳- مسیر پیچ و خم در نانوکامپوزیت پلیمر/LS [۲۱]

ضریب نفوذپذیری نسبی (PR)، نسبت ضریب نفوذپذیری کامپوزیت و ماتریس پلیمری است. ضریب نفوذپذیری نسبی معکوس برای عامل فرسایش $P_R = 1/T_F$ است. بنابراین، ضریب نفوذپذیری اگر طول سیلیکات طولانی‌تر باشد، کوچک‌تر

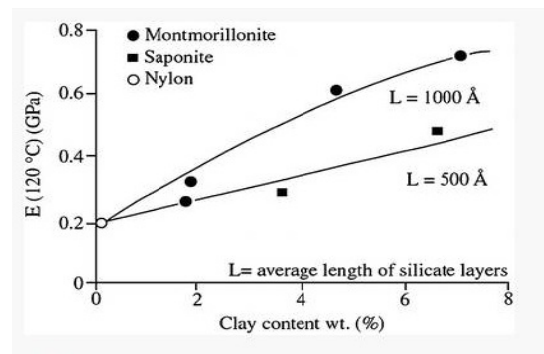
جدول ۱- آزمایش مکانیکی اپوکسی/رس و اپوکسی/نانوکامپوزیت CNT [۲۵].

| Nanocomposite | Tensile strength (MPa) | Shore hardness | Thermal stability (°C) | Modulus of elasticity (GPa) | References |
|--------------------------|------------------------|----------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Epoxy | 95 | 75 | 50 | 2.8 | Dinca et al. (2012) |
| Epoxy + 2 wt% 30 B | 102.5 | 83 | 56 | 3.1 | Dinca et al. (2012) |
| Epoxy + 2 wt% MWCNT | 98 | 77 | 55 | - | Dinca et al. (2012) |
| Epoxy + 2 wt% MWCNT-COOH | 121.8 | 85 | 59 | 3.42 | Dinca et al. (2012) |
| Epoxy | 52.5 | - | - | 2.52 | Micheli et al. (2011a) |
| Epoxy + 0.1 wt% MWCNT | 24.7 | - | - | 2.42 | Micheli et al. (2011a) |
| Epoxy + 0.5 wt% MWCNT | 29.5 | - | - | 2.97 | Micheli et al. (2011a) |

مواد با کارایی بالا که دارای ویژگی‌های حرارتی و مکانیکی بالایی باشند برای استفاده در صنایع فضایی پیشرفت‌های سریعی داشته‌اند. رزین اپوکسی دارای خواص عالی مانند: چقرمگی، چسبندگی و مقاومت شیمیایی است. با این حال، اپوکسی خواص حرارتی و مکانیکی مورد نیاز ساختارهای هوافضایی را ندارد. فسفر حاوی ترکیبات مقاوم در برابر شعله است و مانند تری فنیل فسفات^۴ نیاز به بارگزاری زیادی برای به تاخیر انداختن شعله دارد. به همین دلیل واکنشگرهای^۵ به عنوان مواد جایگزین ظاهر شدند که می‌توانند به آسانی در یک ماتریس پلیمری مانند: اکریلیک، استیریل، اپوکسی و پلی اتیلن به کار برده شوند.

خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها با POSS خواص مکانیکی بهتری را در مقایسه با خواص نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر رس ساخته‌اند. این امر به دلیل اندازه کوچک POSS بوده که باعث تحرک زنجیره پلیمری اطراف و چسبندگی بین فضایی می‌شود. آزمایش‌های مقاومت در برابر شعله نشان می‌دهد که افزایش خواص بازدارنده شعله با توجه به حفاظت از ماتریس زیرزمینی توسط تشکیل ذغال بر روی سطح و انرژی سطح پایین مربوط Si-O-Si موجود در POSS ایجاد می‌شود. جذب آب در این مواد به علت داشتن طبیعت هیدروفوبیک^۶ و نیمه‌هیدروفوبیک^۷ در پیوند Si-O-Si کم است

