

تأثیر افزودنی‌های مختلف بر خواص مکانیکی، حرارتی و سایش کامپوزیت‌های کربن/ فنولیک

جمال زمانی (دانشیار)

وحید هوسی بیگی* (کارشناس ارشد)

امیدعلی صالحی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی مکانیک شریف، (بهار ۱۳۹۳)
دوره ۳-۳، شماره ۱، ص. ۱۳۷-۱۴۱، (پادداست شرفی)

در این تحقیق اثر پاراتولون سولفونیک اسید (PTSA)^۱ و پلی‌وینیل بوتیرال رزین (PVB)^۲ بر خواص بین لایه‌ی، حرارتی و سایش در^۳ کامپوزیت‌های کربن/ فنولیک مورد بررسی قرار گرفته است. چهار دسته نمونه برای آزمایش فداشونگی حرارتی توسط مشعل پلاسما آماده شده است. برای مقایسه‌ی استحکام برشی بین لایه‌ی نمونه‌های کامپوزیتی، از آزمایش برش تیر کوتاه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن ۲۰ درصد بوتیرال رزین به زمینه باعث کاهش ۱۵ درصدی نرخ سایش خطی کامپوزیت‌های کربن/ فنولیک نسبت به سایر نمونه‌ها می‌شود. همچنین استفاده از پاراتولون سولفونیک اسید در پخت نمونه‌ها، نرخ سایش وزنی کامپوزیت‌های کربن/ فنولیک را ۳۵ درصد کاهش می‌دهد. بیشتر بودن شاخص عایق بودن نمونه‌های حاوی بوتیرال رزین باعث شده است که این کامپوزیت‌ها بهترین محافظ حرارتی در میان کامپوزیت‌های مورد بررسی معرفی شوند. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش برش تیر کوتاه، استحکام برشی بین لایه‌ی کامپوزیت‌های حاوی پلی‌وینیل بوتیرال رزین ۱۲ درصد بیشتر از سایر نمونه‌هاست.

واژگان کلیدی: کامپوزیت‌های کربن/ فنولیک، سایش، استحکام برشی بین لایه‌ی، مشعل پلاسما.

۱. مقدمه

به‌عنوان مواد سطحی ذغال‌شونده‌ی میرا استفاده می‌شود. از آن‌جا که ذغال تشکیل شده نسبتاً ضعیف است و به‌طور مکانیکی توسط نیروی برشی بالای مربوط به بازشونده‌ها جدا می‌شود، الیاف کربن، دی‌اکسید سیلیکون، اکسیدهای نئوز، آزبست معدنی یا حتی شیشه برای تسهیل بقای ذغال اضافه می‌شوند.^[۱] در تجهیزات موتوری پرتابه‌ها، انتظار اصلی از کامپوزیت تقویت‌کننده فقط هدایت حرارتی پایین برای کم‌کردن ضخامت لایه محافظ نیست بلکه برخورداری از استحکام بالای سطحی به‌منظور کاهش سایش شدید ناشی از رفتار غیرعادی سایشی آن‌ها نیز از اهمیت بالایی برخوردار است.^[۲] فرایند تخریب حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری از چندین سازوکار تغییر شکل فیزیکی و شیمیایی و مکانیکی شکل گرفته است. در سازه‌های هوافضایی، سایش، روشنی مؤثر و قابل اطمینان برای محافظت کامپوزیت در برابر عامل‌های مخرب همچون دمای بالاست. از اصطلاح «سایش» برای توضیح پدیده‌ی خوردگی و تجزیه‌ی شهاب‌سنگ‌ها، به‌دلیل حرارت شدید ناشی از عبور از اتمسفر زمین با سرعت‌های بالا استفاده شده است. سایش یک پدیده‌ی ساییده‌ی است که طی آن، بر اثر ترکیبی از پدیده‌های ترمودینامیکی، ترموشیمی و ترموفیزیکی ناشی از دما، فشار و سرعت زیاد عبور محصولات حاصل از احتراق شعله، قسمت‌هایی از قطعه جدا می‌شود.^[۳] به‌عبارتی مقاومت سایش، یکی از خواص کلیدی است

