Archive of SID

مقاله

بررسی خواص کامپوزیت‌های کربن – کربن و کاربرد آنها در صنایع

ابوالفضل ابراهیمی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان
Abbas_ebr_286@yahoo.com

حسن عبدالله‌پور، استادیار دانشکدهٔ مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان
Abd253@gmail.com

محسن کلاته، کارشناس ساخت و تولید، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
Kalateh.mohsen@yahoo.com

چکیده

امروزه در جریان انقلاب صنعتی نوینی قرار گرفته‌ایم که منشأ آن پیدایش کامپوزیت‌هاست. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن از جمله مهم‌ترین کامپوزیت‌های پیشرفته به لحاظ خواص و تنوع کاربرد می‌باشند. کامپوزیت‌های زمینهٔ کربنی، که با الیاف کربن تقویت شده‌اند، کامپوزیت‌های کربن – کربن نامیده می‌شوند. این دسته از کامپوزیت‌ها دارای دانسیته‌ای در محدودهٔ ۱/۶ تا ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشند که بسیار پایین‌تر از دانسیتهٔ فلزات و سرامیک‌هاست. خواص مهم کامپوزیت‌های کربن – کربن همانا وزن کم، استحکام در دماهای بالا (۳۰۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد)، ضریب انبساط حرارتی پایین، ضریب هدایت حرارتی بالا (بالاتر از مس و نقره)، مقاومت در برابر شوک‌های حرارتی و نهایتاً فرسایش کم در محیط‌هایی با فشار سایشی بالاست. استحکام مکانیکی کامپوزیت‌های کربن – کربن با افزایش دما زیاد می‌شود. از جمله کاربردهای مهم کامپوزیت‌های کربن – کربن در صنایع هوافضا، ساخت دماغه، بال و سیستم ترمز انواع هواپیماهاست. از جمله کاربردهای تجاری آن نیز می‌توان به ساخت کانال‌های گرمایی، ساخت تجهیزات راکتورهای هسته‌ای، اتصالات الکتریکی، آب‌بندهای گرم، سپرهای حرارتی و کاربردهای بیولوژیکی اشاره کرد. در این مقاله قصد داریم تا دربارهٔ این دسته از کامپوزیت‌ها، خواص و کاربردهای آنها در صنایع گوناگون بحث کنیم.

واژه‌های کلیدی: الیاف کربن، کامپوزیت کربن – کربن، هوافضا.

www.SID.ir

Archive of SID

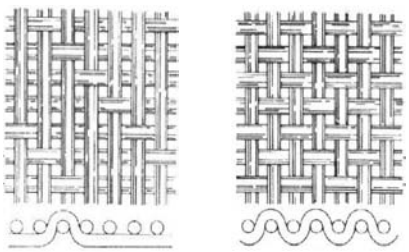
مقدمه

کامپوزیت‌ها را می‌توان تلفیقی از مواد کاملاً متفاوت دانست که در کنار یکدیگر خواصی را پدید می‌آورند که با خواص تک‌تک آنها متفاوت است. در مجموع کامپوزیت‌ها از تلفیق الیاف، ذره‌ها و رشته‌هایی از جنس یک مادهٔ مستحکم و سخت در یک مادهٔ دیگر به‌دست می‌آیند. این الیاف و ذرات اغلب از نافلزاتی همچون کربن، کاربید سیلیسیم، آلومینا و ... هستند [۱]. البته علاوه بر الیاف پیوسته، معمولاً از الیاف گسسته و صفحه‌ای نیز استفاده می‌شود. مواد کامپوزیتی که با الیاف تقویت شده‌اند، شامل الیافی با استحکام بالا هستند که با زمینه احاطه شده‌اند و یا با آن پیوند خورده‌اند و بین آنها فصل مشترک کاملاً مشخصی وجود دارد. در این نوع کامپوزیت‌ها، فیبر و زمینه، تشابهات فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ می‌کنند، اما خواصی را پدید می‌آورند که هیچ‌یک به تنهایی نمی‌توانند آن خواص را داشته باشند [۲].

