بررسی ریزساختاری هیدروکسی آپاتیت پوشش داده شده بر سطح کامپوزیت‌های دو بعدی کربنی

اسماعیل صلاحی[۱]، ایمان مباشرپور[۱]، شیرین طباطبایی[۲]، محمد مهدی ستوده‌نیا[۱]

[۱] پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی
[۲] دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد میبد

e-salahi@merc.ac.ir

چکیده: *کامپوزیت‌های کربن- کربن دسته‌ای از مواد کربنی و سنتزی شامل یک زمینه کربنی با الیاف کربن تقویت شده هستند. هیدروکسی آپاتیت یکی از مواد زیست سازگار است که اصلی‌ترین بخش معدنی استخوان را تشکیل می‌دهد و کاربرد گسترده‌ای به‌عنوان ایمپلنت دارد. به‌دلیل استحکام کم و تردی ذاتی، هیدروکسی آپاتیت را برای بهبود خواص مکانیکی، بر روی مواد با استحکام و انعطاف پذیری بالا، مانند فلزات و... پوشش می‌دهند. در این پژوهش، هیدروکسی آپاتیت بر روی کامپوزیت کربن-کربن که خود نیز به‌عنوان یک بیوسرامیک شناخته شده است نشانده شد. این کار توسط روش غوطه‌وری صورت پذیرفت. نمونه‌های گوناگونی با این دوغاب پوشش و با برنامه حرارتی مناسب، خشک و در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد، عملیات حرارتی شد. از روش پراش پرتو ایکس (XRD) برای شناسایی فازی کمک گرفته شد. پس از انجام عملیات حرارتی نیز ضخامت پوشش و ریزساختار آن به‌کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مشاهده شد. نتایج نشان می‌دهد که عمده‌ترین فاز موجود در پوشش اعمال شده، هیدروکسی آپاتیت و در زمینه گرافیت است. با یک بار غوطه‌وری نمونه‌ها در دوغاب بهینه، پس از انجام عملیات حرارتی، پوششی در حدود ۵۰ میکرومتر تشکیل می‌شود.*

کلمات کلیدی: *پوشش دهی، کامپوزیت کربن-کربن، هیدروکسی آپاتیت، غوطه‌وری.*

۱- مقدمه

در عمل تمایل زیادی به استفاده از مواد "زیست فعال" در عرصه جراحی وجود دارد. مواد زیست فعال، موادی هستند که قابلیت تشویق برای تشکیل استخوان و همچنین بافت نرم در فصل مشترک آن‌ها وجود داشته باشد [۱و۲]. عنصر کربن، بهترین ماده از نظر تطابق با بدن در بین کلیه مواد شناخته شده است. این ماده با استخوان‌ها، خون و بافت‌های نرم سازگار است. در نگاه اول به‌نظر می‌رسد که هزینه بالای تهیه کامپوزیت کربن- کربن در مقایسه با رقبای دیگر خود، شامل قطعات فلزی و پلیمری، باعث محدودیت زیاد استفاده از این دسته مواد در کاربردهای بیولوژیک می‌شود. ولی باید توجه کرد که ممکن است یک صفحه فلزی صلب بارها برای ترمیم اندام شکسته استفاده شود. چنین قطعاتی زمانی‌که به‌یک استخوان بلند، مانند استخوان ران محکم چسبانده می‌شوند، به حتم منجر به توزیع تنش خواهد شد. ثابت کشسان استخوان تا حد زیادی کمتر از یک صفحه فولادی با همان سطح مقطع می‌باشد. یک صفحه ساخته شده از فلزات، باعث انتقال حدود ۹۰ ٪ فشار شده و در نتیجه سبب ایجاد پوکی در استخوان زیرین خود خواهد شد. بنابر این لازم است که چنین صفحاتی پیش از جوش خوردن و ترمیم محل شکستگی، هر چه زودتر از بدن خارج شوند. بنابراین بهبود نیافتن کامل عیب، به احتمال قریب به یقین، باعث شکستگی دوباره آن عضو به‌طور خود بخودی در زمان‌های آتی خواهد شد. به همین دلیل، اگر چه فلزات، استحکام و چقرمگی لازم برای استفاده در مراحل ترمیم را دارند، ولی این خواص کافی به‌نظر نمی‌رسد. با توجه به هزینه‌های گزاف عمل‌های جراحی، بیماران ترجیح می‌دهند که از عمل جراحی دوباره پرهیز کنند [۱و۲]. کامپوزیت‌های کربن ـ کربن را می‌توان به گونه‌ای