امروزه سازه‌های کامپوزیتی لایه‌ی در سازه‌های هوافضا کاربرد گسترده‌ی دارند. این سازه‌ها عموماً در معرض ترکیبی از فشارهای جانبی و تنش‌های حرارتی قرار دارند. در سازه‌های هوافضا، سایش، روشنی مؤثر و قابل اطمینان برای محافظت کامپوزیت در برابر عامل مخرب همچون دمای بالاست. کامپوزیت‌های زمینه فنولیکی تقویت شده با الیاف کربن و نیز کامپوزیت‌های کربنی تقویت شده با الیاف کربن (CFRC)، از جمله موادی هستند که این نیاز را برآورده می‌سازند.^[۱] وقتی که مواد کامپوزیتی مقاوم به سایش در محیط‌های ساییده قرار می‌گیرند، ابتدا به‌عنوان یک سپر حرارتی^۴ عمل می‌کنند. با افزایش حرارت دهی، لایه‌ی بیرونی گران‌رو (ویسکوز) می‌شود و سپس شروع به تخریب می‌کند و یک جرم اسفنجی از ذغال تشکیل می‌شود و در نهایت ذغال کربن متخلخل تشکیل می‌شود. زغال تشکیل شده به‌عنوان عایق عمل می‌کند و گازهای خارج شده از پلیمر تجزیه شده با ایجاد اثر تزریق جرم، به سرد شدن قطعه کمک می‌کند.

در میان گرماسخت‌های (ترموست‌های) مرسوم، رزین‌های فنولیکی در حین تجزیه‌ی حرارتی ذغال بیشتری تولید می‌کنند. از رزین‌های فنولیکی به‌طور گسترده

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۲/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱۲/۵، پذیرش ۱۳۹۲/۱/۳۱.

zamani@kntu.ac.ir
v.moosabeiki@gmail.com
oalisalshi@gmail.com

جدول ۱. خواص پارچه کربن استفاده شده به عنوان تقویت‌کننده (۳K-TC۳۳).

بافت الیاف	وزن سطحی (gr/m ²)	ضخامت (mm)	چگالی الیاف (gr/cm ³)	استحکام کششی (MPa)	مدول کششی (GPa)	هدایت الکتریکی (Ohm-cm)
Plain (۰-۹۰)	۲۰۰	۰٫۳	۱٫۸۰	۳۷۹۰	۲۳۴	$۱۰^{-۲} \times ۱٫۶ \sim ۳$

زمینه‌ی این نوع از کامپوزیت‌ها استفاده شده است (جدول ۲). پاراتولون سولفونیک اسید (Mercer, ۱۷۵، ۸۱) و پلی‌وینیل بوتیرال رزین (B³H, Catrin Co.) دو نوع ماده‌ی افزودنی هستند که اثر آنها بر خواص سایش، استحکام چسبندگی و زغال‌شوندگی زمینه پس از آزمایش سایش مورد بررسی قرار گرفته است.

۲.۲. ساخت کامپوزیت‌ها

چهار دسته کامپوزیت کربن/ فنولیک ساخته شده در این تحقیق عبارت‌اند از:

۱. C/P: کامپوزیت‌های زمینه رزول تقویت شده با پارچه‌ی کربن (۵۰-۵ wt درصد)؛
۲. C/P/PVB: کامپوزیت‌های زمینه رزول تقویت شده با پارچه‌ی کربن به همراه ۲۰ wt درصد بوتیرال رزین؛
۳. C/P/PTSA: کامپوزیت‌های زمینه رزول تقویت شده با پارچه‌ی کربن با ۴-۶ wt درصد پاراتولون سولفونیک اسید؛
۴. C/P/PVB/PTSA: کامپوزیت‌های زمینه رزول تقویت شده با پارچه‌ی کربن با ۴-۶ wt درصد پاراتولون سولفونیک اسید به همراه ۲۰ wt درصد بوتیرال رزین.