بیشتر از سه دههٔ پیش، الیاف کربنی برای تقویت کامپوزیت‌ها در محدودهٔ کاربردی وسیعی تولید می‌شدند. بیشترین تولیدات نیز مربوط به فناوری هوافضا بود.

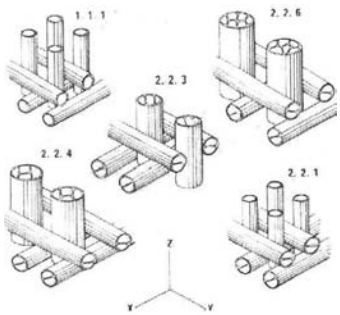
الیاف کربنی دارای ضخامت چند میکرونی، وزن کم، مستحکم و سخت می‌باشند. این الیاف ساختار و خواص خود را تحت شرایط سخت دما و فشار سیال و ... نیز حفظ می‌کنند، بنابراین می‌توان آن را در انواع زمینه‌ها پلیمری، سرامیکی و فلزی برای تولید کامپوزیت‌های گوناگون استفاده کرد [۲]. کامپوزیت‌های زمینه کربنی که با الیاف کربن تقویت شده‌اند، کامپوزیت‌های کربن – کربن[1] نامیده می‌شوند و معمولاً دارای دانسیته‌ای در محدودهٔ ۱/٦ تا ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشند که بسیار پایین‌تر از دانسیتهٔ فلزات و سرامیک‌هاست [۳].

پیشرفتی که اخیراً در تولید کامپوزیت های کربن – کربن به‌وجود آمده است، تولید آنها به‌وسیلهٔ انواع تقویت‌کننده‌های کربنی جدید پیشرفته همچون الیاف، دسته‌ها، نوارها، میله‌ها و بافته‌هاست [٤]. از جمله عواملی که در خواص و ویژگی‌های نهایی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن اثرگذارند، می‌توان به خواص فاز تقویت‌کننده، خواص فاز زمینه و وضعیت چسبندگی فصل مشترک این دو فاز اشاره کرد [۵]. کامپوزیت‌های کربن – کربن از الیاف کربنی بافته‌شده، عمود برهم و چندبعدی (شکل ۱) تشکیل شده‌اند [٦ – ۷].

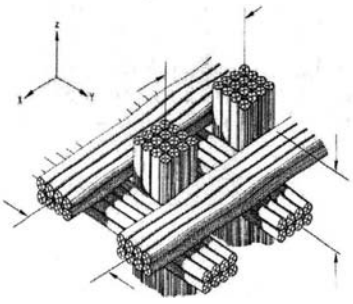


الف) ساختار دوجهته با بافت ساده

ب) ساختار دوجهته با بافت اطلسی



ج) ساختارهای چندجهته



ساختارهای حجمی

شکل ۱. نحوهٔ قرارگیری الیاف کربن [۶ – ۷]

Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir

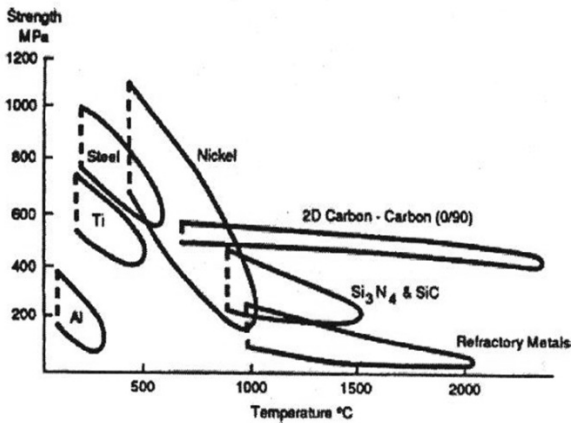
www.SID.ir

Archive of SID

خواص مکانیکی کامپوزیت‌های کربن - کربن

کامپوزیت‌های کربن – کربن موادی با دانسیتهٔ پایین‌اند که در دماهای بالاتر از ۳۰۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد سختی و استحکام بالایی دارند. و به‌دلیل همین مزیت منحصر به‌فرد است که در صنایع هوافضا کابردهای بسیاری دارند. البته باید توجه داشت که خواص مکانیکی کامپوزیت‌های کربن – کربن هنوز به اندازهٔ کافی مشخص نیست [۸]، اما باید توجه داشت که خواص مکانیکی این دسته از کامپوزیت‌ها به عواملی چون طرح قرارگیری الیاف، نوع الیاف کربن، زمینه و نهایتاً فرایند تولید بستگی دارد.