اپوکسی/خاک رس می‌تواند جایگزین مناسبی برای پودر تالک گرانول و TiO₂ در جهت کاهش نفوذپذیری در مخازن سوخت باشد [۲۶]. نانوکامپوزیت‌هایی مانند: فلوروپول (اتر آمیک اسید)/مونتموریلونیت (6F-PEAA/MMT) و پلی اتیلن ترفتالات LS نیز بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی، مقاومت ضربه، خواص مانع و ویژگی‌های شعله ایجاد کرده‌اند [۲۷]. این ویژگی‌ها در حفظ ایمنی ساختارهای هوافضا در صورت آتش‌سوزی و ضربه‌پذیری بسیار مطلوب‌اند. تیوتا از نانوکامپوزیت‌های پلیمری/خاک رس در ساختار تولیدات خود با اصلاح رس‌های طبیعی استفاده می‌کند [۲۸]. نانو ساختار LS نوعی رس است که برای جلوگیری از انتشار گاز از طریق پلیمر استفاده می‌شود. نانوکامپوزیت اپوکسی/رس به دلیل مقاومت در برابر شعله، مناسب برای ساخت مخازن ذخیره‌سازی گازهای بسیار سبک و قوی در کاربردهای هوافضا است.



شکل ۵- تنوع مدول یانگ در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد بر محتوای رس LS اصلاح شده.

4. Triphenyl phosphate
5. silsesquioxanes polyrigal oligomeric (POSS)
- ۶ آب‌گریز یا هیدروفوبیک Hydrophobic: در شیمی و زیست‌شناسی سلول، کاربرد دارد و یک پدیده فیزیکی در مولکول‌ها است که از آب دوری می‌کنند.
7. Semi-hydrophobic

[۲۹]. خواص مکانیکی، حرارتی، شعله بازدارنده و ممانعت از نفوذ آب، باعث شده که پلیمر POSS نانوکامپوزیتی مناسب برای سازه‌های هوافضا با کارایی بالا باشد.

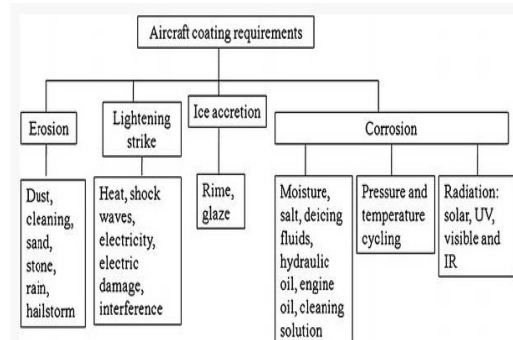
جدول ۲- خواص مکانیکی اپوکسی [۲۹].

Table 2
Mechanical properties of epoxy/DOPO nanocomposites
(reprinted from (Meenakshi et al. 2011), with the permission from Elsevier)

| Resin system | Tensile strength (MPa) | Tensile modulus (GPa) | Flexural strength (MPa) | Flexural modulus (GPa) | Impact strength (KJ/M ²) |
|-------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| TG-DOPO + DDM | 91 | 6.90 | 148 | 4.78 | 35 |
| TG-DOPO + 5% clay-DDM | 77 | 7.00 | 157 | 4.88 | 31 |
| TG-DOPO + 5% POSS-DDM | 104 | 7.43 | 165 | 4.95 | 27 |
| TG-DOPO + BAPPO | 97 | 6.98 | 154 | 4.84 | 27 |
| TG-DOPO + 5% clay-BAPPO | 83 | 7.11 | 163 | 4.93 | 29 |
| TG-DOPO + 5% POSS-BAPPO | 110 | 7.20 | 171 | 5.05 | 24 |

کاربردهای پوشش فضایی

سازه‌های هوافضا در محیط‌های دارای تغییرات رطوبتی و دمایی بالایی قرار می‌گیرند و علاوه بر این، آنها به طور مدام با سوخت جت، مایع تخلیه و مایع هیدرولیک در تماس هستند. بنابراین، پوشش مخازن این مواد باید در برابر برخورد رعد و برق، اشعه ماوراء بنفش و فرسایش در برابر گرد و غبارهایی با سرعت ۵۰۰ مایل بر ساعت، مقاومت کنند. معمولاً پوشش اولیه تجهیزات هوافضایی یک پوشش پلاستیکی است که برای چسبندگی، حفاظت در برابر خوردگی، پایداری رنگ و ایجاد ظاهری خوب بر روی این تجهیزات قرار داده می‌شود. این الزامات در شکل ۶ طبقه‌بندی شده است.



شکل ۶- الزامات پوشش‌های ساختمانی هواپیما.