نمونه‌ها به روش اتوکلاو ساخته می‌شوند، به این ترتیب که پس از برش دادن پارچه‌های کربن به ابعاد ۱۰ × ۱۰ میلی‌متر آنها را به رزین آغشته کرده و درون آن قرار می‌دهند. پیش‌آغشته‌ی اولیه پس از آماده‌سازی به روش لایه‌گذاری دستی درون کیسه‌ی خلاء روی هم قرار می‌گیرند. درمورد نمونه‌های C/P/PTSA و C/P/PVB/PTSA، عامل جذب آب همان پاراتولون سولفونیک اسید است. در تهیه‌ی لمینت نهایی نیازی به تهیه‌ی پیش‌آغشته و قراردادن نمونه‌ها درون آن نیست؛ این مرحله برای این دو نوع نمونه حذف می‌شود.

۳.۲. آنالیز حرارتی

به منظور پی بردن به درصد کاهش وزن رزول مورد استفاده در دماهای مختلف برای دست‌یابی به چرخه‌ی پخت رزول، آزمایش تحلیل‌گران‌روی سنجی حرارتی (TGA)^۸ در محیط هوا و با نرخ گرمایش ۱۰ °C/min از دمای محیط تا ۷۰۰ °C توسط دستگاه Ushimatso ۵۰ روی رزول انجام شده است. نمودار به دست آمده از این آزمایش میزان افت وزنی رزول IL۸۰۰ را در دماهای مختلف تا ۷۰۰ °C نشان می‌دهد. همچنین برای تعیین چرخه‌ی پخت نمونه‌های کامپوزیتی کربن/ فنولیک، جدول ۲. مشخصات رزین فنولیک/ رزول (RESITAN IL۸۰۰).

نوع رزین	درصد جامد	گران‌روی در ۲۰ °C (MPa.s)	چگالی در ۲۰ °C (gr/cm ³)
رزول IL۸۰۰	۷۵ ± ۳	۶۰۰-۸۰۰	۱٫۲۱ ± ۰٫۰۲

که قابلیت و عمر یک ماده‌ی کامپوزیتی مقاوم به حرارت را تحت شرایط میرا نشان می‌دهد. به‌طور معمول نازل‌ها و سپرهای حرارتی برای کاربردهای هوا و فضا تحت چنین شرایطی به سر می‌برند.^۹ برای افزایش بهبود خواص مقاومت در برابر حرارت، سایش، چسبندگی لایه‌ها و کاهش هدایت حرارتی در راستای عمود بر سطح نمونه‌های کامپوزیتی می‌توان فرایندهای مختلفی روی مواد تشکیل‌دهنده‌ی این نوع کامپوزیت‌ها انجام داد یا از مواد افزودنی دیگر برای بهبود این خواص استفاده کرد.^{۱۰}

در این تحقیق اثر افزایش‌دهنده‌های مختلف، نظیر پاراتولون سولفونیک اسید (PTSA) و پلی‌وینیل بوتیرال رزین (PVB)، بر خواص بین‌لایه‌ی، حرارتی و سایش کامپوزیت‌های زمینه فنولیک بررسی می‌شود. فنولیک به دلیل خاصیت خوب ذغال‌شوندگی به عنوان زمینه‌ی کامپوزیت‌های این تحقیق انتخاب شده است. برای بررسی خواص سایش و مقاومت به سایش این کامپوزیت‌ها از یک مشعل پلاسما بهره‌گرفته شده و پارامترهایی نظیر نرخ سایش و شاخص عایق بودن نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین برای بررسی خواص بین‌لایه‌ی این نمونه‌ها از آزمون برش تیر کوتاه^۵ استفاده شده است.