سختی و استحکام بالای الیاف تقویت‌کننده و ترکیب‌شده با زمینهٔ کربنی با دانسیتهٔ پایین خواص مطلوبی را در کامپوزیت‌های کربن- کربن ایجاد کرده است. این کامپوزیت‌ها استحکام و سختی مخصوص قابل مقایسه‌ای با مواد مهندسی پرکاربردی مثل فولاد، تیتانیوم و آلیاژهای تیتانیوم دارند. شکل ۲ کارایی کامپوزیت‌های کربن- کربن را نسبت به دیگر مواد مهندسی نشان می‌دهد [۸].

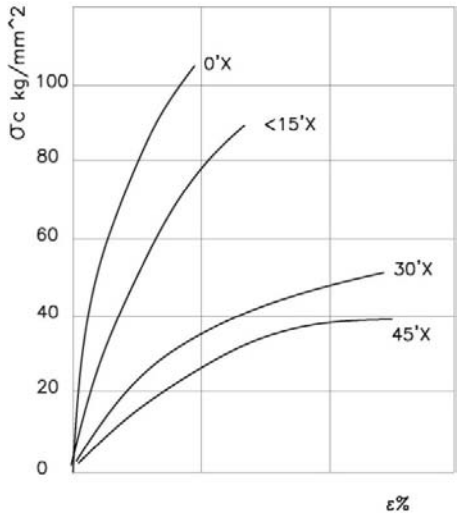


شکل ۲. مقایسهٔ استحکام مواد گوناگون در برابر دما [۸]

شکل ۳ انواع نمودارهای تنش– کرنش را برای ترکیب یک کامپوزیت کربن – کربن با ساختار سه‌جهتهٔ اورتوگونال، برای نمونه‌های مختلف بریده‌شده با رعایت محور x نشان می‌دهد. نمونه‌های بریده‌شدهٔ موازی با تقویت‌کنندهٔ محور x، شکست ترد را نشان می‌دهد. کرنش نهایی در این جهت تقریباً با کرنش نهایی کامپوزیت‌های یک‌جهته منطبق است. برای نمونه‌هایی که با یک زاویه‌ای با محور الیاف بریده می‌شوند، خصوصیات نمودارها تغییر می‌کند. تغییر از زاویهٔ ۱۵ به ۳۰ درجه سبب تغییر رفتار مکانیکی ماده می‌شود [٤]. داده‌ها نشان می‌دهند که سازوکار احتمالی شکست یک کامپوزیت کربن – کربن سه‌بعدی تحت فشار پیچشی اتفاق می‌افتد. در دورهٔ اولیه، زمانی که بار فشاری نسبتاً کم است، باندهای فیبر و زمینه بدون اینکه شکسته شوند، تغییر الاستیک پیدا می‌کنند. بخش خطی منحنی تنش – کرنش با این مرحله منطبق است. وقتی که بار افزایش می‌یابد، زمینه، مخصوصاً قسمتی که شامل تعداد زیادی تخلخل و ترک است، با خسارت تغییرشکل می‌دهد. باندهای فیبر نزدیک منطقه، تغییر فرم می‌یابند و کج می‌شوند. لذا رفتار مواد از الاستیک خطی به الاستوپلاستیک تغییر می‌کند. وقتی تنش‌ها بیشتر افزایش می‌یابد، زمینه له و خرد می‌شود، باندهای طولی، خمیدگی بیشتری پیدا می‌کنند. در صورتی‌که بعضی از تغییرها به‌صورت کج‌شدن و لغزش است و به‌طرف دیگران نزدیک‌تر می‌شود. با افزایش تغییر فرم، مرحله نیمه‌پلاستیک[۲] رخ می‌دهد و زمانی‌که به ماکزیمم بارگذاری رسید، شکست رخ می‌دهد [٤].

Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳. اختلاف منحنی تنش – کرنش کامپوزیت کربن – کربن با ساختار سه‌جهته بریده‌شده تحت زوایای مختلف [۴]

برای کامپوزیت‌های کربن – کربن، پنج باند لغزش مستقل که برای تغییر فرم پلاستیک مواد چندکریستالی نیاز است، وجود ندارد. بنابراین الیاف تقویت‌کنندهٔ چندجهته و چند فصل مشترکه در ساختن کامپوزیت‌های کربن – کربن، لغزش را برای تغییر فرم سخت می‌کنند. تغییر فرم اساساً توسط تغییر در تخلخل و بیرون کشیده‌شدن فیبرها اتفاق می‌افتد. تخلخل‌های درون کامپوزیت‌های کربن – کربن، به‌راحتی تحت تنش کششی بزرگ شده و ترک جدید برای آزادشدن تنش درونی، در طول باند لغزش کامپوزیت کربن – کربن تولید می‌شود [۹]. نسبت به فیبر و زمینه، فصل مشترک دارای پایین‌ترین استحکام است. بنابراین فصل مشترک، تحت تنش نست شکسته و تغییر فرم ماکرو دیده می‌شود. همچنان که الیاف به‌صورت متوالی از زمینه بیرون کشیده می‌شوند. تشکیل و گسترش یک ترک در گرافیت، باعث شکست اولیه می‌شود، اما کامپوزیت کربن – کربن به‌صورت غیریکنواخت و ساختار مرکب مشاهده می‌شود. استحکام فیبر، بسیار بالاتر از زمینه و فصل مشترک است. زمانی که ترک به فصل مشترک فیبر و زمینه برخورد می‌کند، معمولاً در فصل مشترک حرکت می‌کند. فرایند کشش، از تشکیل ترک تا شکست اولیهٔ نمونه، با یک سری از فرایندهای گوناگون، شامل تغییر جهت ترک، گسترش ترک در طول فصل مشترک، جداکردن فیبرها از زمینه و در آخر، بیرون کشیدن فیبرها همراه است (شکل ٤). بنابراین گرافیت‌های مختلف به‌صورت ناگهانی می‌شکنند و همچنان که بارگذاری افزایش می‌یابد، یک سری ترک ایجاد می‌شوند. عموم کامپوزیت‌های کربن – کربن، چقرمگی عالی دارند. به‌طوری‌که حتی اگر یک میخ به داخل آنها فرو رود، ثابت می‌مانند [۹]. از جمله خواص کامپوزیت‌های کربن – کربن مقاومت شیمیایی بالاست. خواص مخصوص ترکیب مانند مقاومت شیمیایی و تخلخل این کامپوزیت‌ها سبب می‌شود که برای اندام‌های مصنوعی و اصلاح و ترمیم عیوب استخوانی به‌کار روند. اما مشکل خاص و ویژهٔ کامپوزیت‌های کربن – کربن این است که در دمای ٤٥٠ درجهٔ سانتی‌گراد اکسید می‌شوند. یک پیشنهاد برای کاهش این مشکل، ایجاد یک اتمسفر راکد، در محیطی که کامپوزیت در آن تولید می‌شود، و یا حفاظت سطح مواد با لایه‌ای سرامیکی پوشیده‌شده از کاربید سیلیکون یا معادل آن می‌باشد [۸].