حفاظت روشنایی و حفاظت الکترومغناطیسی

برخورد رعد و برق با هواپیما می‌تواند به صورت مستقیم و غیرمستقیم آسیب‌هایی را به هواپیما وارد کند. از جمله اثرات

مستقیم آن آسیب‌های ناشی از گرما (حدود ۳۰،۰۰۰ درجه سانتیگراد)، امواج شوک صوتی (اثر ضربه ۵۰۰ پیکسلی) و شارژ الکتریکی (حدود ۲۰۰،۰۰۰ آمپر) جریان است [۳۰]. اثر غیرمستقیم می‌تواند باعث آسیب و یا قطع تجهیزات الکترونیکی شود. اما گرما که از طریق گرمای مقاومتی یا ژول ایجاد می‌شود باعث بیشترین آسیب به تجهیزات شده و سبب تجزیه ماتریکس در کامپوزیت و جدایی بین لایه‌ای کامپوزیت‌ها می‌شود. برای جلوگیری از آسیب‌های محلی، مش فلزی نازک در لایه‌های بیرونی کامپوزیت تعبیه شده است [۳۱].

این لایه همچنین به عنوان یک سپر برای سیستم‌های الکتریکی عمل می‌کند. کامپوزیت‌های غیر قابل هدایت توسط نوارهایی بر روی سطح بیرونی تجهیزات فضایی برای ردیابی رعد و برق فراهم می‌شوند. این کامپوزیت‌ها اجازه می‌دهند که شفافیت امواج الکترومغناطیسی از آنتن‌ها (از طریق پانل‌های کامپوزیت پانل‌های آنتن) منتقل شود. وقتی شفافیت فرکانس رادیویی لازم نیست، هدایت مواد از طریق سطح بیرونی انجام می‌شود. برای بهبود تداخل الکترومغناطیسی (EMI) و مقاومت در برابر برخورد رعد و برق، رزین‌های رسانا و نانولوله‌های کربنی تک محورو مواد باکی-کاغذی فراهم شده‌اند [۳۲]. این مواد باکی-کاغذی عبارتند از CNTهای بسیار بارگذاری شده و مغناطیسی که هدایت آنها به طور خطی با دما تغییر می‌کند.

فرسایش

فرسایش ناشی از ذرات شن و ماسه در اثر شستشوی خرد کردن و تشکیل تراشه در فلزات و پلیمرهای کوپل ایجاد می‌شود [۳۳]. قطرات باران موجب آسیب دیدگی پوشش‌های سطحی، خستگی و پاره شدن آنها می‌شود [۳۴]. لایه‌های یخ نیز می‌تواند سبب لایه‌برداری و فرسایش پوسته هواپیما شود. نیکل، سپر تیتانیوم، PU خالص، ترکیبباتی از پوشش‌های پلی‌اتیلن یا PU هستند که به طور معمول برای حفاظت از فرسایش مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۵].

ضدودن یخ و ضد یخ کردن

این نوع مواد سبب ضدودن و ضد یخ کردن هواپیما می‌شوند. این سیستم یک پوشش عایق حرارتی کارا توسط فرآیند خشک کردن با بخاری‌های الکتریکی ایجاد کرده و البته علاوه بر این، حفظ گرما را در داخل عایق‌ها سازه‌های کامپوزیتی کاهش می‌دهد [۳۶].

حفاظت از اشعه و خوردگی

اشعه ماورای بنفش، رطوبت، حرارت و گاز موجود در جو باعث خوردگی سطوح می‌شوند. خوردگی گالوانیک از ترکیبات ترکیبی

در سراسر جهان انجام شده، حدس زد. به عنوان مثال، جنرال موتورز در استفاده‌های ساختاری از نانورسال و تالک استفاده کرده است. GE و Cabot در ایالات متحده آمریکا از نانوکامپوزیت‌ها در تولید سوئیچ‌های نانو، پلیمر و سنسورهای رسانایی استفاده می‌کند. این مواد سبب شده که تجارت امری در دسترس بوده و در عین حال هزینه‌های تولید نانوکامپوزیت را کاهش می‌دهد. پیشرفت‌های زیادی در روش‌های پردازش همراه با کنترل سطح مولکولی توزیع نانومواد و تعامل با مواد ماتریکس برای بهینه‌سازی خواص و عملکرد نانو کامپوزیت‌ها دیده می‌شود. از این رو نانوکامپوزیت‌ها برای استفاده در سیستم‌های پیشرفته هوافضا، فرصت خوبی دارند. پیشرفت در فن‌آوری ساخت نانو کامپوزیت‌ها، و انتقال آنها به برنامه‌های کاربردی مانند: الکترونیک، فیلم‌های نازک، هواپیماهای فوق سبک و پلیمرهای حافظه برای فضاپیماها به سرعت در حال برنامه‌ریزی است.