۲. آزمایش‌ها

۱.۲. مواد اولیه

انواع گوناگونی از الیاف به عنوان پیش‌زمینه‌ی تولید الیاف کربن وجود دارند که دارای ویژگی‌های انحصاری و مورفولوژی ویژه هستند. پرمصرف‌ترین پیش‌زمینه‌ی الیاف کربن عبارت‌اند از: الیاف پلی‌اکریلونیتریل (PAN)^۶، الیاف سلولزی (مانند ریون، ویسکوز و بنه)، قیر حاصل از قطران ذغال‌سنگ^۷ و نوع ویژه‌ی الیاف فنولیک. الیاف کربن با پیش‌زمینه‌ی PAN از بیشترین میزان تولید و گسترده‌ترین کاربرد برخوردار است، زیرا از درجه بالای جهت‌گیری مولکولی، نقطه‌ی ذوب بالا، راندمان مناسب، سهولت فرایند ساخت و قیمت نسبتاً ارزان برخوردار است. امروزه این الیاف، تقویت‌کننده‌های مناسب برای ساخت انواع کامپوزیت‌های سرامیکی و فلزی است.^۸

کامپوزیت‌های فنولیک تقویت شده با الیاف کربن پایه ریون (ابریشم مصنوعی) به دلیل هدایت حرارتی پایین به همراه استحکام برشی خوب لایه‌های درونی، به‌طور کامل شناخته شده‌اند. بدین سبب، از این نوع کامپوزیت‌ها به عنوان عایق‌های میرا در نازل و مخروط دیافراگم موتور راکت‌های سوخت جامد استفاده می‌شود. اما به دلیل دشواری دسترسی به منابع و فرایندهای ساخت، قیمت بالا و آلودگی‌های محیطی در مراحل ساخت آن، استفاده از الیاف کربن پایه ریون محدود است و به تدریج جای خود را به الیاف کربن پایه پلی‌اکریلونیتریل داده‌اند.^{۹،۱۰}

در این تحقیق از پارچه‌های کربن پایه PAN با بافت ساده (۰-۹۰) ۳K (Tairyfil Co., Taiwan) به عنوان تقویت‌کننده استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات پارچه کربن مورد استفاده آورده شده است. همچنین از رزین فنولیک از نوع رزول (IL۸۰۰ - Resitan Co., IRI) به عنوان

کالری سنجی روشی تفاضلی (DSC)^۹ در محیط نیتروژن روی رزول تحلیل شده است.

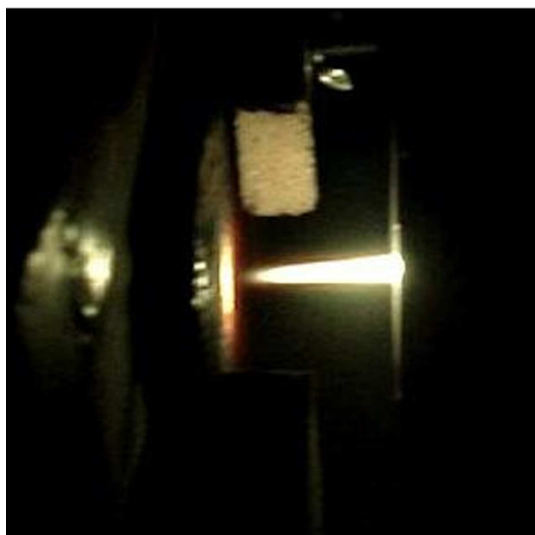
۴.۲. پخت کامپوزیت‌ها

پس از آغشته‌سازی و لایه‌گذاری درون قالب، نمونه‌های کامپوزیتی تا دمای نهایی 160°C و فشار 100 psi با نرخ گرمایش $8.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ درون اتوکلاو پخته می‌شوند. نمونه‌ها به مدت 60 دقیقه در دمای نهایی پخت باقی می‌مانند و سپس به آرامی درون اتوکلاو تا دمای محیط سرد می‌شوند.

۵.۲. آزمایش سایش

چنان که ذکر شد برای اندازه‌گیری میزان مقاومت کامپوزیت‌های میرا در برابر سایش حرارتی مطابق استاندارد ASTM E288-8^[۱۰] از یک مشعل پلاسما با گاز حامل آرگون استفاده شده است. این روش آزمون برای مشخص کردن کارایی نسبی عایق بودن حرارتی مواد میرا -- زمانی که نمونه‌ها به صورت صفحه‌ی تخت آزمایش می‌شوند -- و فرسایش سطحی -- به هنگام آزمایش عناصر استوانه‌ی -- در محیطی با جریان ثابت گاز داغ به کار برده می‌شود. در شکل ۱ تجهیزات مورد نیاز برای آزمون سایش مشاهده می‌شود؛ ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش $100 \times 100 \times 10$ میلی‌متر است.