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.4.3.3]

مهندسی کرد که دارای خواص مکانیکی مشابه با استخوان باشند، در نتیجه نیاز بـه خـارج کـردن آن پـیش از تکمیل مرحله ترمیم نخواهد بود [۱و۲]. از اوایل دهه ۱۹۸۰تهیه کامپوزیت هیدروکسی آپاتیت تقویت شـده بـا فیبرهای کربنی برای بازسازی ساختمان استخوان آغاز شد. در این پژوهش‌هـا، سـازکار واکـنش متقابـل بـین لایه‌ای بین هیدروکسی آپاتیت و فیبرهای کربنی، بـه‌کمـک تکنیـک‌هـایی چـون XPS, TEM, SEM مطالعـه شدند. نتایج نشان می‌دهند که کامپوزیت‌های هیدروکسی آپاتیت تقویت شده با فیبرهای کربن که با یک لایـه β-TCP پوشش داده شده‌اند، خواص بیومکانیکی بهتری را در مقایسه بـا کامپوزیـت‌هـای بـا فیبرهـای بـدون پوشش نشان می‌دهند. می‌توان اشاره کرد که وجود پوشش β-TCP، سـبب پدیـد آمـدن خاصـیت آب دوسـتی (هیدروفیلیک) بر سطح فیبرهای کربن می‌شود که به شدت قدرت پیوند بین لایه‌ای را با چـسبیدن بـه شـبکه HAp تشویق می‌کند. به‌عبارت دیگر پوشش β-TCP به عنوان یک بین لایـه‌ای در میـان HAp و فیبـر کـربن می‌تواند شیب تنش گرمایی را در فاز HAp کاهش دهد، که در این صورت از تـرک خـوردن قطعـه در هنگـام سرمایش از دمای سینتر جلوگیری می‌کند. بنابراین سبب بالا رفتن خواص مکانیکی این دسته از کامپوزیـت‌هـا می‌شود [۳]. کامپوزیت‌های کربن–کربن، مواد زیست سازگاری هستند، امـا فعالیـت بیولـوژیکی ضـعیف آن‌هـا برای کاربردهای پزشکی، نیاز به افزایش دارد. از طـرف دیگـر هیدروکـسی آپاتیـت، توانـایی برقـراری اتـصال مستقیم به بافت استخوان و برقراری پیوند شیمیایی با بافـت طبیعـی اسـتخوان را داراسـت. در توانـایی پیونـد شیمیایی مستقیم با استخوان، یک تفاوت چشمگیر بین هیدروکسی آپاتیـت و سـایر مـواد و آلیاژهـای زیـست سازگار مورد استفاده در جراحی، مانند کامپوزیت‌های کربن–کربن وجود دارد. به‌خاطر خـواص مکـانیکی پـایین بدنه‌های هیدروکسی آپاتیتی خالص، فقط می‌توان آن را ایمپلنت‌های بدون بار استفاده کرد. به نظر می‌رسد که پوشش دهی کامپوزیت‌های کربن–کربن با هیدروکسی آپاتیت، فکر مناسبی برای حـل مـشکل عـدم فعالیـت بیولوژیکی کامپوزیت کربن–کربن و همچنین خواص مکانیکی پایین بدنه‌های سینتر شده هیدروکـسی آپاتیـت باشد [۴و۵]. پوشش هیدروکسی آپاتیت به طور معمولی با روش پلاسما اسـپری تولیـد انجـام شـده، امـا روش پلاسما اسپری مشکلاتی مانند ایجاد پوشش نایکنواخت روی سطوح متخلخل را دارد. همچنین به‌خاطر دمـای بالای مورد استفاده در این تکنیک، پتانـسیل دگرگـون شـدن فازهـای کلـسیم فـسفاتی پوشـش داده شـده و کامپوزیت‌های کربن–کربن (زیر لایه) دیده می‌شود. در نتیجه دیگر روش‌های رسوب نشانی، ماننـد سـل–ژل، کندوپاش لیزری و روش‌های گوناگون الکتروشیمیایی پیشنهاد شده است. در پژوهش‌های امـروزه، روش‌هـای سل–ژل و الکتروفورتیک برای رسوب نشانی هیدروکـسی آپاتیـت بـر روی فلـز و انـواع مـواد کربنـی، ماننـد فایبرهای کربنی، نانوتیوب‌های کربنی، کامپوزیت‌های کربن–کربن و... استفاده شده‌اند [۹–۶].