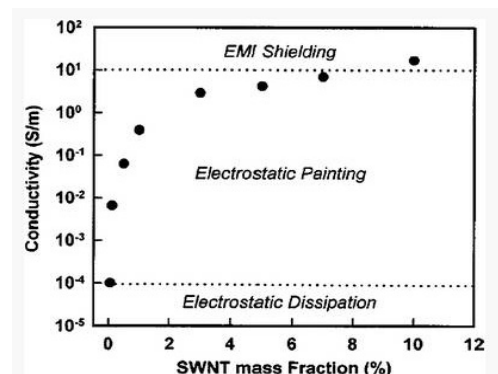
پلیمرهای الکترومغناطیسی برای استفاده در ترمو نوری مناسب بوده، در حالی که پلیمرهای الکتروکاووری دارای پتانسیل‌هایی هستند که در طراحی سازه‌های عکس برداری در ماموریت‌های فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پیشرفت‌های اخیر در نانوکامپوزیت‌های پلیمری و روند تحقیقات کنونی، ایجاد فرصت‌هایی نو برای توسعه نسل‌های جدید هواپیما و سازه‌های فضایی ایجاد کرده است [۳۳]. PMNC، موادی هستند که در بازدارندگی از آتش اهمیت زیادی دارند. بدین صورت که از این پوشش‌ها در اجزای موتور، سنسورهای دما و سازه‌هایی با درجه حرارت بالا استفاده می‌شود. PMNCها در مقایسه با CMNC و MMNC بسیار پیشرفته‌ترند و دلیل توسعه آنها اختصاص بودجه بیشتر و آمادگی فن‌آوری برای توسعه این ماده است.

این مقاله بر روی راه‌حل‌های موجود که برای برنامه‌های کاربردی هوافضا و فضایی مناسب است، تمرکز دارد. با این حال برای استفاده از این راه‌حل‌ها که عملاً در ساختارهای مختلف هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرند، صدور گواهینامه هوافضا الزامی است. به همین جهت ممکن است مطالعات بیشتری را در رابطه با قابلیت تولید، قابلیت اطمینان، یکنواختی و تکرارپذیری مورد نیاز باشد. مقرون به صرفه بودن و در دسترس بودن از موارد دیگر اهمیت این مواد است. زیرا دست‌اندرکاران صنعت هوافضا همیشه به دنبال کاهش و صرفه‌جویی در هزینه و زمان پروژه‌های فضایی هستند. پردازش و مشخص کردن نانوکامپوزیت‌ها همیشه با چالش‌های متعددی مواجه بوده است. به عنوان مثال، پردازش نانوبلورها بسیار دشوار است زیرا اگر حل شوند، اجزای بسیار سبک وزنی را نسبت به همتایان میکروفیبرشان، تولید خواهند کرد.

(آنودایز) و ترکیبات فلزی (کاتدی) حاصل می‌شود. از آنجا که خوردگی حالت اولیه شکست در هواپیما محسوب می‌شود، پوششی برای حفاظت از خوردگی طراحی شده است. این پوشش با نفوذ پذیری کم برای مایعات، حفاظت از مانع را فراهم می‌آورد. رنگ‌دانه‌های بازدارنده‌ای که در پوشش‌ها اضافه شده‌اند، اموال الکتروشیمیایی و حفاظت منفعل را به منظور حفاظت بیشتر ارائه می‌دهند [۳۷]. پوشش‌های موجود در هواپیما طول عمر و قابلیت‌های محدودی دارند. نانوکامپوزیت‌های پلیمری انعطاف‌پذیری را برای خواص مکانیکی، شیمیایی، الکتریکی، حرارتی، خواص اپتیک و ترکیب‌های دیگر مورد استفاده در صنعت هوافضا ارائه می‌دهند [۳۸].