دمای سطح پشتی نمونه‌ها باید توسط گیج No. 28AWG از نوع ترموکوپل کرومِل-آلومل^{۱۰} اندازه‌گیری شود. فاصله و زاویه‌ی بین سرمشعل و سطح جلویی نمونه به ترتیب 40 میلی‌متر و 90° است که توسط ثابت‌کننده‌ی طراحی شده برای این منظور ثابت می‌شود. در این آزمایش دما و شار حرارتی اندازه‌گیری شده برای



شکل ۲. مشعل پلاسما در حین آزمایش سایش حرارتی.

شعله به ترتیب 2700°C و $15\text{MW}/\text{m}^2$ است و قرارگیری نمونه در برابر شعله تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که هاله‌ی سرخ از پشت نمونه دیده شود؛ این زمان را «زمان شعله‌وری» می‌نامند.

معادلات ۱ و ۲ به ترتیب برای محاسبه‌ی نرخ سایش خطی و شاخص عایق بودن نمونه‌ها کاربرد دارند.

$$E = d/b \quad (1)$$

$$IT = tT/d \quad (2)$$

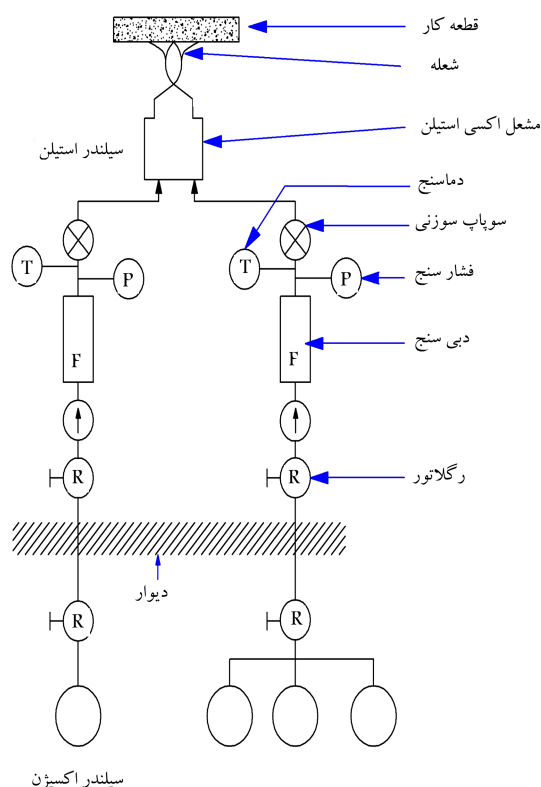
که در آن E نرخ خوردگی، d ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر، b زمان سوختگی قسمت میانی برحسب ثانیه، IT شاخص عایق بودن در دمای T ، و tT زمان رسیدن دمای سطح پشتی تا 180°C ، 180°C و 380°C برحسب ثانیه است. در شکل ۲ نمایشی از شعله‌ی پلاسما در حین برخورد به سطح نمونه نشان داده شده است.

۶.۲. آزمایش برش تیر کوتاه

برای مشخص کردن استحکام برشی بین لایه‌ی نمونه‌های کامپوزیتی مطابق استاندارد ASTM D2344^[۱۱] از یک دستگاه اونیورسال Amsler/Zwick 50 ton استفاده شده است. نمونه‌ی مورد آزمایش تیر کوتاه بریده شده‌ی از یک لمینت تخت است. استحکام برشی که با این روش به دست می‌آید معیار مناسبی برای کنترل کیفیت است.^[۱۱] هدف از انجام این آزمایش مقایسه‌ی استحکام برشی نمونه‌های کامپوزیتی مورد استفاده در این تحقیق، و نیز بحث و بررسی پیرامون رابطه‌ی مقاومت سایش نمونه‌های کامپوزیتی با استحکام چسبندگی لایه‌های آنهاست. نمونه‌های آزمون برش مطابق شکل ۳ از وسط بارگذاری می‌شوند. نسبت طول دهانه‌ی بارگذاری به ضخامت نمونه معادل ۴ در نظر گرفته شده است و سرعت حرکت کلگی عرضی برای آزمون نمونه $1\text{mm}/\text{min}$ است.^[۶] در این تحقیق هر اندازه‌گیری سه بار تکرار شده است. استحکام برشی ظاهری یا استحکام تیر کوتاه از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید.