خواص مورد توجه کامپوزیت‌های کربن – کربن، استحکام و سختی، چقرمگی شکست، خواص سایشی و هدایت حرارتی است. سازوکارهای عامل برای این خواص، مخصوصاً در مواد کامپوزیت چندفازی، متفاوت است. خواص مکانیکی سازنده‌ها و کسر حجمی آنها و چسب و سازوکار توسعهٔ ترک‌ها، کنترل‌کنندهٔ خواص مکانیکی کامپوزیت است. به‌علاوهٔ سازنده‌ها، هم تقویت‌کننده‌ها و هم زمینه، در طول

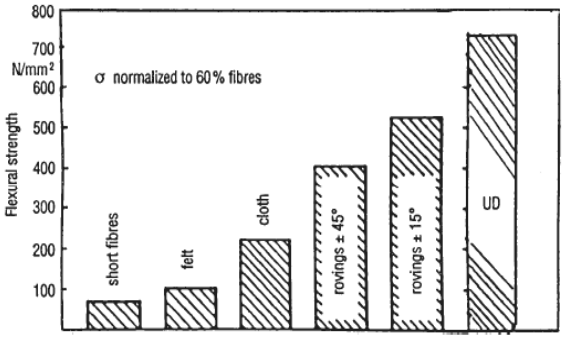
Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

فرایند تولید، مانند نفوذ به‌وسیلهٔ عملیات حرارتی، تغییر ابعادی، تنش‌های حرارتی و ...، دستخوش تغییر می‌شوند. تمام این فاکتورها بر خواص نهایی کامپوزیت اثر می‌گذارد [۸]. دسته‌ای از خواص جالب کامپوزیت‌های کربن – کربن عبارت‌اند از:

الف) خصوصیات مکانیکی

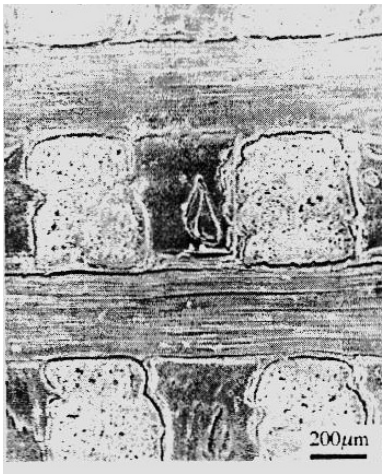
دستهٔ زیادی از خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها به فیبرهای سازنده و جهت انها بستگی دارد (شکل ٤). این کامپوزیت‌ها یک رنج چقرمگی شکست بالا و مقاومت خستگی و خزش خوبی را نشان می‌دهند. در آزمایش‌های دما بالا، کامپوزیت‌های کربن – کربن، ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش در خواص مکانیکی در دمای ۲۰۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد در اتمسفر ساکن از خود نشان می‌دهند. هرچند این خواص در هوا بین ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد، که البته به دما و زمان بستگی دارد [۱۰].



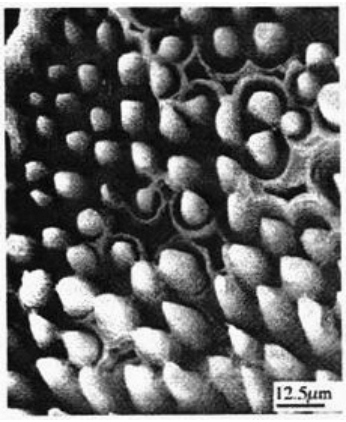
شکل ۴. تأثیر نوع و جهت الیاف بر استحکام کامپوزیت [۱۰]

ب) خواص حرارتی

امروزه کاربرد مواد پایهٔ کربن، در ساخت و تولید مواردی چون درپوش یاتاقان‌ها، برس‌های الکتریکی، انواع لنت ترمز (برای مواردی چون واسائل نقلیهٔ نظامی، هواپیماهای مسافری، کامیون‌ها و ریل راه‌آهن) گسترش یافته است. این خود به‌سبب خواص اصطکاکی – سایشی پایهٔ کربن، به اضافه استحکام بالا و هدایت حرارتی الیاف تقویت‌کننده بوده است[۱۰]. شکل‌های ۵ و ٦ میکروگراف‌های SEM از سطوح ساییده‌شده را نمایش می‌دهند. در این میکروگراف‌ها می‌توان دید که الیاف کربن و زمینهٔ کربن به‌صورت غیریکنواخت ساییده شده‌اند. الیاف کربنی که تا سطح ادامه دارند در ابتدا ساییده می‌شوند و همان‌طور که در شکل ٦ دیده می‌شود، انتهای الیاف به‌صورت مخروطی است. شکاف‌های بین زمینهٔ کربن و فیبرهای کربنی در طول سایش امتداد پیدا می‌کنند [۱۱].



