

تأثیر تقویت‌کننده‌های مختلف بر خواص حرارتی، سایشی و ریزساختاری کامپوزیت‌های زمینه فنولیک

جمال زمانی^{۱*}، علی شکوه‌فر^۲، پوریا پاسبخش^۳

۱- دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲- استاد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

*تهران، صندوق پستی ۱۹۹۹-۱۹۳۹۵

zamani@kntu.ac.ir

(دریافت مقاله: آبان ۱۳۸۵، پذیرش مقاله: آذر ۱۳۸۶)

چکیده - در این تحقیق اثر تقویت‌کننده‌های مختلف، نظیر الیاف کربن، الیاف شیشه، اکسید سیلیسیم و اکسید زیرکونیوم، بر خواص سایشی، حرارتی و ریزساختاری کامپوزیت‌های زمینه فنولیک بررسی می‌شود. رزین‌های فنولیک به دلیل خاصیت زغال‌شوندگی منحصر به فردشان در دماهای بالا کاربرد ویژه‌ای در ساخت محافظ‌های حرارتی در صنایع هوافضا دارند. در این تحقیق، سه دسته نمونه با درصدها و مواد مختلف ساخته شده است. دسته اول دارای ۳۷/۵٪ رزول به‌عنوان زمینه و ۶۲/۵٪ درصد تقویت‌کننده، دسته دوم شامل ۴۰٪ رزول، ۴۰٪ اکسید سیلیسیم و ۲۰٪ اکسید زیرکونیوم و دسته سوم کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن است که با ۵٪ وزنی اکسید زیرکونیوم پوشش داده شده‌اند. برای بررسی خواص حرارتی، سایشی و ریزساختاری کامپوزیت‌ها نظیر نرخ سایش، ابتدا کامپوزیت‌های ساخته شده، از طریق مشعل شماره ۷ و با شعله اکسیژن استیلن، تحت حرارت 2800°C و شار حرارتی $8/35\text{ MW/m}^2$ قرار داده شد و سپس بر اساس شاخص‌های تحلیلی همانند نرخ سایش و تحلیل میکروسکوپی، بررسی‌های لازم انجام شد. در پایان مشخص شد که نرخ سایش نمونه‌های تقویت شده با الیاف کربن، ۲۰٪ پایین‌تر از سایر نمونه‌ها است. همچنین افزایش اکسید زیرکونیوم نشانگر افزایش نرخ سایش است.

کلید واژگان: نرخ سایش، کامپوزیت زمینه رزول، کامپوزیت‌های کربنی، خاصیت فداشوندگی، مقاومت به شوک حرارتی.

آرودینامیک، ساختارهای پیش‌رانس و تجهیزات زمینی را از اثر شدید دماها و نرخ‌های حرارتی بسیار بالا حفظ می‌کنند. حفاظت حرارتی از طریق سایش از طریق فرایند

۱- مقدمه

پلیمرهای ساینده و کامپوزیت‌های پلیمری، نقش مهمی را در صنعت هوافضا ایفا می‌کنند. آنها سطوح

حرارتی برای اهداف سایشی در صنعت هوافضا توسط محققان مطالعه شده است [۱، ۴، ۵].

در بسیاری از کاربردهای نظامی و هوافضا، استفاده از مواد عایق حرارتی با خواص ضدسایشی مورد توجه قرار گرفته است. کاهش هدایت حرارتی کامپوزیت در این‌گونه کاربردها بسیار مهمتر از بهبود خواص مکانیکی آن است. برای کاهش هدایت حرارتی کامپوزیت با زمینه فنولیک تقویت شده با الیاف کربن، باید به کنترل ضریب هدایت حرارتی الیاف تقویت‌کننده بیشتر توجه شود [۲].

هدف از این تحقیق، بررسی تجربی اثر تقویت‌کننده‌های مختلف مانند الیاف شیشه، کربن بر خواص حرارتی، سایشی و ریزساختاری کامپوزیت‌های زمینه فنولیک است.

۲- آماده‌سازی قطعات و انجام آزمایش‌ها

۲-۱- مواد اولیه

در این تحقیق از پارچه کربن، پارچه شیشه، اکسید سیلیسیم و اکسید زیرکونیوم به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده شده است. از الیاف کربن بر پایه PAN در بافت پارچه‌های کربن (۲۸۲، Hexcel Co، آمریکا) و الیاف شیشه (۱۰۶۴، Hexcel Co، آمریکا) به‌عنوان تقویت‌کننده و از اکسید زیرکونیوم شرکت فوسکر^۱ آفریقای جنوبی و اکسید سیلیسیم شرکت مرکل^۲ به‌عنوان پرکننده‌ها در تقویت کامپوزیت‌ها استفاده شده است. همچنین از رزین فنولیک از نوع رزول (IL ۸۰۰، رزیتان، ایران) به‌عنوان زمینه برای کامپوزیت‌ها استفاده شده است (جدول ۱). دلیل استفاده از این نوع کامپوزیت‌ها، خاصیت زغال‌شوندگی زمینه فنولیک و ضریب هدایت حرارتی