پلیمر هدایت‌کننده CNT برای محافظت از EMI

پوشش‌های نانوکامپوزیتی که با پرکننده‌های مختلفی طراحی شده‌اند، در پوشش هواپیما مورد استفاده قرار می‌گیرند و تاکنون استفاده آنها رضایت بخش بوده است. الاستومرهای پلی اورتان دارای مقاومت زیاد در برابر سایش، مقاومت در برابر خوردگی، کشش و استحکام چسبندگی پوشش است [۳۹]. موادی مانند رس، آلومینا، CNT و نانوپودر به‌عنوان مواد اصلی در توسعه پوشش‌های هوافضا به کار می‌روند [۴۰]. پوشش‌های ساخته شده در برنامه‌های کاربردی هوافضا با توجه به مکان ساختاری و نیازهای عملکردی آنها متفاوت است. یکی از پرکننده‌های رسانا مانند SWNT تا ۵ wt درصد برای هدایت الکتریکی برای تخریب الکترواستاتیک و محافظت از EMI کافی است. تغییرات مقاومت الکتریکی با محتوای SWNT در ماتریس پلی کربنات (PC) در شکل ۷ نشان داده شده است [۴۱].



شکل ۷- تغییر هدایت الکتریکی با بارگیری SWNT نانو کامپوزیت PC/SWNT (خطوط و نقاط نشان‌دهنده آستانه پایین/پراکندگی) [۴۲].

چشم‌اندازها و چالش‌ها

پتانسیل‌های آینده نانوکامپوزیت‌ها را می‌توان به راحتی توسط سرمایه‌گذاری‌های گسترده‌ای که توسط محققان و صنعتگران

بهبود خواص مکانیکی با اصلاح سطحی نانوفیبری و تعیین خواص با استفاده از مدل سازی و شبیه سازی می تواند در توسعه نانو کامپوزیت ها کمک کند. پراکندگی، هم تراز، کسر حجم و سهولت ساخت و همچنین کاهش هزینه، از جمله پارامترهای حیاتی برای تعیین پتانسیل نانو کامپوزیت ها می باشد [۴۴]. انتشار نانوذرات در محیط زیست خطرناک است، زیرا می تواند با فعل و انفعالات خود با نانو ساختار و سطح سلول ها ارتباط برقرار کند [۴۵]. این امر سبب شده که در سال های اخیر پژوهشگران به بررسی تأثیرپذیری این مواد و زوائد آنها در زندگی انسان و محیط زیست بپردازند. زیرا نانوذرات جدای از مفید بودن می توانند از بدو تولید تا دور ریزش پسماند مخاطراتی برای محیط زیست، انسان و حیوانات ایجاد کنند. به این دلیل ارزیابی ریسک های زیست محیطی نانوذرات در طول چرخه عمر نانوذرات امری لازم و ضروری است [۴۶]. به همین جهت، ماتریس پلیمر سازگار با محیط زیست می تواند از پلی هیدروکسی آلکانوات ها، ساکاریدها، پلی یلکتیدها و پلی کاپرولاکتون استخراج شود. هزینه کم این پرکننده ها و ماتریس ها، استفاده از آنها را در انواع کاربردهای هوافضا افزایش داده است.

نتایج به دست آمده

نانو کامپوزیت یک ساختار تکامل یافته از تحقیقات بین رشته ای است که به وسیله فناوری نانو به کار می رود. قابلیت انطباق مواد در مقیاس نانو، امکان توسعه مواد چند منظوره نسل جدید را برای پاسخ گویی به نیازهای صنعت هوافضا، گسترش داده است. نیازهای صنعت هوافضا مانند: خواص مکانیکی، شیمیایی، حرارتی و الکتریکی با پلیمر و CMNC با نانوفیلرها مانند نانورس، آلومینا، نانولوله های کربنی، نانوسیم، TiO_2 ، SiC ، PZT به دست می آید. Nanoclay ها، نانوفیلرهای مقرون به صرفه ای دارند که ویژگی های: توان بالا، نفوذپذیری پایین و مقاومت در برابر شعله را برای سازه های هوافضا به ارمغان می آورد. همچنین نانو کامپوزیت های MMT و نانو کامپوزیت های فتوستتر تتراپلاییدیدیل مبتنی بر DOPO نیازهای ساختاری هوافضا را برآورده می کنند. CNTs و CB وظیفه انتقال هدایت الکتریکی و حرارتی به ساختارهای نانو کامپوزیت را در جهت مقاوم سازی مناسب در برابر اصابت رعد و برق به بدنه هواپیما را بر عهده دارند. اندازه گیری کشش کربن سیاه مبتنی بر پیزوالکتریک نانو کامپوزیت نشان دهنده فاکتور ۲۶ است که برای نظارت بر شرایط ارتعاش و SHM سازه های هواپیما بسیار مناسب است.