شکل ۵. میکروگراف SEM کامپوزیت با زمینهٔ کربن [۱۱]



شکل ۶. الیاف در جهت Z در سطح ساییده‌شده [۱۱]

Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

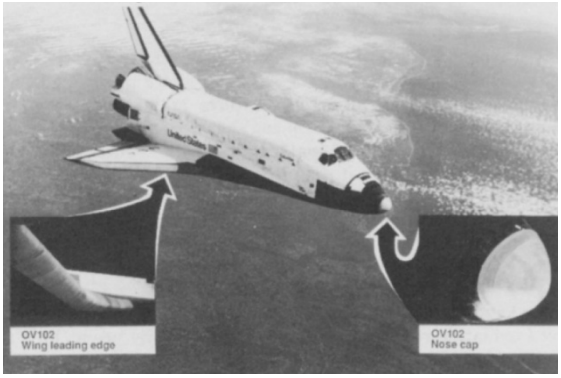
Archive of SID

کاربرد کامپوزیت‌های کربن – کربن

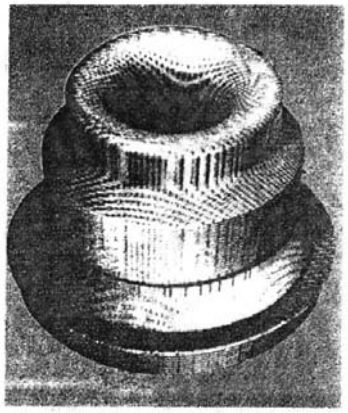
کامپوزیت‌های کربن - کربن، همانند دیگر مواد مهندسی، پتانسیل بالایی دارند. با این‌حال قیمت بالای آنها سبب محدودشدن کاربرد آنها در زمینهٔ هوافضا و دیگر موارد خاص شده است. نبودِ اطلاعات طراحی و روش طراحی مناسب نیز سبب محدودیت کاربرد انواع کامپوزیت‌های کربن – کربن شده است. محدودیت دیگر درخصوص کامپوزیت‌های کربن – کربن مربوط به قابلیت اکسیداسیون آنها در دماهای بالاست. این مشکل شامل کاربردهای کوتاه‌مدت از قبیل حفاظت‌های حرارتی و نازل‌های راکت نمی‌شود. با این‌حال، در کاربردهای بلندمدت، به محیط‌های خنثی یا کم‌حرارت، جهت جلوگیری از اکسیداسیون نیاز است. کاربرد کامپوزیت‌های کربن - کربن در ساخت سپرهای حرارتی با موفقیت انجام شده است [۷].

بیش از ۱۵ سال است که کامپوزیت‌های کربن - کربن با ساختار سه‌جهته برای تولید دماغهٔ مخروط‌ها و محافظ حرارتی راکت‌ها استفاده می‌شوند. به این علت، نیاز اصلی در گسترش آنها، شامل بعضی خواص، مانند مقاومت در برابر حرارت و شوک‌های مکانیکی و سایش شدید است. در سال‌های گذشته، ساختارهای کربن – کربن خودشان را برای راکت‌ها و تولیدات مهندسی فضایی، همچنین قسمت‌های دماغه و موتور راکت‌ها و بست قسمت‌های وابسته به مخزن‌های بزرگ و دودکش راکت‌های شناور، نشان داده‌اند. بعضی از تولیدات کربن – کربن در شکل ۷ نشان داده شده است [٤].