انتقال جرم و حرارت خود تنظیم‌شونده به‌دست می‌آید. در این فرایند ماده عایق با هدایت حرارتی پایین بر اثر پیرولیز لایه‌های سطحی به زغال تبدیل شده و لایه زغال نسوز ترد بر روی سطح عایق تشکیل می‌شود [۱]. گازهای حاصل از پیرولیز و انبساط حرارتی درون کامپوزیت، تنش‌هایی را در لایه زغال ایجاد می‌کنند که اگر ماده زغال‌شونده قبل از پیرولیز و تبدیل به زغال شدن، تقویت نشود، به‌راحتی بر اثر افزایش نرخ سایش می‌شکند. بنابراین این مواد ساییده شده و کاهنده حرارت عموماً شامل یک زمینه پلیمری نظیر رزین‌های گرماسخت (فنولیک)، بوتادین آکریلونتریل (NBR) یا اتیلن پروپیلن داین مونومر (EPDM) هستند که توسط نسبت حجمی بالا از الیاف (بیش از ۵۰٪) (انواع پارچه‌های بافته شده از الیاف گرافیت، کربن، شیشه یا کولار) یا پرکننده‌هایی نظیر (سیلیکا، اکسیدهای فلزی، آسبست یا سیلیکات‌ها) تقویت می‌شوند [۲]. همواره رزین فولیک به‌عنوان نوعی رزین گرماسخت با عنوان زمینه برای مواد کامپوزیتی ساییده شونده و کاهنده حرارت - به‌دلیل توانایی در تشکیل زغال مؤثر در حین پیرولیز - شناخته شده است [۳].

مقاومت ساییدگی و توانایی در کاهندگی ماده پلیمری، به‌شدت به دو پارامتر مواد و محیط بستگی دارد. ترکیب ساختاری می‌تواند بر میزان عایق بودن سیستم و خواص ساییدگی و کاهندگی آن تأثیر بگذارد [۱]. نوع تقویت‌کننده در کاهش میزان نرخ سایش کامپوزیت‌های زمینه فنولیک بسیار تأثیرگذار است. کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن به‌عنوان بهترین محافظ‌های حرارتی و مقاوم در برابر سایش دمای بالا شناخته شده‌اند [۴]. استفاده از الیاف کربن، الیاف شیشه، اکسید سیلیسیم و اکسید زیرکونیوم به‌عنوان تقویت‌کننده در عایق‌های

1. Foskor
2. Merkel

قالبی به ابعاد $72 \times 43 \times 13$ mm قرار داده می‌شوند. همچنین برای ساخت نمونه‌های S/R و Z/S/R پس از مخلوط کردن اکسیدهای سرامیکی با رزول در درون مخلوط‌کن به مدت ۲۰ دقیقه، قالب از خمیر حاصل پر می‌شود. جدول ۲ مشخصات کامپوزیت‌های ساخته شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲ ترکیب نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده

wt%		wt%		wt%		نمونه کامپوزیتی
--	رزول	۶۲/۵	پارچه کربن	۳۷/۵	CF/R	
--	رزول	۶۲/۵	پارچه شیشه	۳۷/۵	GF/R	
رزول	۴۰	سیلیکا	۴۰	زیرکونیوم	۲۰	Z/S/R
رزول	۶۲/۵	سیلیکا	۳۷/۵	زیرکونیوم	۰	S/R
رزول	۵۷/۵	زیرکونیوم	۵	پارچه کربن	۳۷/۵	CF/R/Z

۳-۲- آزمایش حرارتی TGA

تحلیل حرارتی^۱ TGA در محیط هوا و با نرخ گرایش $10^\circ C/min$ از دمای محیط تا $700^\circ C$ توسط دستگاه مربوط^۲ برای تعیین تغییرات وزنی رزول بر اثر افزایش دما انجام شد.

۴-۲- آزمایش حرارتی DSC

تحلیل DSC در محیط نیتروژن برای مشخص کردن سیکل پخت رزول در ساخت کامپوزیت‌ها تحت پرس گرم، از طریق تعیین پیک‌های گرماگیر و گرماده در منحنی DSC (تغییرات آنتالپی با دما) با استفاده از دستگاه مربوط^۳ انجام شد.

پایین آن است. همچنین مقاومت به اکسیداسیون الیاف کربن، ایجاد چسبندگی مناسب با رزول و دمای بالای ذوب از دیگر علل استفاده از این کامپوزیت‌ها است.

جدول ۱ خواص رزول مورد استفاده به‌عنوان زمینه

نوع رزول	چگالی (g/cm^3)	درصد جامد	لزجت (Pa.s)
IL۸۰۰	1.21 ± 0.02	۷۵+۳٪	۶۰۰-۸۰۰

۲-۲- ساخت کامپوزیت‌ها

کامپوزیت‌های زمینه فنولیک با تقویت‌کننده‌های مختلفی که در این تحقیق ساخته شده، به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

۱-CF/R= نشان‌دهنده کامپوزیت‌های زمینه رزول

تقویت شده با پارچه کربن است.

۲-CF/R/Z= نشان‌دهنده کامپوزیت‌های زمینه

رزول تقویت شده با پارچه کربن است که توسط لایه‌ای از زیرکونیوم در سطح پشتی کامپوزیت پوشش داده شده.

۳-GF/R= نشان‌دهنده کامپوزیت‌های زمینه فنولیک

تقویت شده با پارچه شیشه است.