نانو کامپوزیت های رسانای مبتنی بر CNT نیز قابلیت های محافظتی و جذب راداری خوبی را در هواپیما از خود نشان داده اند. پوشش های نانو کامپوزیت پلی یورتان حاوی نانولوله های کربنی دارای مقاومت در برابر رعد و برق، قابلیت رفع خستگی و

قابلیت محافظتی EM می باشند که در هواپیماهای تجاری و نظامی مورد نیاز است. به غیر از برنامه های کاربردی، ساختمانی و پوششی، نانو کامپوزیت ها به عنوان یک ماده سبک وزن در کاربردهای هوافضا مورد استفاده قرار می گیرند. PMNC ها مانند: PTFE/ TiO_2 و CMNC ها مانند پوشش: WC/DLC/WS2، می باشد. در صنعت هوافضا این مواد نیازمند ویژگی های تکرار شونده ساختاری برای صدور گواهی نامه اند. چنین امکانی زمان وجود دارد که محتوای نانوذرات در تمام طول مواد یکسان بوده و دارای اندازه، شکل و فیبر یکنواخت باشند. علاوه بر این، برای یکنواختی و نامتناقض بودن نانوذرات لازم است تا از تعویض قطعات با نانوذرات جدید، که بسیار گرانند، اجتناب شود. تحقیقات آینده بر روی توسعه تکنیک های پردازش برای افزایش پراکندگی نفوذ پرکننده ها، کاهش تجمع و افزایش خواص بین روابط نانوفیلر و ماتریس ها متمرکز شده است. برای حل این مشکلات، استفاده از ابزارهای شبیه سازی برای مطالعه افزایش خواص مفید خواهد بود. علاوه بر این، توسعه نانو کامپوزیت های زیست تخریب پذیر کم هزینه به طور قابل توجهی به زندگی و محیط زیست کمک خواهد کرد.

مراجع

- [1] Gangopadhyay, Rupali, and Amitabha De. "Conducting polymer nanocomposites: a brief overview." *Chemistry of materials* 12, no. 3 (2000): 608-622.
- [2] Alexandre, Michael, and Philippe Dubois. "Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials." *Materials Science and Engineering: R: Reports* 28, no. 1-2 (2000): 1-63.
- [3] Herron, Norman, and David L. Thom. "Nanoparticles: uses and relationships to molecular cluster compounds." *Advanced Materials* 10, no. 15 (1998): 1173-1184.
- [4] Favier, V., J. Y. Cavaille, G. R. Canova, and S. C. Shrivastava. "Mechanical percolation in cellulose whisker nanocomposites." *Polymer Engineering & Science* 37, no. 10 (1997): 1732-1739.
- [5] Ray, Suprakash Sinha, and Mosto Bousmina. "Biodegradable polymers and their layered silicate nanocomposites: in greening the 21st century materials world." *Progress in materials science* 50, no. 8 (2005): 962-1079.
- [6] Fischer, Hartmut. "Polymer nanocomposites: from fundamental research to specific applications." *Materials Science and Engineering: C* 23, no. 6-8 (2003): 763-772.
- [7] Thompson, Craig M., Helen M. Herring, Thomas S. Gates, and John W. Connell. "Preparation and characterization of metal oxide/polyimide nanocomposites." *Composites Science and Technology* 63, no. 11 (2003): 1591-1598.
- [8] Meda, L. U. I. S. A., G. Marra, Luciano Galfetti, S. Inchingalo, F. Severini, and L. De Luca. "Nanocomposites for rocket solid propellants." *Composites Science and Technology* 65, no. 5 (2005): 769-773.