$$F^{sbs} = 0.75 \times \frac{P_m}{b \times h} \quad (3)$$

که در آن F^{sbs} استحکام برشی یا استحکام تیر کوتاه، P_m بیشینه نیروی مشاهده شده در حین آزمایش، b عرض نمونه، و h ضخامت نمونه است.



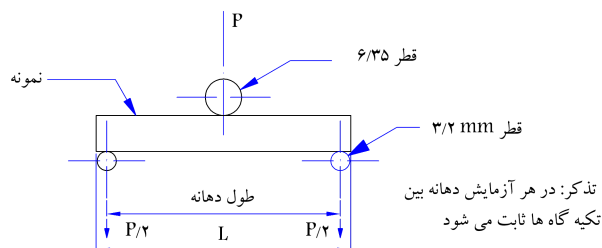
شکل ۱. تجهیزات آزمون استاندارد اکسی استیلن.^[۱۰]

جدول ۳. خواص فیزیکی و ترموفیزیکی نمونه‌های کامپوزیتی پس از ساخت.

نوع کامپوزیت	وزن (gr)	ضخامت (mm)	چگالی (gr/cm ³)	تخلخل (%)	ضریب هدایت حرارتی (W/m ² ·K)
C/P	۱۰۶٫۵۶	۸٫۰۵	۱٫۴۳	۳٫۷۴	۰٫۵۹۳۰
C/P/PVB	۱۱۵٫۴۷	۹٫۰۳	۱٫۳۰	۵٫۰۲	۰٫۱۷۹۲
C/P/PTSA	۸۸٫۶۷	۷٫۷۰	۱٫۱۱	۹٫۱۰	۰٫۲۲۸۱
C/P/PVB/PTSA	۹۳٫۴۲	۸٫۲۴	۱٫۱۵	۹٫۲۶	۰٫۲۵۴۰

جدول ۴. مقایسه‌ی خواص بین لایه‌ی کامپوزیت‌های کربن/ فنولیک.

نوع کامپوزیت	بیشینه نیروی مشاهده شده (N)	مساحت سطح مقطع نمونه (mm ²)	استحکام برشی ظاهری (MPa)
C/P	۱۸۸۷	۱۰۶٫۰۱	۱۳٫۳۵
C/P/PVB	۲۲۵۷	۱۱۲٫۱۱	۱۵٫۱۰
C/P/PTSA	۱۲۲۵	۹۴٫۹۰	۹٫۷۰



شکل ۳. شمایی از بارگذاری برشی افقی (نمونه‌ی لمینت تخت). [۱۱]

جدول ۵. مقایسه‌ی سه عامل تعیین‌کننده‌ی مقارنت کامپوزیت‌ها در برابر سایش.

نوع کامپوزیت	نرخ سایش متوسط		شاخص عایق بودن در ۳۸۰° C (s/mm)
	(gr/s)	(mm/s)	
C/P	۰٫۱۴۴۴	۰٫۱۰۱۹	۸٫۰۶
C/P/PVB	۰٫۱۱۸۵	۰٫۰۸۶۶	۸٫۵۷
C/P/PTSA	۰٫۰۹۹۴	۰٫۱۱۰۸	۷٫۵۷
C/P/PVB/PTSA	۰٫۰۹۲۷	۰٫۱۰۴۸	۷٫۷۴