۴-S/R= نشان‌دهنده کامپوزیت‌های زمینه فنولیک

تقویت شده با اکسید سیلیسیم است.

۵-Z/S/R= نشان‌دهنده کامپوزیت‌های زمینه

فنولیک تقویت شده با اکسید سیلیسیم و اکسید زیرکونیوم است.

برای ساخت نمونه‌ها از دستگاه پرس گرم استفاده شده است. برای آماده‌سازی نمونه‌های CF/R و CF/R/Z و GF/R در مرحله آغشته‌سازی الیاف به رزین، ابتدا پارچه‌ها در ابعاد 72×43 mm به مدت ۲۴ ساعت درون حمام به رزول آغشته شده و سپس پارچه‌ها در درون

1. Thermal gravimetric analysis
2. TGA-50- shimadzu, Japan
3. Polymer Laboratory Model PLDSC

شار حرارتی جریان ثابت انجام شد [۷]. دمای آزمایش بین 17°C تا 140°C تغییر کرده و اندازه نمونه‌ها برابر $72 \times 43 \times 10 \text{ mm}$ برابر با سطح المنت حرارتی بوده است. اندازه‌گیری‌ها توسط معادله زیر به ضریب هدایت حرارتی قابل تبدیل است:

$$K = \frac{V.I.t}{\gamma.A.\Delta T} \quad (1)$$

V ولتاژ اعمال شده به المنت (V)، I جریان عبوری از المنت (amp)، t ضخامت نمونه (m)، A مساحت نمونه (m^2) و ΔT تغییرات نسبت به دمای سطح پشت نمونه‌ها است.

۲-۷- آزمایش حرارتی سایش

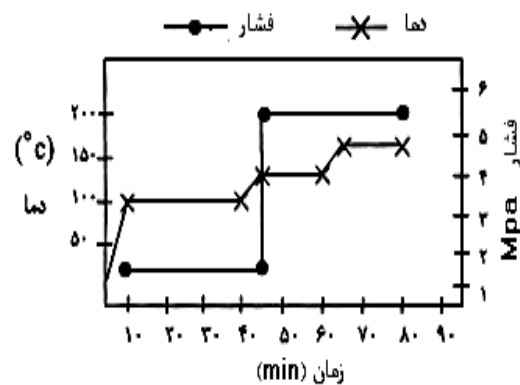
برای اندازه‌گیری میزان مقاومت کامپوزیت‌ها در برابر سایش حرارتی مطابق استاندارد ASTM E۲۸۵-۸۰ [۸] از مشعل اکسی‌اسیتیلن استفاده شده است. ابعاد نمونه‌ها برابر $72 \times 43 \times 10 \text{ mm}$ بوده و ترموکوپل برای ثبت دما توسط رزین به پشت نمونه متصل شده است. دمای شعله در حدود 2800°C و شار حرارتی آن در حدود $8/35 \text{ MW/m}^2$ بوده است. فاصله و زاویه بین سر مشعل و سطح جلویی نمونه به ترتیب برابر 20 mm و 90° درجه و نرخ سایش از طریق تقسیم ضخامت اولیه کامپوزیت بر زمان سرخ شدن سطح پشتی به دست می‌آید. زمان سرخ شدن سطح پشتی نمونه‌ها درست زمانی است که سطح پشتی کامپوزیت‌ها پس از قرار گرفتن در برابر شعله، شروع به سرخ شدن می‌کند.

عامل دیگر محاسبه شده، شاخص عایق بودن است که از تقسیم زمان رسیدن دمای سطح پشتی کامپوزیت به

۲-۵- پخت کامپوزیت‌ها

با توجه به استخراج منحنی TGA و DSC از آزمایش‌های فوق در این تحقیق، پخت نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده، تحت دستگاه پرس بر اساس شکل ۱ انجام شد، که مشروح آن چنین است:

ابتدا دمای قالب تحت پرس گرم از دمای محیط تا 104°C به مدت ۱۰ دقیقه و تحت فشار $1/4 \text{ MPa}$ بالا برده می‌شود. قالب با دمای ثابت 104°C و تحت فشار ثابت $1/4 \text{ MPa}$ به مدت ۳۰ دقیقه نگاه داشته می‌شود. سپس دمای قالب در ۵ دقیقه تا 135°C درجه بالا برده می‌شود. پس از رسیدن دما به 135°C فشار تا $5/4 \text{ MPa}$ افزایش می‌یابد. قالب به مدت ۱۵ دقیقه در دمای 135°C و فشار $5/4 \text{ MPa}$ باقی می‌ماند. در مرحله آخر دمای قالب در مدت ۵ دقیقه تا 160°C افزایش می‌یابد و قالب تحت همین دما و فشار ثابت $5/4 \text{ MPa}$ به مدت ۱۵ دقیقه تحت پرس گرم نگاه داشته می‌شود.