- [24] Yano, Kazuhisa, Arimitsu Usuki, Akane Okada, Toshio Kurauchi, and Osami Kamigaito. "Synthesis and properties of polyimide-clay hybrid." *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry* 31, no. 10 (1993): 2493-2498.
- [25] Dinca, Ion, Cristina Ban, Adriana Stefan, and George Pelin. "Nanocomposites as advanced materials for aerospace industry." *Incas Bulletin* 4, no. 4 (2012): 73.
- [26] Stan, A., I. Dinca, C. Ban, S. Iliana, Dan Donescu, H. Paven, L. Dumitrache, L. Gavrilă, and I. Voicu. "Epoxy-layered silicate and epoxy MWCNTs nanocomposites." In *Applied Mechanics and Materials*, vol. 146, pp. 160-169. Trans Tech Publications, 2012.
- [27] Meenakshi, K. Shree, E. Pradeep Jaya Sudhan, S. Ananda Kumar, and M. J. Umopathy. "Development and characterization of novel DOPO based phosphorus tetraglycidyl epoxy nanocomposites for aerospace applications." *Progress in Organic Coatings* 72, no. 3 (2011): 402-409.
- [28] Ni, Yong, Sixun Zheng, and Kangming Nie. "Morphology and thermal properties of inorganic-organic hybrids involving epoxy resin and polyhedral oligomeric silsesquioxanes." *Polymer* 45, no. 16 (2004): 5557-5568.
- [29] Haque, A., M. Shamsuzzoha, F. Hussain, and D. Dean. "S2-glass/epoxy polymer nanocomposites: manufacturing, structures, thermal and mechanical properties." *Journal of Composite materials* 37, no. 20 (2003): 1821-1837.
- [30] Rupke, Edward. "Lightning direct effects handbook." *Lightning Technologies Inc.*, Pittsfield (2002).
- [31] Gagné, Martin, and Daniel Therriault. "Lightning strike protection of composites." *Progress in Aerospace Sciences* 64 (2014): 1-16.
- [32] Wang, Ben, Richard Liang, Chuck Zhang, Leslie Kramer, and Percy Funchess. Investigation of lightning and EMI shielding properties of SWNT Bucky paper nanocomposites. FLORIDA AGRICULTURAL AND MECHANICAL UNIV TALLAHASSEE, 2005.
- [33] Lancaster, J.K., "Material-specific wear mechanisms: relevance to wear modeling," *Wear* 141, no. 1 (1990): 159-183.
- [34] Lesser, Martin. "Thirty years of liquid impact research: a tutorial review." *Wear* 186 (1995): 28-34.
- [35] Van Krevelen, Dirk Willem, and Klaas Te Nijenhuis. *Properties of polymers: their correlation with chemical structure; their numerical estimation and prediction from additive group contributions*. Elsevier, 2009.
- [36] Peng, Hua-Xin. "Polyurethane nanocomposite coatings for aeronautical applications." *Multifunctional polymer nanocomposites*. CRC Press, Boca Raton (2011): 337-387.
- [37] Sørensen, Per Aggerholm, Søren Kiil, Kim Dam-Johansen, and Claus Erik Weinell. "Anticorrosive coatings: a review." *Journal of Coatings Technology and Research* 6, no. 2 (2009): 135-176.
- [38] Baer, Donald R., Paul E. Burrows, and Anter A. El-Azab. "Enhancing coating functionality using nanoscience and nanotechnology." *Progress in Organic Coatings* 47, no. 3-4 (2003): 342-356.
- [39] Howarth, G. A. "Polyurethanes, polyurethane dispersions and polyureas: Past, present and future." [9] Andrews, R., and M. C. Weisenberger. "Carbon nanotube polymer composites." *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 8, no. 1 (2004): 31-37.
- [10] Choi, Seong-Min, and Hideo Awaji. "Nanocomposites—a new material design concept." *Science and Technology of Advanced Materials* 6, no. 1 (2005): 2-10.
- [11] Awaji, Hideo, Seong-Min Choi, and Eisuke Yagi. "Mechanisms of toughening and strengthening in ceramic-based nanocomposites." *Mechanics of Materials* 34, no. 7 (2002): 411-422.
- [12] Ferroni, L. P., G. Pezzotti, T. Isshiki, and H-J. Kleebe. "Determination of amorphous interfacial phases in Al₂O₃/SiC nanocomposites by computer-aided high-resolution electron microscopy." *Acta materialia* 49, no. 11 (2001): 2109-2113.
- [13] She, Jihong, Takahiro Inoue, Masato Suzuki, Satoshi Sodeoka, and Kazuo Ueno. "Mechanical properties and fracture behavior of fibrous Al₂O₃/SiC ceramics." *Journal of the European Ceramic Society* 20, no. 12 (2000): 1877-1881.
- [14] Peng, Hua-Xin. "Polyurethane nanocomposite coatings for aeronautical applications." *Multifunctional polymer nanocomposites*. CRC Press, Boca Raton (2011): 337-387.
- [15] Mahieux, Céline A. *Environmental degradation of industrial composites*. Elsevier, 2005.
- [16] Scherillo, Giuseppe, Marino Lavorgna, Giovanna G. Buonocore, Yanhu H. Zhan, Hesheng S. Xia, Giuseppe Mensitieri, and Luigi Ambrosio. "Tailoring assembly of reduced graphene oxide nanosheets to control gas barrier properties of natural rubber nanocomposites." *ACS applied materials & interfaces* 6, no. 4 (2014): 2230-2234.
- [17] Avadhani, C. V., and Y. Chujo. "Polyimide-silica gel hybrids containing metal salts: preparation via the sol-gel reaction." *Applied organometallic chemistry* 11, no. 2 (1997): 153-161.
- [18] Yano, Kazuhisa, Arimitsu Usuki, Akane Okada, Toshio Kurauchi, and Osami Kamigaito. "Synthesis and properties of polyimide-clay hybrid." *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry* 31, no. 10 (1993): 2493-2498.
- [19] Ray, Suprakas Sinha, and Masami Okamoto. "Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing." *Progress in polymer science* 28, no. 11 (2003): 1539-1641.
- [20] Yano, Kazuhisa, Arimitsu Usuki, Akane Okada, Toshio Kurauchi, and Osami Kamigaito. "Synthesis and properties of polyimide-clay hybrid." *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry* 31, no. 10 (1993): 2493-2498.
- [21] Ray, Suprakas Sinha, and Masami Okamoto. "Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing." *Progress in polymer science* 28, no. 11 (2003): 1539-1641.
- [22] Bourbigot, Serge, Michel Le Bras, Francois Dabrowski, Jeffrey W. Gilman, and Takashi Kashiwagi. "PA-6 clay nanocomposite hybrid as char forming agent in intumescent formulations." *Fire and Materials* 24, no. 4 (2000): 201-208.
- [23] Yano, Kazuhisa, Arimitsu Usuki, Akane Okada, Toshio Kurauchi, and Osami Kamigaito. "Synthesis and properties of polyimide-clay hybrid." *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry* 31, no. 10 (1993): 2493-2498.