۲– فعالیت‌های تجربی

در ابتدا نمونه‌های کربن–کربن دو بعدی که از طریق تلقیح با رزیـن آمـاده شـده بودنـد، تهیـه شـد. خـواص مکانیکی این نمونه‌های آماده شده که دارای ابعاد ۳×۵×۲۵ میلی‌متر می‌باشند توسط دستگاه Instron مـدل ۱۱۹۶ بررسی شد. نتایج نشان دهنده این امر بود که استحکام سه نقطه‌ای ایـن نمونـه‌هـا در حـدود ۸۰MPa است. در ادامه، پودر هیدروکـسی آپاتیـت، تحـت عنـوان محـصول Merck BP,E 341 جهـت انجـام فراینـد پوشش‌دهی خریداری شد. برای پوشش‌دهی به روش غوطه‌وری، در ابتدا نیاز به یک دوغاب پایـدار از جـنس هیدروکسی آپاتیت است. بدین منظور، با توجه به فعالیت‌هـای انجـام شـده پیرامـون پایـدار سـازی دوغـاب هیدروکسی آپاتیت، دوغابی با درصد مشخص از ماده جامد و تایرون به عنوان ماده روانساز تهیه شد [۱۰]. در فرایند پوشش‌دهی، ابتدا نمونه‌های کامپوزیت کربن–کربن توسط آب مقطر شسته و سپس به صورت افقی به مدت یک ثانیه در دوغاب قرار گرفته و سپس خارج شده و بـر روی یـک صـفحه کاشـی در آون در دمـای محیط (۲۵°C) خشک شدند. جهت پوشش دهی بر سطح کامپوزیت کربن–کربن، با توجـه بـه فعالیـت‌هـای

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.4.3.3]

انجام شده، از دوغاب دارای ۱۶/۶ درصد وزنی ماده جامد استفاده شد [۱۱]. در ادامه با استفاده از دوغاب بهینه، جهت پوشش‌دهی نمونه‌هایی شامل یک بار فرایند غوطه‌وری تهیه و در دمای محیط خشک و سپس در یک کوره تیوبی با حداکثر دمای کاری ۱۲۰۰°C عملیات حرارتی انجام شد. کوره، مجهز به ریزپردازنده‌ای برای برنامه‌ریزی و اجرای منحنی گرمایش بود. نمونه‌های مورد نظر، در یک قایقک آلومینایی قرار گرفته و مطابق با برنامه آزمایش‌ها در محدوده ۱۰۰ تا ۴۵۰°C با سرعت گرمایش ۲°C/min حرارت داده شدند. مدت زمان قرارگیری در بیشینه دما (۴۵۰°C) ۱ ساعت بوده و عملیات سرمایش نیز در همین کوره صورت گرفته تا قطعات به دمای محیط برسند. برای تعیین فازهای موجود در زیرلایه و مطالعه فازی پوشش، از روش‌های پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. الگوهای پراش پرتو ایکس، با دستگاه پراش پرتو ایکس Siemens تحت ولتاژ ۳۰Kv و جریان ۲۵mA انجام شد. در تمام آزمایش‌ها، از پرتو ایکس αCuK با طول موج ۱/۵۴۰۴A° استفاده شد. زمان اقامت در هر گام یک ثانیه، اندازه گام ۰/۰۲ درجه و محدوده روبش ۶۰-۱۰ درجه انتخاب شد. فازهای موجود با مقایسه زاویه پراش پیک‌های XRD و میزان شدت مربوط با مقادیر ارایه شده در کارت‌های ASTM شناسایی شدند. برای بررسی سطح مقطع، به منظور تعیین ضخامت و مورفولوژی ذرات پوشش ایجاد شده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی Cambridge (SEM) استفاده شد. در مورد میکروسکوپ الکترونی روبشی ولتاژ کاری این دستگاه ۲۵kV می‌باشد. برای نمونه سازی به وسیله دستگاه پراکنش، روی سطح مورد نظر روکش طلا داده می‌شود. با استفاده از تصاویر به‌دست آمده، اندازه متوسط ضخامت پوشش تعیین و تغییرات آن بررسی شد.