شکل ۱ سیکل پخت نمونه‌های کامپوزیتی تحت دستگاه پرس گرم

۲-۶- آزمایش هدایت حرارتی

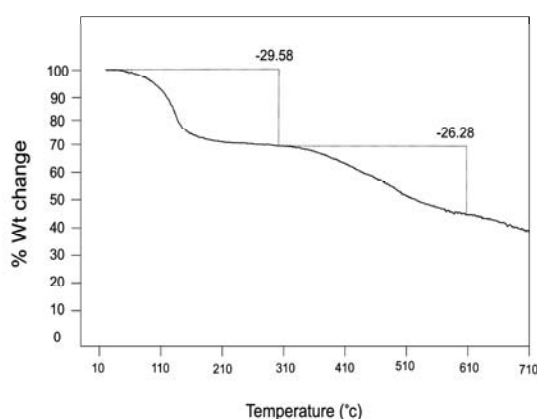
آزمایش اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی مطابق روش استاندارد ASTM C۱۷۷-۸۵ برای اندازه‌گیری

جدول ۳ خواص فیزیکی کامپوزیت‌های ساخته شده قبل از آزمایش حرارتی سایش

مشخصات	CF/R	GF/R	CF/R/Z	S/R	Z/S/R
وزن خشک (gr)	۳۴/۹۶	۴۵/۷	۴۲/۱۳	۴۹/۸۳	۵۱/۳۲
ضخامت (mm)	۹/۸۲	۹/۹۸	۹/۲۵	۹/۶۳	۹/۳۴
چگالی توده‌ای (gr/cm^3)	۱/۱۸۲	۱/۴۵	۱/۵۳	۱/۷۶	۱/۹۴
تخلخل ظاهری (%)	۴/۸۴	۴/۲۳	۴/۱	۳/۶۸	۴/۳۸
درصد جذب آب (%)	۳/۴	۳/۵	۲/۹۵	۲/۷۸	-

۲-۲- نتایج آزمایش TGA

شکل ۲ منحنی به‌دست آمده از آزمایش TGA مربوط به رزول را در محیط هوا نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که زغال باقی‌مانده از رزول در دمای $700^\circ C$ ، در حدود ۴۰٪ بوده و سایش حرارتی رزول در دمای بالا با افزایش دما افت می‌کند.



شکل ۲ نمودار TGA در محیط هوا با نرخ $10^\circ C/min$

دماهای $80^\circ C$ ، $180^\circ C$ ، $380^\circ C$ بر ضخامت نمونه به‌دست می‌آید.

معادلات (۲) و (۳) به ترتیب نرخ سایش و شاخص عایق بودن را نشان می‌دهند:

$$(2) \quad \text{نرخ سایش} = d/b$$

$$(3) \quad \text{شاخص عایق بودن} = t_T/d$$

d ضخامت نمونه بر حسب (mm)، b و t_T زمان سرخ شدن سطح پشتی و تغییرات دمای در آن سطح بر حسب ثانیه است.

۲-۸- مشاهده ریزساختاری

مشاهدات ساختاری بر روی تقویت‌کننده‌ها و زمینه نمونه‌های GF/R، CF/R، CF/R/Z پس از آزمایش حرارتی سایش به‌وسیله دستگاه میکروسکپ الکترونی (SEM) انجام شده است.

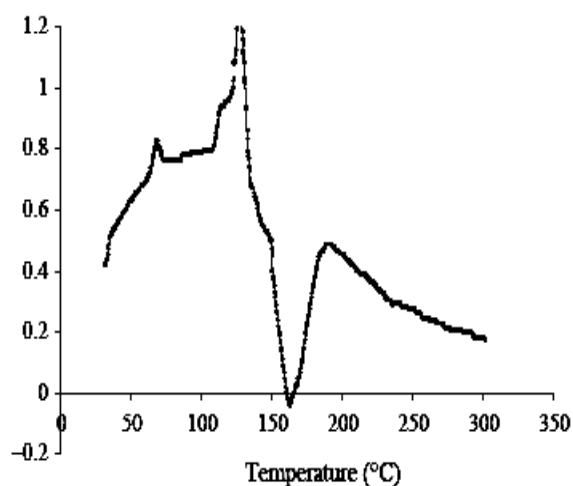
۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- مشخصات فیزیکی

جدول ۳ خواص فیزیکی کامپوزیت‌ها را قبل از آزمایش حرارتی سایش و پس از ساخت نشان می‌دهد. چگالی توده‌ای، تخلخل ظاهری و درصد جذب آب مطابق استاندارد ASTM C 20-87 [۹] به‌دست آمده است. قابل ذکر است که تخلخل ظاهری از طریق انجام آزمایش مطابق استاندارد ASTM C 70-87 مشخص می‌شود.

۳-۳- نتایج آزمایش DSC

شکل ۳ نتایج آزمایش DSC را برای رزول در محیط نیتروژن نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رزول بر اثر افزایش دما دچار واکنش‌های گرماده و گرماگیر می‌شود که در این واکنش‌ها به صورت یک پیک گرمایزا در دمای 135°C و یک پیک گرماگیر در دمای 160°C در منحنی شکل ۳ دیده می‌شود. این دماها دمای اصلی پخت رزول در ساخت کامپوزیت‌ها هستند، زیرا بیشترین تغییرات انرژی بر اثر گرم شدن رزول در این دماها رخ می‌دهد.