- Plastics Technology and Engineering 52, no. 7 (2013): 635-660.
- [44] Hussain, Farzana, Mehdi Hojjati, Masami Okamoto, and Russell E. Gorga. "Polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application: an overview." *Journal of composite materials* 40, no. 17 (2006): 1511-1575.
- [45] Dreher, Kevin L. "Health and environmental impact of nanotechnology: toxicological assessment of manufactured nanoparticles." *Toxicological Sciences* 77, no. 1 (2004): 3-5.
- [46] Ul-Islam, Mazhar, Waleed Ahmad Khattak, Muhammad Wajid Ullah, Shaukat Khan, and Joong Kon Park. "Synthesis of regenerated bacterial cellulose-zinc oxide nanocomposite films for biomedical applications." *Cellulose* 21, no. 1 (2014): 433-447.
- Surface coatings international part B: coatings transactions 86, no. 2 (2003): 111-118.
- [40] Peng, Hua-Xin. "Polyurethane nanocomposite coatings for aeronautical applications." *Multifunctional polymer nanocomposites*. CRC Press, Boca Raton (2011): 337-387.
- [41] Ramasubramaniam, Rajagopal, Jian Chen, and Haiying Liu. "Homogeneous carbon nanotube/polymer composites for electrical applications." *Applied Physics Letters* 83, no. 14 (2003): 2928-2930.
- [42] Ramasubramaniam, Rajagopal, Jian Chen, and Haiying Liu. "Homogeneous carbon nanotube/polymer composites for electrical applications." *Applied Physics Letters* 83, no. 14 (2003): 2928-2930.
- [43] Youssef, Ahmed M. "Polymer nanocomposites as a new trend for packaging applications." *Polymer-*