۳- نتایج و بحث

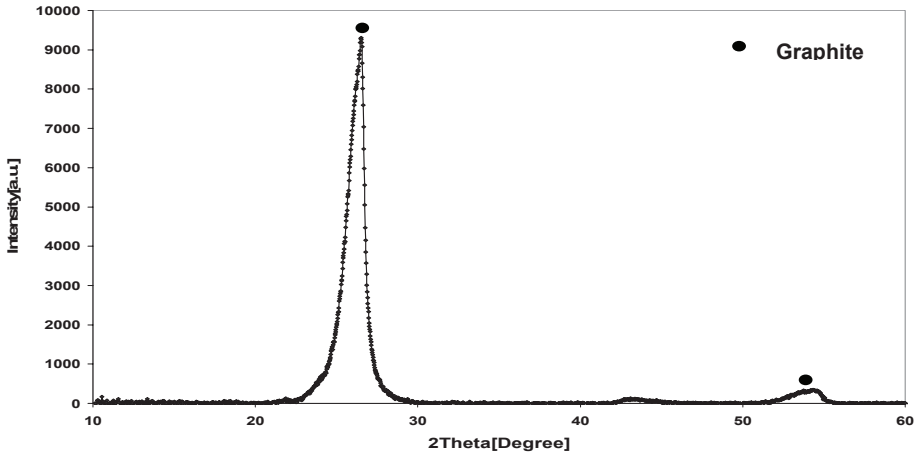
در شکل ۱، الگوی پراش پرتو ایکس نمونه کامپوزیت کربن-کربن دو بعدی بدون انجام عملیات پوشش دهی مشاهده می‌شود. با توجه به این الگو، مشاهده می‌شود که فاز موجود گرافیت است. در حقیقت زیرلایه مورد استفاده، یک کامپوزیت کربن-کربن دو بعدی ساخته شده از الیاف گرافیتی است. در شکل ۲، الگوی پراش پرتو ایکس نمونه کامپوزیت کربن-کربن پوشش یافته با یک بار غوطه‌وری در دوغاب و عملیات حرارتی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. با توجه به این الگو، علاوه بر شناسایی پیک‌های گرافیت که از وجود زیرلایه کامپوزیتی کربن-کربن می‌باشد، پیک‌های فاز کلسیم فسفاتی هیدروکسی آپاتیت نیز مطابق با شماره کارت ASTM09-0432 قابل شناسایی هستند که این موضوع بر تشکیل لایه کلسیم فسفاتی هیدروکسی آپاتیتی بر زیرلایه کامپوزیت کربن-کربن دو بعدی دلالت دارد. همچنین با توجه به شدت پیک‌های الگوی پراش مشاهده می‌شود که در نمونه بدون پوشش، شدت پیک گرافیت بسیار زیاد است ولی در نمونه پوشش یافته با دوغاب هیدروکسی آپاتیت، به‌دلیل وجود لایه پوششی، از شدت پیک زیرلایه یا همان پیک فاز گرافیت کاسته شده و از طرف دیگر پیک‌های فاز هیدروکسی آپاتیت پدیدار گشته است. برای بررسی مورفولوژی لایه تشکیل شده و اندازه‌گیری ضخامت لایه‌های پوشش یافته بر روی کامپوزیت کربن-کربن که با یک بار غوطه‌وری پوشش یافته و پس از خشک شدن در دمای محیط، توسط یک کوره تیوبی تا دمای ۴۵۰°C مورد عملیات حرارتی قرار گرفته از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. تصاویر تهیه شده از سطح مقطع نمونه‌ها بوده که با یک تیغه الماسه برش داده شده‌اند. شکل۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کامپوزیت کربن-کربن پوشش یافته با دوغاب بهینه، با یک‌بار غوطه‌وری، پس از انجام عملیات حرارتی می‌باشد. با توجه به این تصویر، باید توجه کرد که ضخامت لایه تشکیل شده در حدود ۵۰ میکرومتر است.