شکل ۳ نمودار DSC در محیط نیتروژن

جدول ۴ ضریب هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها

نمونه کامپوزیت	CF/R	CF/R/Z	S/R	Z/S/R
ضریب هدایت حرارتی $\frac{w}{m \cdot ^{\circ}\text{K}}$	۱/۱۸	۱/۴۵۶	۱/۶۱۷	۱/۴۶

۳-۵- خواص سایشی

میزان مقاومت سایشی نمونه‌های کامپوزیتی در برابر حرارت، با پارامترهای مختلفی سنجیده می‌شود که عبارتند از: نرخ سایش بر حسب ضخامت (mm/s)، نرخ سایش بر حسب تغییرات وزنی (gr/s) (وزن از دست رفته تقسیم بر زمان سرخ شدن سطح پستی)، شاخص عایق بودن در 380°C (s/mm)، زمان سرخ شدن سطح پستی و عیوب مشاهده شده با چشم غیرمسلح. جدول ۵ مقادیر این پارامترها را برای تمامی نمونه‌های کامپوزیتی با زمینه فنولیک نشان می‌دهد.

نمونه‌های CF/R/Z طولانی‌ترین و نمونه‌های S/R کوتاه‌ترین زمان سرخ شدن سطحی پشته را دارند. زمان سرخ شدن سطح پستی به بازه زمانی گفته می‌شود که سطح پستی نمونه شروع به سرخ شدن می‌کند [۵]. نمونه‌های کامپوزیتی CF/R/Z کمترین نرخ سایش (mm/s) و (gr/s) را از خود نشان می‌دهند. شکل ۴ نرخ سایش (mm/s) کامپوزیت‌ها و شکل ۵ شاخص عایق بودن آنها را در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد.

۳-۴- نتایج هدایت حرارتی

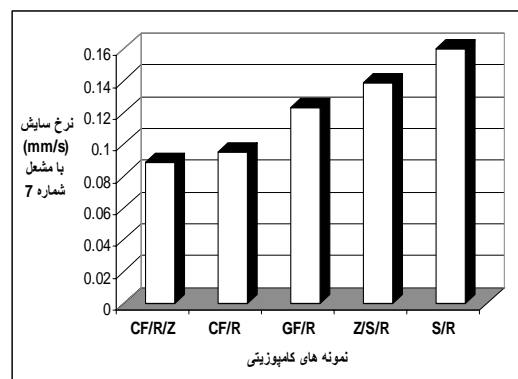
در جدول ۴ نتایج حاصل از ضریب هدایت حرارتی نمونه‌ها آورده شده است.

جدول ۵ مقایسه سه پارامتر تعیین کننده در رفتار کامپوزیت‌های مقاوم به سایش در دو مشعل ۴ و ۷

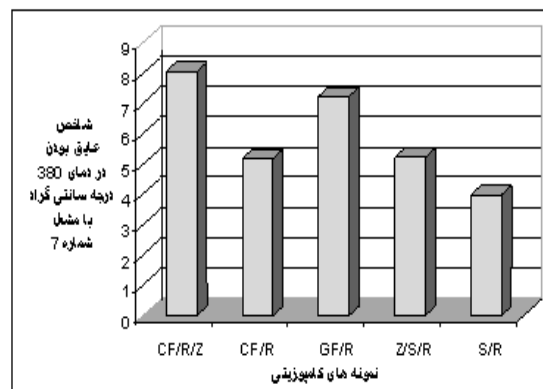
نرخ سایش (gr/s) در مشعل ۷	نرخ سایش (gr/s) در مشعل ۴	شاخص عایق بودن در ۳۸۰ °C (s/mm) در مشعل ۷	شاخص عایق بودن در ۳۸۰ °C (s/mm) در مشعل ۴	نرخ سایش (mm/s) در مشعل ۷	نرخ سایش (mm/s) در مشعل ۴	
۰/۰۷۷	۰/۰۳۹۷	۷/۲۲±۰/۱۱	۱۲/۴۸±۰/۱۳۲	۰/۰۹۵	۰/۰۵۲۱	CF/R
۰/۰۷۵۵	-	۸/۰۲±۰/۱۱	-	۰/۰۸۸۵	-	CF/R/Z
۰/۱۱۵۷	۰/۰۵۸	۳/۹۷±۰/۰۵۵	۷/۴±۰/۱۱۸	۰/۱۵۹۸	۰/۰۸۶۲	S/R
۰/۱۲۹۶	۰/۰۷۳۹	۵/۱۶۳±۰/۰۸۲۵	۷/۲۹۱±۰/۰۵۴	۰/۱۲۳۲	۰/۰۸۰۴	GF/R
۰/۱	-	۵/۳۳۲±۰/۱۰۴	-	۰/۱۳۵۸	-	Z/S/R

همان‌طورکه در شکل ۴ و جدول ۵ دیده می‌شود، نرخ سایش نمونه‌های CF/R/Z، ۶/۸٪ از نمونه‌های CF/R کمتر است. این نشان می‌دهد که افزودن لایه‌ای از اکسید زیرکونیوم سبب بهبود کیفیت و افزایش مقاومت حرارتی کامپوزیت‌های با زمینه فنولیک تقویت شده با الیاف کربن شده است. همچنین دلیل بالا بودن نرخ سایش (gr/s) نمونه‌های GF/R، ایجاد حفره‌ای به عمق ۵mm در مرکز این نمونه‌ها است. دمای پایین ذوب الیاف شیشه باعث شده که این نمونه‌ها در مرکز دچار ذوب‌شدگی الیاف و ایجاد حفره بر اثر قرار گرفتن در برابر شعله با دمای بالا شوند. نمونه‌های CF/R/Z کمترین و نمونه‌های S/R بالاترین نرخ‌های سایش (mm/s) را دارند.

