

از دریچه‌های قلب تا آسمان‌ها: مروری بر ساختارها، روش‌های ساخت، و کاربردهای متنوع کربن گرماکافتی

مجتبی هادی^{۱*}، علی احسانی^۲ و رضا علیزاده^۱

۱- استادیار شیمی تجزیه، گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه قم، قم، ایران

۲- استادیار شیمی فیزیک، گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه قم، قم، ایران

دریافت: شهریور ۱۳۹۵، بازنگری: آبان ۱۳۹۵، پذیرش: آذر ۱۳۹۵

چکیده: کربن گرماکافتی به‌طور معمول با روش رسوب‌دهی شیمیایی در فاز بخار و به دنبال گرماکافت برخی گازهای هیدروکربنی سبک در دماهای بالا در گستره‌ی از حدود ۹۰۰ تا ۲۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس به‌صورت یک پوشش کربنی روی سطح بستر، لایه نشانی می‌شود. این ماده کربنی از جهت ساختاری شامل تعداد زیادی نانوبلورهای گرافیتی یا صفحات گرافیتی با ابعاد چند نانومتر است. به دلیل ویژگی‌های زیست‌سازگاری، فیزیکی، مکانیکی، مقاومت سایشی و مقاومت اکسایشی بالا در زمینه‌های متفاوتی از جمله برخی کاشتنی‌های پزشکی (دریچه‌های مصنوعی قلب و مفاصل مصنوعی انگشتان دست)، صنایع هسته‌ای (پوشش ذرات سوخت هسته‌ای در واکنشگاه‌های دما بالای خنک شونده با گاز)، حسگرهای الکتروشیمیایی ولتامتری، دیسک ترمز هواپیما، مواد با مقاومت اکسایشی بالا (پوشش لوله‌های گرافیتی در طیف‌سنجی جذب اتمی کوره گرافیتی) و صنایع هوا-فضا (افشانک موتور و سپر محافظتی نوک برخی موشک‌ها) کاربرد داشته است. در این پژوهش به‌طور خلاصه با معرفی ساختارها و روش‌های ساخت، مروری بر کاربردهای متنوع آن نیز ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کربن گرماکافتی، رسوب‌دهی شیمیایی در فاز بخار، کاشتنی‌های پزشکی، صنایع هوا-فضا، حسگرهای الکتروشیمیایی

مقدمه

فیلم نازکی از کربن گرماکافتی پوشش دهی می‌شود [۱ و ۲]. به‌طور معمول از گازهای هیدروکربنی مانند متان، اتان، پروپان، بوتان، بخارات بنزن [۳] و در برخی موارد مخلوطی از این گازها [۴ و ۵] استفاده می‌شود. گاز هیدروکربنی بیشتر با یک گاز رقیق‌کننده مثل نیتروژن، هلیوم، یا آرگون [۶] مخلوط شده و وارد فضای واکنشگاه می‌شود. شکل ۱، یک تصویر ساده‌ی فرضی را از تجهیزات لایه نشانی کربن گرماکافتی نمایش می‌دهد.

معرفی کربن گرماکافتی^۱ و روش ساخت

کربن گرماکافتی یک نوع پوشش کربنی^۲ است که به‌طور معمول به‌صورت یک فیلم نازک روی سطح بستر^۳، لایه نشانی می‌شود. لایه نشانی کربن گرماکافتی با روش رسوب‌دهی شیمیایی در فاز بخار^۴ انجام می‌شود به این ترتیب که به دنبال گرماکافت یک گاز هیدروکربنی در دمای بالا، روی یک سطح بستر مناسب با

1. Pyrolytic Carbon

2. Carbon coating

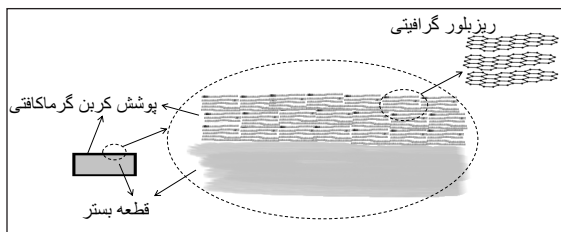
3. Substrate

4. Chemical vapor deposition

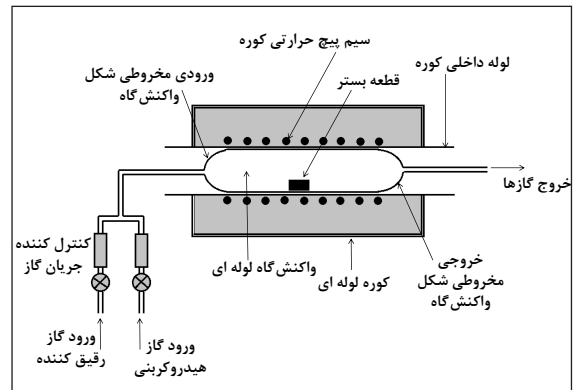
شد قطعه یا قطعات بستر با فیلمی از کربن گرماکافتی پوشش دهی می‌شوند. در بسیاری موارد بستر از جنس گرافیت یا مواد سرامیکی است. اگر هدف از اجرای فرایند، ساخت یک کامپوزیت باشد در این صورت قطعه یا قطعات بستر به صورت متخلخل بوده و لایه نشانی کربن گرماکافتی در فضاهای خلل و فرج‌های قطعه متخلخل انجام می‌شود و در نهایت یک کامپوزیت با فاز کربن گرماکافتی به دست می‌آید [۳]. بستر متخلخل ممکن است از جنس الیاف کربنی یا سرامیکی باشد که به ترتیب یک کامپوزیت الیاف کربن/کربن گرماکافتی یا الیاف سرامیک/کربن گرماکافتی به دست می‌آید. به دلیل اهمیت و کاربردهای مهم این کامپوزیت‌ها، تاکنون مطالعات بسیاری روی سینتیک، ترمودینامیک، و چگونگی تأثیر متغیرهای فرایندی بر ساختار و ویژگی‌های کامپوزیت صورت گرفته است [۱۸ تا ۲۳].