نازل‌ها بخش مهمی از موتور راکت‌ها هستند، که طی ۱۵ سال گذشته تغییرات قابل توجهی در ابعاد، طراحی، شکل و مواد کرده‌اند (شکل ۸) [٤]. گازهای گرم در سراسر نازل حرکت می‌کنند و از آن خارج می‌شوند. موادی که در این کار استفاده می‌شوند، عمر کوتاهی دارند، چون بار دینامیکی و استاتیکی با گرمای شدید ترکیب می‌شوند. نازل‌های خارجی به‌طور نمونه، پوشش داده می‌شوند تا اکسیدشدن و صدمه‌دیدن ترکیب به تأخیر بیفتد. اگر ترکیب خراب شود، مسیر نباید طولانی باشد، تا بتوان کاملاً کنترل شوند.



شکل ۷. قطعات ساخته‌شده از کامپوزیت کربن - کربن سه‌جهته و چهارجهته [۴]



شکل ۸. نازل ساخته‌شده از کامپوزیت کربن - کربن چندجهته [۴]

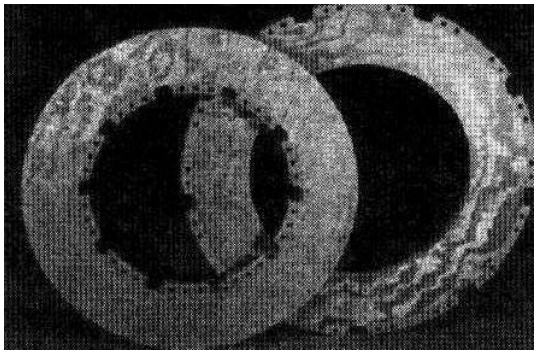
بنابراین کامپوزیت‌های کربن – کربن دهانهٔ خارجی نازل‌ها، باید دارای پایداری و استحکام عالی در برابر شرایط سخت، برای زمان‌های طولانی داشته باشند. هرچند، زمان مؤثر، معمولاً بیشتر از یک دقیقه نیست. اخیراً انگیزه‌هایی برای ساخت موتور

Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

هواپیماها از کامپوزیت‌های کربن - کربن تسریع یافته است. بسیاری از کشورها، راه‌کار استفاده از این مواد برای ساخت هواپیماهای فراصوت با قابلیت پرواز با سرعت بالاتر از ۵ ماخ را کشف کرده‌اند [۱۲]. مزیت سیستم‌های کربن - کربن، طراحی ساده‌تر آن و کاهش وزن و حجم نازل می‌باشد [۷]. کاربردهای تجاری این فناوری، در زمینهٔ سیستم‌های ترمز هواپیماها و ترمز ماشین‌های رالی و ... در دمای بالا، کاربرد در استحکام‌های زیاد می‌باشد. کامپوزیت‌های کربن – کربن نشان داده‌اند که توانایی حفظ استحکام و مقاومت سایشی را دارند. ترمزهای کامپوزیتی کربن - کربن، دماهای مؤثر و بالا و ترمزهای شدید را تحمل می‌کنند. اگر قیمت کامپوزیت‌های کربن – کربن برای ترمز هواپیما بالاست، استحکام بالا، گرمای ویژهٔ بالا و وزن پایین آنها روی کاربردشان مؤثر است [٦]. این موارد در سایر شاخه‌های هوافضا نیز کاربرد دارند. دلیل آن نیز دارابودن مقاومت ضربه‌ای، حرارتی خوب و درجه حرارت بالای تصعیدشان است. ساختار چندسویهٔ این دسته از کامپوزیت‌ها، در اغلب موارد، دارای مزیت‌های فراوانی است. کامپوزیت‌های کربن - کربن برای ساخت سپرهای گرمایی رادیواکتیو، وسائل فضایی از قبیل سفینه‌های فضایی، به‌وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی کاربردهای تجاری این نوع مواد در حال توسعه می‌باشد. این دسته از کامپوزیت‌ها برای استحکام بخشیدن به بخش‌های داخلی استخوان‌های شکسته مورد استفاده قرار داده‌اند. کربن‌ها، تطابق‌پذیر بوده و در نتیجه این مواد نیز از لحاظ ساختاری با استخوان مطابقت دارند. مدول یانگ، بایستی معادل با استخوان باشد و دارای مقاومت بالا باشد. وزن مخصوص کامپوزیت‌های کربن - کربن، به اندازهٔ وزن مخصوص استخوان است [۱۲].