همچنین با دقت در شکل ۵ می‌توان دریافت که نمونه‌های CF/R/Z بیشترین و نمونه‌های S/R کمترین شاخص عایق بودن را در دمای ۳۸۰ °C دارند. کمترین نرخ سایش (mm/s) و بالاترین شاخص عایق بودن کامپوزیت‌های CF/R و CF/R/Z نشان می‌دهد که این کامپوزیت‌ها، بالاترین مقاومت سایشی را در میان سایر کامپوزیت‌ها دارند.



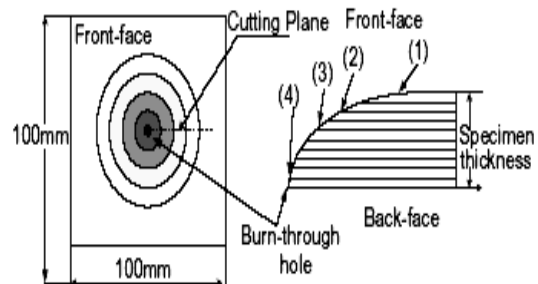
شکل ۴ مقایسه نرخ سایش (mm/s) نمونه‌های کامپوزیتی تحت مشعل شماره ۷



شکل ۵ مقایسه شاخص عایق بودن نمونه‌های کامپوزیتی تحت مشعل شماره ۷

۳-۶- مشاهدات ریزساختاری

برای نشان دادن حالت‌های سایش کامپوزیت‌ها، تصاویر SEM از سطوح مختلف سایش نمونه‌های CF/R و CF/R/Z به علت مقاومت سایشی بالای آنها گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده، کامپوزیت‌ها پس از آزمایش حرارتی سایش به چهار ناحیه تقسیم می‌شوند. ناحیه ۴ سطحی است که در برابر شعله مستقیم قرار دارد و سطح ۱ سطحی از پشت نمونه است. سطوح ۲ و ۳ نیز لایه‌های درونی می‌باشند.



شکل ۶ طرحواره نحوه بررسی مقاطع نمونه برای مشاهده با میکروسکپ الکترونی [۱۱]

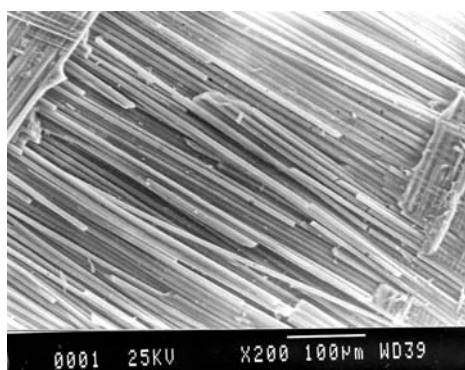
از طریق مشاهده میکروسکوپی نواحی ۱ تا ۴ نمونه‌های CF/R و CF/R/Z، الگوی سایش مطابق شکل ۷ به دقت بررسی شده است. مطابق شکل‌های C(۴) و CZ(۴) مشاهده می‌شود که الیاف در ناحیه ۴ به وسیله ترکیبی از فرایندهای سایش ترمومکانیکی (شامل جداسازی - ایجاد حفره - سوزنی شدن الیاف)، ترموشیمیایی و ترموفیزیکی (شامل تغییر وزن در برابر شعله)، ناشی از اثر شعله به صورت‌های سوزنی شکل خواهند شد. قابل ذکر است که الیاف

در مرحله قبل از سوزنی شدن، با تقلیل سطح مقطع روبه‌رو می‌شوند.

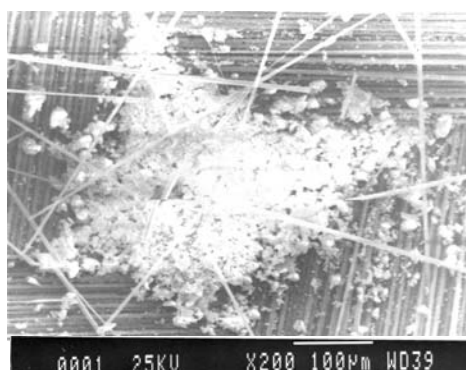
الیاف کربن در سطح نمونه یعنی ناحیه ۴ - که بیشترین تماس را با شعله قرار دارد - به راحتی از ضعیف‌ترین نقطه (ناحیه گردنی شدن در الیاف) می‌شکنند و بر اثر سایش ترمومکانیکی به صورت سوزنی شکل درمی‌آیند.

از تصاویر ((C(۳), CZ(۳)) و ((C(۲), CZ(۲)) و ((C(۱), CZ(۱)) در شکل ۷ - که به ترتیب متعلق به نواحی ۳، ۲، و ۱ است - مشخص می‌شود که الیاف سوزنی در این نواحی دیده نمی‌شوند. این به این دلیل رخ می‌دهد که: اول این نواحی در برابر اثر مستقیم شعله قرار ندارند، دوم شار حرارتی شعله آنقدر زیاد نیست که اثر سایش ترمومکانیکی در این نواحی دیده شود و سوم وجود رزین زغال شده در این نواحی در کنار الیاف، از اثر ترمومکانیکی و ترموفیزیکی شعله بر الیاف می‌کاهد. وجود لایه رزین محافظ بر روی الیاف، از سایش شدیدتر الیاف - که منجر به گردنی شدن و سوزنی شدن الیاف می‌شود - جلوگیری می‌کند.