همچنین مشاهده می‌شود که لایه ایجاد شده، دارای تخلخل‌های زیاد و درشتی بوده و فرایند سینتر کردن، به‌خوبی صورت نگرفته است. این امر از یک رو باعث کاهش استحکام پوشش و مقاومت کم آن شده ولی از

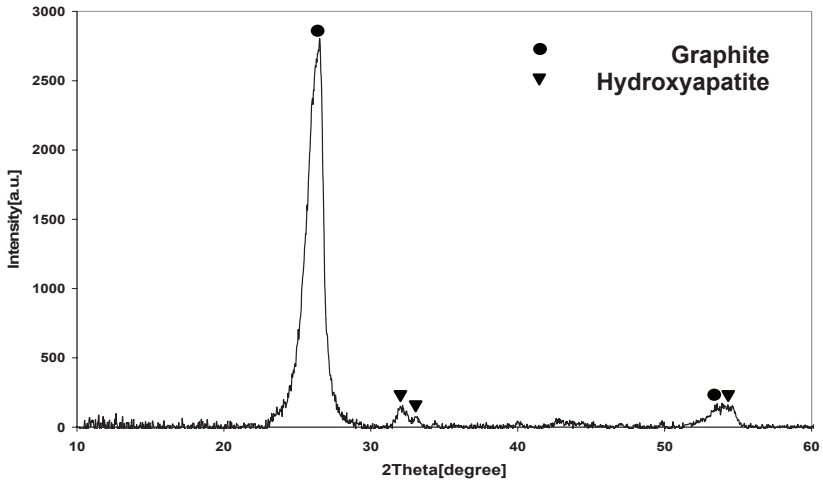
[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.4.3.3]

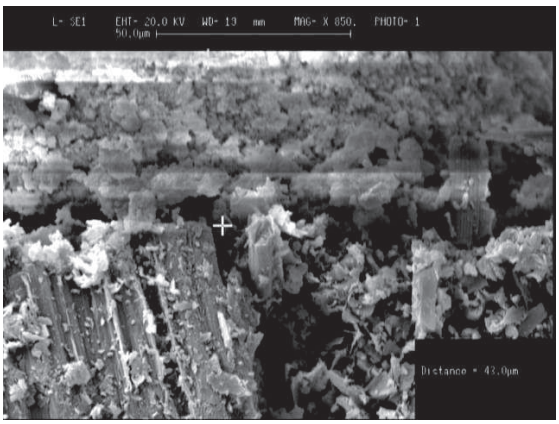
طرف دیگر وجود تخلخل‌هایی در اندازه میکرومتر، باعث تشویق استخوان سازی توسط بافت بدن در کاشتنی‌ها می‌شود. همچنین با توجه به فصل مشترک پوشش و زیرلایه در شکل ۳ می‌توان حدس زد که سازکار اتصال پوشش به زیرلایه از نوع مکانیکی بوده و درگیری سطوح زیرلایه با ذرات پوشش باعث اتصال پوشش می‌شود.



شکل ۱- الگوی پراش پرتو ایکس کامپوزیت کربن-کربن دو بعدی پیش از انجام عملیات پوشش‌دهی



شکل ۲- الگوی پراش پرتو ایکس کامپوزیت کربن-کربن دو بعدی پوشش یافته به‌روش غوطه‌وری (نمونه یک‌بار غوطه‌وری شده در دوغاب ۱۶/۶٪ وزنی، عملیات حرارتی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد)

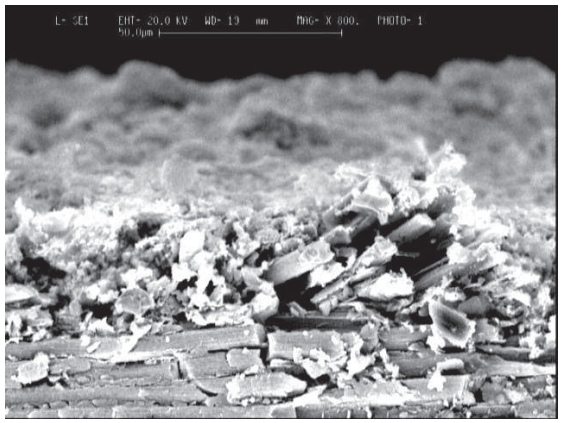


شکل ۳- تصویر میکوسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک پوشش هیدروکسی آپاتیت و کامپوزیت کربن-کربن (نمونه یک‌بار غوطه‌وری شده، پس از انجام عملیات حرارتی در دمای ۴۵۰°C)