هم اکنون قالب‌های پرسکاری داغ کربن - کربن، در زمرهٔ تولیدات تجاری محسوب می‌شوند. این قالب‌ها، در برابر فشارهای بالا مقاوم بوده و نسبت به گرافیت پلی کریستال ظاهری، بادوام‌ترند. همچنین سیستم‌های ترمز دیسکی (شکل۹) ساخته شده از این مواد، پیشرفت وسیعی داشته است. کاربرد فعلی این کامپوزیت‌ها در هواپیماهای نظامی و پهن بال‌ها می‌باشد. با این‌حال امید است که با گسترش فناوری این گروه مواد در آینده در هواپیماهای معمولی و تجاری نیز کاربرد داشته باشند [٦].



شکل ۹. دیسک‌های ترمز هواپیمای غیرنظامی از جنس کامپوزیت کربن - کربن [۶]

کاربردهای دیگر این مواد در سیستم کانال‌های گرمایی، تجهیزات راکتور هسته‌ای، اتصالات الکتریکی، آب‌بندهای گرم و یاتاقان‌ها می‌باشد. با اصلاح روش‌های تولید و کاربرد وسیع‌تر آنها با قابلیت حجم‌های بالاتر، کامپوزیت‌های کربن – کربن چندسویه، جهت کاربردهای فوق به‌صرفه‌تر و قابل قبول‌ترند. در ضمن دسترسی به الیاف کربنی ارزان بر روی تولیدات بعدی این مواد مؤثر خواهد بود [۷].

Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

مراجع

[۱] فیروزمنش. ر، *مواد کامپوزیت با نگرشی بر روش‌های نوین آنالیز حرارتی*، نگاه دانش، تهران، ۱۳۷۹.

[۲] اسماعیلی. مسعود، انجمن *سازندگان مواد مرکب، دورهٔ آموزشی ساخت کامپوزیت‌ها، فایبرگلاس‌ها، کامپوزیت‌های کربنی*، طراح، تهران، ۱۳۸۱.

[3] Askeland, *the Science and Engineering of Materials*, second edition, Chapman & Hall, London. Glasgow. New York. Tokyo. Melbourne, Madras, 1990.

[4] Trefiilov. V. I, *Ceramic – and Carbon – Matrix composite*, 1st edition Chapman & Hall, London. Glasgow. New York. Tokyo. Melbourne, Madras, 1995.

[5] Donnet, J.B, Bansal, R.C, *Carbon Fibers*, Dekker Publisher, New York, 1984.

[6] Bunker, S.B, "Evaluation of Dynamics Properties of a Carbon – Carbon composites at Elevated temperatures", M.Sc and B.S university of main, 2002.

[7] Kelly. A, Rabotonov. Yu. N, *Handbook of Composites*, 1st edition, Volume 4, North – Holland – Amsterdam, New York, Oxford, 1983.

[8] Ferreira, J.R, "Characteristics of Carbon Composite Turning", Journal of Materials Processing Technology, No.109, 2001.

[9] Zhu. X, "Mechanical Behavior of Carbon / Carbon Composites", North Western Polytechnic University, 2003.

[10] Manocha, L.M, "High Performance Carbon – Carbon Composites", Sadhana-Academy Proceeding in Engineering Science, Vol. 28, No. 1, 2003.

[11] Tianyou. Pu, Weizhoou. P, "Microstructures in 3D Carbon – carbon Composites", Beijing center of Physical & Chemical Analysis, 1997.

[12] Yasua. K, "Application of Three – Dimensionally Reinforced Carbon – Carbon Composites to dovetail Joint Structures", Tokyo University of Science, Composites Science and Technology, No. 62, 2002.

پی‌نوشت

1 .Carbon/Carbon Composite

2 .Pseudo-Plasticity

* * *

www.SID.ir