(C/P/PVB)، ۱۵ درصد کم‌تر از نمونه‌های C/P است. این کاهش در مورد نرخ سایش وزنی، از نمونه‌های C/P/PVB به نمونه‌های C/P به ۱۸ درصد می‌رسد. همچنین کامپوزیت‌های C/P/PVB/PTSA نیز از کم‌ترین نرخ سایش وزنی در میان کامپوزیت‌های دیگر برخوردارند؛ این مقدار نسبت به نمونه‌های C/P مقدار قابل ملاحظه‌ی ۳۵٫۶ درصد است.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آزمایش سایش نشان می‌دهد که افزودن ۲۰ درصد PVB محلول در الکل به رزین، باعث کاهش ۱۵ درصدی در نرخ فرسایش خطی کامپوزیت‌ها نسبت به نمونه‌های C/P شده است. همچنین با توجه به بیشتر بودن شاخص عایق بودن این نمونه‌ها نسبت به سایر نمونه‌های کامپوزیتی، می‌توان گفت که این کامپوزیت‌ها دارای بالاترین مقاومت سایشی در میان سایر نمونه‌های میرا هستند. مطابق جدول ۳، اضافه شدن PVB به ساختار کامپوزیت‌های کربن/ فنولیک باعث کاهش ۷۰ درصدی ضریب هدایت حرارتی این نوع از کامپوزیت‌ها نسبت به کامپوزیت‌های C/P شده است. این مسئله سبب افزایش زمان سرخ شدن سطح پشتی نمونه‌ها و در نتیجه افزایش شاخص عایق بودن کامپوزیت‌های C/P/PVB نسبت به سایر نمونه‌ها شده است. علاوه بر این، افزودن PVB باعث افزایش استحکام پیوند بین لایه‌های کامپوزیت‌های کربن/ فنولیک شده است. این افزایش استحکام باعث افزایش پایداری کامپوزیت در برابر اثرات ترمومکانیکی ناشی از

۳. تشریح نتایج

۱.۳. خواص فیزیکی و ترموفیزیکی

در جدول ۳ خواص فیزیکی و ترموفیزیکی نمونه‌های کامپوزیتی، پس از ساخت، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نمونه‌های پخته شده با پاراتولون سولفونیک اسید نسبت به سایر نمونه‌ها از درصد تخلخل بالاتری برخوردارند. تخلخل نمونه‌های C/P/PVB/PTSA معادل ۵۹٫۶ درصد بیشتر از کامپوزیت‌های C/P است. همچنین در میان این کامپوزیت‌ها، ضریب هدایت حرارتی نمونه‌های C/P/PVB معادل ۶۹٫۷ درصد کم‌تر از نمونه‌های C/P است.

۲.۳. خواص بین لایه‌ی

در جدول ۴ استحکام برشی بین لایه‌ی نمونه‌های کامپوزیتی آزمایش شده توسط آزمون برش تیر کوتاه آورده شده است. مشاهده می‌شود که استحکام برشی نمونه‌های کامپوزیتی حاوی ۲۰ wt درصد پلی‌وینیل بوتیرال، حدوداً ۱۲ درصد بیشتر از نمونه‌ی کامپوزیتی C/P است. این افزایش استحکام به دلیل بهبود شرایط اتصال بین زمینه‌ی فنولیک و الیاف کربن است و نشان می‌دهد که افزودن PVB باعث افزایش استحکام برشی و چسبندگی لایه‌ها در راستای ضخامت این نوع از کامپوزیت‌ها می‌شود.

۳.۳. نتایج آزمون سایش با مشعل پلاسما

در جدول ۵ نتایج حاصل از آزمایش سایش توسط مشعل پلاسما روی این چهار دسته از نمونه‌های کامپوزیتی ارائه شده است. در این جدول میزان مقاومت حرارتی و سایشی نمونه‌های کامپوزیتی توسط سه عامل «نرخ سایش خطی» (mm/s)، «نرخ سایش وزنی» (gr/s) و «شاخص عایق بودن» مشخص می‌شود. در این میان نرخ سایش که از تقسیم ضخامت نمونه بر مدت زمان سپری شده تا رؤیت حلقه‌ی قرمز در پشت نمونه به دست می‌آید، مهم‌ترین عامل بررسی نحوه‌ی عملکرد محافظ‌های حرارتی میراست. اما با دقت به داده‌های جدول ۵ مشاهده می‌شود که نرخ سایش خطی کامپوزیت‌های کربن/ فنولیک حاوی ۱۸-۲۰ wt درصد پلی‌وینیل بوتیرال

ساختاری با درصد تخلخل بالاتر نسبت به سایر نمونه‌ها از راندمان سایش مناسبی برخوردار نیست.