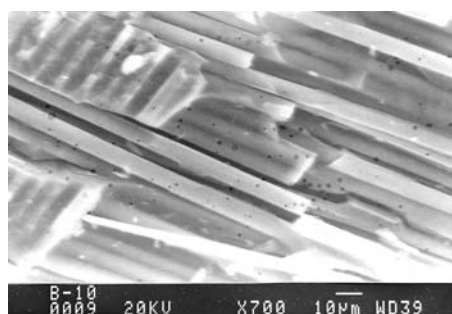
همچنین با توجه به تصاویر CZ(۴)، C(۳)، C(۲)، CZ(۲)، CZ(۱)، C(۱) مشاهده می‌شود که برخی الیاف، بر اثر سایش ترمومکانیکی و ترموفیزیکی (شامل تغییر وزن در برابر شعله) شکسته می‌شوند. شکستن الیاف به صورت گروهی یا واحد بر اثرات سایش ناشی از شعله با دما و فشار حرارتی بالا رخ می‌دهد. اکسایش الیاف، تصعید رزین، ترک‌های عمیق در زمینه، تعدادی از آثار ناشی از سایش ترموشیمیایی، ترمومکانیکی و ترموفیزیکی شامل تغییر وزن در برابر شعله است. اثر اکسایش و عیوب دیگر نظیر پوسته‌ای شدن و ایجاد حفره در الیاف را می‌توان در شکل ۸ مشاهده کرد.



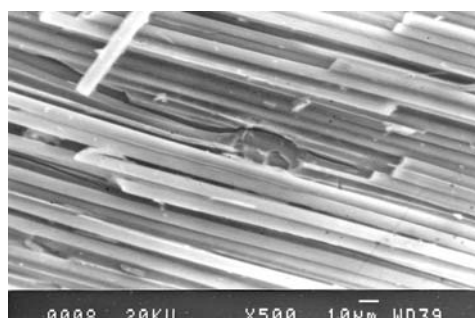
CF/R(1)



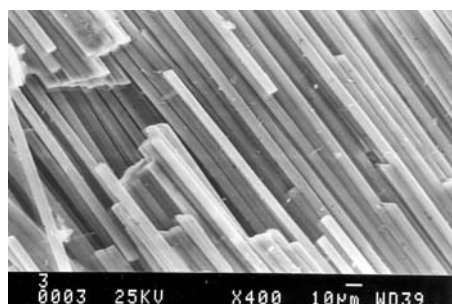
CF/R/Z(1)



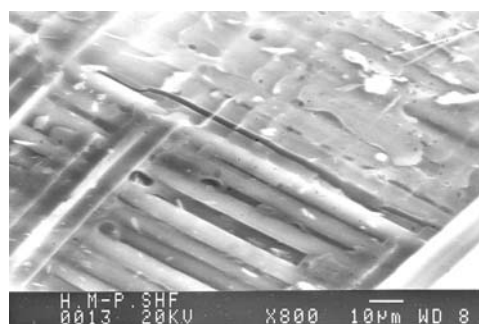
CF/R(2)



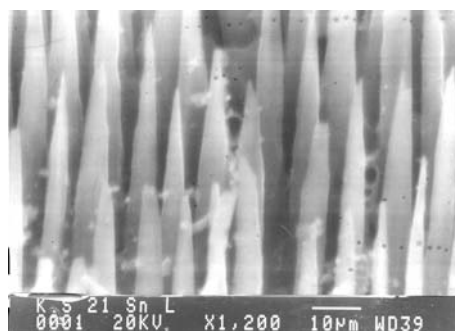
CF/R/Z (2)



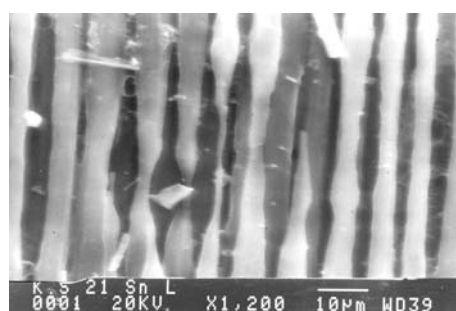
CF/R(3)



CF/R/Z (3)



CF/R(4)



CF/R/Z (4)

شکل ۷ تصاویر میکروسکپ الکترونی از مقاطع ۱ تا ۴ از الیاف و زمینه ساییده شده از نمونه‌های CF/R و CF/R/Z

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- کامپوزیت‌های CF/R/Z کمترین و کامپوزیت‌های S/R بیشترین نرخ سایش (mm/s) را از خود نشان می‌دهند.
- ۲- نرخ سایش (mm/s) کامپوزیت‌های ۶۸٪CF/R/Z کمتر از کامپوزیت‌های CF/R است.
- ۳- کامپوزیت‌های CF/R/Z بالاترین شاخص عایق بودن را دارند.

۴- سوزنی شدن الیاف و فقدان رزول در سطح ۴ به دلیل اثر فرایندهای سایش ترمودینامیکی، ترموفیزیکی و ترموشیمیایی شعله است، زیرا این ناحیه در معرض تابش مستقیم شعله با دمای $2800^{\circ}C$ و شار حرارتی بالای $8/53 MW/m^2$ قرار داشته است.