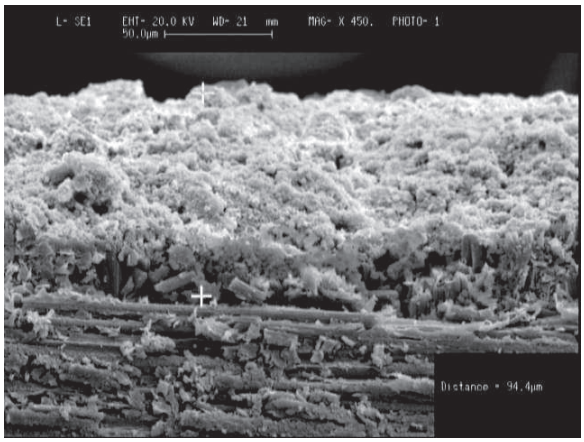
[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.4.3.3]

روشن است که خواص مکانیکی پوشش، وابسته به استحکام سطح مشترک دو فاز است که ارتباط نزدیکی با ویژگی سطحی فیبرهای کربن و هیدروکسی آپاتیت دارد. هیدروکسی آپاتیت آبدوست است، در حالی‌که فیبرهای کربنی آبگریز هستند. پس پیوند نزدیک بین HAp و فیبرهای کربن سخت بوده و دلیل آن تفاوت مهم خواص سطحی آن‌هاست. ضریب انبساط حرارتی فیبرهای کربنی و هیدروکسی آپاتیت به ترتیب ۱×۱۰^{-۶} و $۱۱/۶\times۱۰^{-۶}k^{-۱}$ است. تفاوت عمده ضریب انبساط حرارتی فیبرهای کربنی و هیدروکسی آپاتیت، سبب بروز مشکلاتی در سرمایش پس از سینتر می‌شود، از جمله به‌وجود آمدن ترک در شبکه و حتی خرابی کامل کامپوزیت. همانطور که در شکل‌های ۴ تا ۷ نشان داده شده است، به‌دلیل وجود این اختلاف در ضریب انبساط حرارتی و همچنین تفاوت رفتار سطحی لایه پوششی و زیرلایه، مشکلات عمده‌ای در کیفیت پوشش به‌وجود می‌آید و چسبندگی نامناسب پوشش به زیرلایه، خروج الیاف کربنی از پوشش و تخریب آن پیش خواهد آمد. در شکل ۴ چسبندگی نامناسب پوشش به زیرلایه، به‌دلیل تفاوت در رفتار سطحی آب‌دوست و آبگریز بودن هیدروکسی آپاتیت و فیبرهای کربنی است. در شکل‌های ۵ و ۶ بیرون زدگی و تخریب پوشش به‌دلیل اختلاف ضریب انبساط حرارتی زیاد بین هیدروکسی آپاتیت و فیبرهای کربنی دیده می‌شود. در شکل ۷ نیز دیده می‌شود که الیاف کربنی که در موقعیت عمود بر روی سطح قرار می‌گیرند، نقاطی هستند که مستعد به عدم پذیرش پوشش می‌باشند. این امر را می‌توان به‌دلیل افزایش بیشتر انبساط در جهت طولی، در مقایسه با سطح مقطع فیبرهای کربنی نسبت داد. در حقیقت با افزایش دما، افزایش طول نسبت به افزایش سطح مقطع بیشتر بوده و در نتیجه فیبرها از سطح پوشش داده شده بیرون می‌زنند.



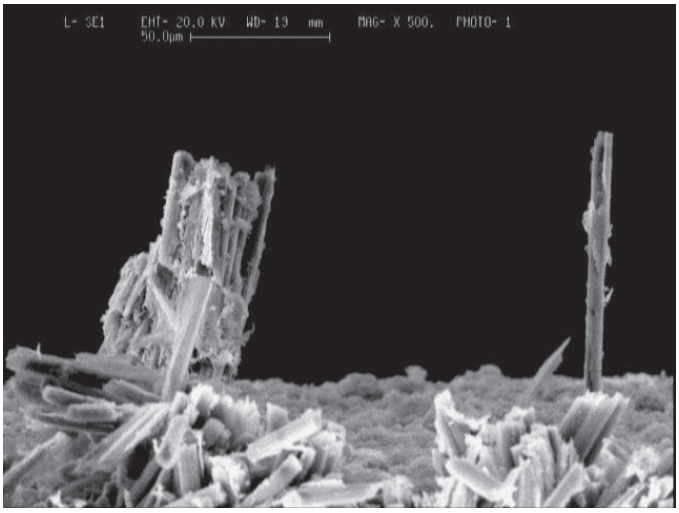
شکل ۴- تصویر میکوسکوپ الکترونی روبشی از چسبندگی نامناسب پوشش هیدروکسی آپاتیت ایجاد شده بر زیرلایه (نمونه یک‌بار غوطه‌وری شده، پس از انجام عملیات حرارتی در دمای ۴۵۰°C)