تمامی نتایج و تحلیل‌های ذکرشده حاکی از آن است که تلفیقی از خواص مورد انتظار-- از قبیل استحکام مکانیکی زغال باقی‌مانده پس از آزمایش سایش، افزایش استحکام بین لایه‌های کامپوزیت، کاهش هدایت حرارتی و مقاومت حرارتی بالا-- در نهایت منجر به ساخت کامپوزیت‌های C/P/PVB شده است که خواص بهتری نسبت به سایر کامپوزیت‌های ساخته شده دارد.

جدایش ماکروسکوپی^{۱۱} شده و در نهایت باعث کاهش نرخ سایش خطی خواهد شد. با بررسی نتایج حاصل از آزمایش تیرکوتاه می‌توان به رابطه‌ی مستقیم استحکام برشی و نرخ سایش خطی پی برد. این مسئله نشان می‌دهد که به کارگیری روش‌هایی برای افزایش استحکام چسبندگی الیاف و زمینه می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر مقاومت سایش کامپوزیت‌های میرا داشته باشد. درمورد نمونه‌های حاوی ۴-۶ wt درصد پاراتولون سولفونیک‌اسید، اگرچه افزودن PTSA به‌عنوان عامل پخت، مراحل فرایند تولید نمونه‌ها را تسهیل می‌کند، نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده به‌دلیل دارا بودن

پانویس‌ها

1. p-toluene sulfonic acid
2. polyvinyl butyral
3. ablation
4. heat sink
5. short beam
6. poly acrylo nitrile
7. coal tar pitch
8. thermal gravimetry analysis
9. differential scanning calorimetry
10. Chromel-Alumel
11. spallation

منابع (References)

1. Lee, Y.J. and Joo, H.J. "Ablation characteristics of carbon fiber reinforced carbon (CFRC) composites in the presence of silicon carbide (SiC) coating", *Surface and Coatings Technology*, **180-181**, pp. 286-289 (2004).
2. Lee, S.M., *International Encyclopedia of Composites*, Vol 1, VCH Publishers (1990).
3. Park, J.K., Cho, D. and Kang, T.J. "A comparison of the interfacial, thermal, and ablative properties between spun and filament yarn type carbon fabric/phenolic composites", *Carbon*, **42**(2), pp. 795-804 (2004).
4. Bahramian, A.R., Kokabi, M., Navid Famili, M.H. and Beheshti, M.H. "Ablation and thermal degradation behavior if a composite based on resol type phenolic resin: Process modeling and experimental", *Polymer*, **47**, pp. 3661-3673 (2006).
5. Cho, D. and Yoon, B.II. "Micro structural interpretation of the effect of various matrices on the ablation properties of carbon-fiber-reinforced composite", *SicTechnol*, **61**, pp. 271-280 (2001).
6. Wang, S., Chen, Z.H., Ma, W.J. and Maa, Q.S. "Influence of heat treatment on physical-chemical properties of PAN-based carbon fiber", *Ceramics International*, **32**, pp. 291-295 (2006).
7. JPark, J.K. and Kang, T.J. "Thermal and ablative properties of low temperature carbon fiber-phenol formaldehyde resin composites", *Carbon*, **40**, pp. 2125-2134 (2002).
8. Teodore, J.R. and et al., *Engineering Materials Handbook*, Vol. 1, Composites, ASM International, USA (1987).
9. Knag, T.J., Shin, S.J. Jung, K. and Park, J.K. "Mechanical, thermal and ablative properties of interplay continuous / spun hybrid carbon composites", *Carbon*, **44**, pp. 833-839 (2006).
10. Standard Test Method for Oxyacetylene Ablation Testing of Thermal Insulation Materials, ASTM E285-80.
11. Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates, D 2344/D 2344M-2000.