۵- وجود زمینه زغال شده در لایه‌های درونی کامپوزیت، الیاف را از اثر سایش شدید ناشی از شعله حفظ کرده است. اگر شار حرارتی شعله افزایش یابد، زمینه بیشتری از کامپوزیت خارج شده و الیاف دچار سایش ترمودینامیکی بیشتری می‌شوند.

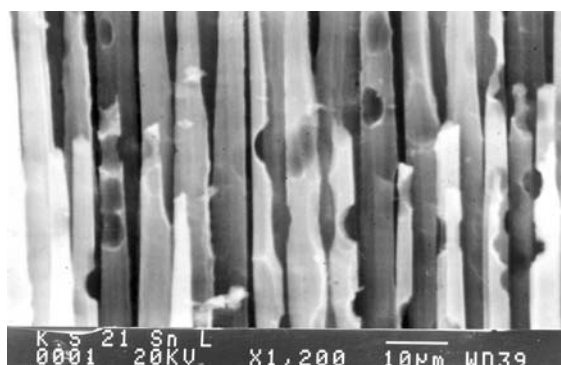
۶- افزودن اکسید زیرکونیوم در لایه آخر کامپوزیت به هدف کمک به فرایند سایش در بالا بردن چگالی و کاهش دما از سطح جلو به سطح پشت انجام شده است.

۵- تشکر

در اینجا بر خود لازم دانسته از کمکهای بی‌دریغ جناب آقای دکتر مهرداد کوکی استاد فرزانه دانشگاه تربیت مدرس سپاسگزاری نماید.

۶- منابع

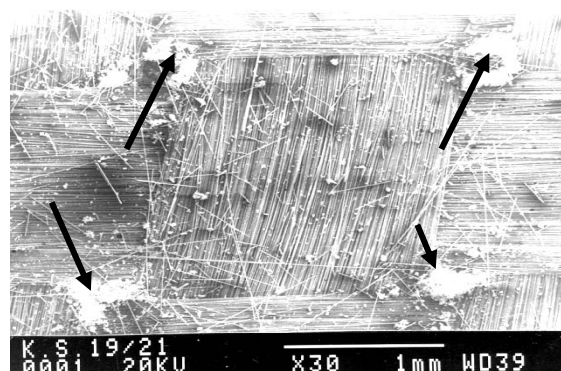
- [1] D'Alelio DF, Parker JA. In: Ablative plastics, New York: Marcel Dekker, (1971), pp. 1-39.



شکل ۸ اثر اکسایش، پوسته‌ای شدن و ایجاد حفره در مقطع ۴ از نمونه‌های CF/R

۳-۷- فرایند سایش در کامپوزیت‌ها

شکل ۹ چگونگی قرار گرفتن اکسید زیرکونیوم را در سطح پشتی کامپوزیت نشان می‌دهد. فرایند ساییده شدن و کاهش حرارت را در کامپوزیت‌های مقاوم به سایش و کاهنده حرارت نشان می‌دهد. افزودن لایه اکسید زیرکونیوم در آخرین لایه از کامپوزیت‌های CF/R، در حقیقت کمک به افزایش چگالی و کاهش دما در لایه آخر و بالا بردن عملکرد کامپوزیت‌های مقاوم به سایش است. اکسید زیرکونیوم به دلیل اینکه چگالی بالا، ضریب هدایت حرارتی پایین و دمای ذوب بالایی دارد، نقش مهمی را در افزایش عملکرد این کامپوزیت ایفا می‌کند.



شکل ۹ پیکان‌ها محل انباشت پودر زیرکونیوم را که از لایه‌های زیری به لایه بعدی نفوذ کرده نشان می‌دهد

- [10] Standard test method for oxyacetylene ablation testing of thermal insulation materials, ASTM E-285-80.
- [11] Standard test methods for apparent porosity, water absorption, apparent specific gravity, and bulk density of burned refractory brick and shapes by boiling water, ASTM C20-87.
- [12] Cho D, Lee JY, Yoon BI. Microscopic observations of the ablation behaviors of carbon fibre/phenolic composites. *Journal of Materials Science Letter* (1993); 12: 1894-6.
- [13] J. K. Park, T. J. Kang. *Carbon* 40 (2002) 2125– 2134.
- [14] D'Alelio DF, Parker JA. In: *Ablative plastics*, New York: Marcel Dekker, (1971), pp. 69–84.
- [2] A. Vaia, P. Cary. Polymer/Layered silicate Nan composites as high performance ablative.
- [3] Materials. *Applied clay science* (1999); PP. 15:67-92.
- [4] Strong AB. *Fundamentals of composites manufacturing materials: methods, and applications*. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, (1989) (Chapter).
- [5] Sutton K. *An experimental study of a Carbon-Phenolic Ablation Material*. NASA Technical.
- [6] Note (1970); NASA TN D-5930.
- [7] D. Cho, B. Il Yoon / *Composites Science and Technology* 61 (2001) PP. 271-280.
- [8] J. K. Park et al. *Carbon* 42 (2004) 795-804.
- [9] ASTM C 177-85 standards test method for steady state heat flux measurements.