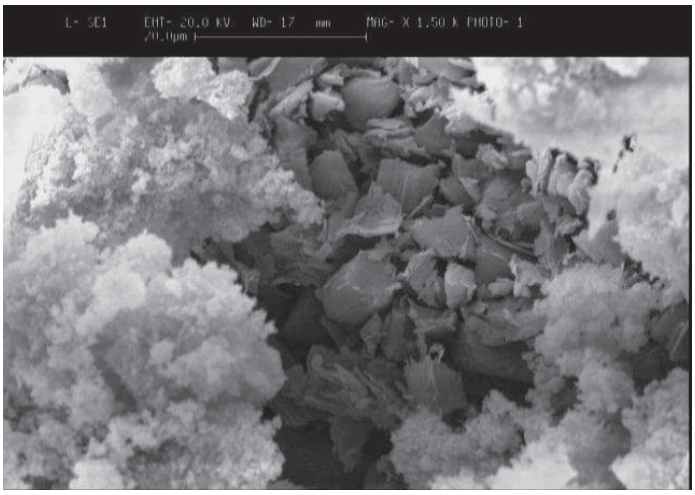
شکل ۵- تصویر میکوسکوپ الکترونی روبشی از بیرون زندگی فیبرهای کربنی در پوشش هیدروکسی آپاتیت ایجاد شده بر زیرلایه (نمونه یک‌بار غوطه‌وری شده، پس از انجام عملیات حرارتی در دمای ۴۵۰°C)

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.4.3.3]



شکل ۶- تصویر میکوسکوپ الکترونی روبشی از بیرون زدگی فیبرهای کربنی در پوشش هیدروکسی آپاتیت ایجاد شده بر زیرلایه (نمونه یک‌بار غوطه‌وری شده، پس از انجام عملیات حرارتی در دمای ۴۵۰°C)



شکل ۷- تصویر میکوسکوپ الکترونی روبشی از بیرون زدگی فیبرهای با جهت عمودی در پوشش هیدروکسی آپاتیت ایجاد شده بر زیرلایه (یک‌بار غوطه وری، پس از انجام عملیات حرارتی در دمای ۴۵۰°C)

برای غلبه بر مشکل استحکام پیوند ضعیف سطح مشترک Hap و فیبرهای کربنی، از اصلاح شیمیایی برای تغییر خواص سطحی فیبرهای کربنی استفاده می‌شود. برای انجام عملیات اصلاح شیمیایی، فیبرها یا کامپوزیت‌های کربن- کربن در محلول‌های اسیدی شامل اسید نیتریک، اسید هیدروکلریک، اسید فسفریک و... یا ترکیبی از این محلول‌های اسیدی قرار می‌گیرند تا سطح آن‌ها سونش (اچ) شده و در نتیجه فعالیت سطحی بیشتر شود. در مقایسه با فیبرهای کربنی که عملیات اصلاح سطحی نشده‌اند، بیشینه طیف فیبرهای عملیات شده به‌سمت پهنه‌های انرژی بالاتری جابه‌جا می‌شوند و ترکیب آن‌ها بر سطح انرژی بالاتری و به‌صورت بهتری توسعه می‌یابد که نشان دهنده آن است که سطح فیبرهای کربنی به شدت aliphatic است و در سطح فیبرها گروه‌های عامل بسیاری مثل فنل‌ها، کربونیل‌ها و کربوکسیل‌ها وجود دارد. وجود گروه‌های عامل بر سطح فیبرهای کربنی، به‌عنوان یک سطح فعال، سبب می‌شوند که به‌راحتی بر سطح کلسیم فسفات‌ها بچسبند که این امر به‌طور شگفت انگیزی استحکام پیوند سطح مشترک را بین HAp و فیبرهای کربنی بهبود می‌دهد[۳]. راه حل دیگری که برای رفع مشکل چسبندگی نامناسب هیدروکسی آپاتیت بر روی فیبرها در هنگام انجام عملیات حرارتی و سرمایش پس از آن می‌توان پیشنهاد کرد، استفاده از یک لایه میانی، بین هیدروکسی آپاتیت و کامپوزیت کربن- کربن است. همانطور که اشاره شد، اختلاف ضریب انبساط

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-06]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.4.3.3]

حرارتی بین هیدروکسی آپاتیت و فیبرهای کربنی، زیاد است. می‌توان با استفاده از ماده‌ای که ضریب انبساط حرارتی آن، بین این دو ماده بوده و خواص زیست سازگاری آن‌ها را نیز حفظ کند، این مشکل را کاهش داده و پوشش مناسب‌تری ایجاد کرد.

٤- نتیجه‌گیری

با استفاده از نتایج آنالیزهای به دست آمده می‌توان گفت که با یک بار غوطه‌وری نمونه‌ها در دوغاب بهینه پس از عملیات حرارتی پوششی در حدود ۵۰ میکرومتر تشکیل می‌گردد. نتایج آنالیز فازی نشان داد که با پوشش‌دهی هیدروکسی آپاتیت بر روی کامپوزیت کربن-کربن و انجام عملیات حرارتی تا دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد، هیچ‌گونه فاز کلسیم فسفاتی دیگری در حد تشخیص دستگاه آنالیز فازی تشکیل نشده است. عمده عیوب موجود در پوشش ایجاد شده در انجام عملیات حرارتی در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد عبارتند از چسبندگی نامناسب لایه به زیرلایه و درگیری مکانیکی قابل قبول بین لایه و زیرلایه و بیرون زدگی فیبرهای کربنی. با توجه به نتایج، این عیوب را می‌توان ناشی از رفتار گوناگون سطحی و اختلاف زیاد ضریب انبساط حرارتی لایه و زیرلایه دانست.

مراجع

1. Hugh O. Pierson, “Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes”. NOYES publication U.S.A (1993).
2. E. Fitzer., “The future of carbon/carbon composite”. Carbon. 25, (2), P.163, (1986).
3. H. Suping, H. Baiyun, Z. Kechao, L. Zhiyoy, “Effects of coatings on the mechanical properties of carbon fiber reinforced HAP composites” materials letters. 58, pp 3582-3585, (2004).
4. A. Stocha, A. Brozeka, S. Błazewicza, W. Jastrzebskia, J. Stochb, A. Adamczyka, I. Roja, “FTIR study of electrochemically deposited hydroxyapatite coatings on carbon materials”, Journal of Molecular Structure 651–653, p.p389–396,(2003).
5. Y. Q. Zhai, K. Z. Li, H. J. Li, C. Wang, H. Liu, “Influence of NaF concentration on fluorine-containing hydroxyapatite coating on carbon/carbon composites”, Materials Chemistry and Physics 106, p.p 22–26,(2007).
6. A. Li, K. Sun, W. Dong ,D. Zhao, “Mechanical properties, microstructure and histocompatibility of MWCNTs/HAp biocomposites”, Materials Letters 61 p.p1839–1844, (2007).
7. T. Fu, J. L Zhao, K. W. Xu, “The designable elastic modulus of 3-D fabric reinforced biocomposites”, Materials Letters 61 p.p330–333, (2007).
8. J. L. Sui, M. S. Li, Y. P. Lua, Y. Q. Bai, “The effect of plasma spraying power on the structure and mechanical properties of hydroxyapatite deposited onto carbon/carbon composites” Surface & Coatings Technology 190 p.p287– 292, (2005).
9. L. Zhao, L. Gao, “Novel in situ synthesis of MWNTs-hydroxyapatite composites”, Carbon 42 p.p423–460, (2004).
10. "ساخت قطعات هیدروکسی آپاتیت به روش ریخته گری دوغابی"، تورج نویزی، پروژه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه مواد و انرژی به راهنمایی دکتر اسماعیل صلاحی، دکتر اصغر کاظم‌زاده و استاد مشاوری مهندس مهران غفاری (۱۳۸۷).
11. "بررسی لایه نشانی هیدروکسی آپاتیت بر روی کامپوزیت کربن-کربن با استفاده از روش غوطه‌وری" اسماعیل صلاحی، ایمان مباشرپور، شیرین طباطبایی، محمد مهدی ستوده نیا، مجموع مقالات هفتمین کنگره سرامیک، شیراز، (۱۳۸۸).

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-06]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.4.3.3]