ساختار کربن گرماکافتی

کربن گرماکافتی به طور عمده شامل کربن با هیبریداسیون sp^2 است [۲۴] و در دسته‌ی ساختارهای گرافیتی جای می‌گیرد به طوری که از جهت ساختاری همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده، شامل توده‌ای از تعداد زیادی ریزبلورهای^۲ گرافیتی است [۱ و ۲۵]. هر ریزبلور گرافیتی نیز از قرارگیری موازی تعدادی صفحات گرافیتی شش‌وجهی^۳ شکل می‌گیرد (شکل ۲). تاکنون با روش‌های متفاوت طیف‌سنجی [۲۴ تا ۳۱] و میکروسکوپی [۲ تا ۳۷] ساختار کربن گرماکافتی مطالعه شده و اندازه صفحات گرافیتی یا ریزبلورهای گرافیتی در کربن گرماکافتی به طور متوسط در حدود ۱ تا ۳ نانومتر اندازه‌گیری شده است.



شکل ۲ تصویر فرضی از یک قطعه پوشش دهی شده با فیلم کربن گرماکافتی و نمایی از توده ریزبلورهای گرافیتی تشکیل‌دهنده ساختار کربن گرماکافتی



شکل ۱ تجهیزات لایه نشانی کربن گرماکافتی

همان طور که از شکل ۱ مشخص است برای اجرای فرایند، به یک کوره‌ی لوله‌ای^۱ نیاز است. این کوره دمای لازم را برای گرماکافت گاز هیدروکربنی فراهم می‌سازد. واکنشگاه نیز به طور معمول به صورت یک لوله با دو انتهای مخروطی شکل و از جنس مواد سرامیکی یا کوارتز ساخته شده و به طور هم‌محور در مرکز کوره‌ی لوله‌ای قرار داده می‌شود [۷ تا ۱۰]. گازهای فرایندی (گاز هیدروکربنی و گاز رقیق‌کننده) با نسبتی مشخص و با جریان کنترل شده و نیز تحت فشار مشخصی وارد فضای واکنشگاه می‌شوند. قطعه یا قطعات بستر همان طور که از شکل ۱ مشخص است به منظور پوشش دهی آن‌ها با کربن گرماکافتی در قسمت مرکزی واکنشگاه قرار داده می‌شوند. گاز هیدروکربنی حین عبور از واکنشگاه لوله‌ای و در اثر دمای بالای کوره پیوندهای آن شکسته شده و یک سلسله واکنش‌های بسیار پیچیده در فاز گازی آغاز می‌شود. تاکنون مطالعات بسیاری روی سینتیک و ترمودینامیک این واکنش‌ها انجام شده است [۱۰ تا ۱۷]. در اثر این واکنش‌ها اتم‌های کربن به دست آمده از گرماکافت گاز هیدروکربنی به تدریج بر سطح بستر می‌نشینند و یک فیلم نازک کربنی (کربن گرماکافتی) روی سطح بستر شکل می‌گیرد.

کامپوزیت‌های کربن گرماکافتی

در فرایند لایه نشانی کربن گرماکافتی مطابق با آنچه که ذکر

1. Tube furnace

2. Graphitic Microcrystals

3. Hexagonal graphitic sheets

متغیرهای تأثیرگذار بر فرایند لایه نشانی

صفحات گرافیتی کربن گرماکافتی که تنها در حدود چند نانومتر است سبب می‌شود که کربن گرماکافتی از جهت میکروساختار سطحی^۲، دارای مناطق فعال الکتروشیمیایی^۴ با چگالی سطحی بالا و قابلیت بالایی برای مبادله‌ی الکترون با مواد الکتروفعال در محیط‌های آبی باشد [۲۸، ۳۰ و ۴۶]. تاکنون از الکترودهای فیلم کربن گرماکافتی در ساخت حسگرهای الکتروشیمیایی و به‌منظور اندازه‌گیری تجزیه‌ای برخی مواد مهم از جمله اسکوربیک اسید [۴۵]، دوپامین، اوریک اسید [۵۱]، یون‌های سرب [۴۹]، هیدرازین [۳۱]، گایافنزین [۴۸] و استامینوفن [۵۳]، و برخی اسیدهای آمینه از جمله سیستئین، هموسیستئین، و ان-استیل سیستئین [۵۲] استفاده شده است.

ساختار کربن گرماکافتی به‌طور تنگاتنگ و البته بسیار پیچیده‌ای تحت تأثیر متغیرهای فرایندی قرار دارد. از متغیرهای مهم تأثیرگذار می‌توان به دمای فرایند لایه‌نشانی (از حدود ۹۰۰ تا ۲۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس) اشاره کرد. نوع گاز هیدروکربنی، نسبت گاز هیدروکربنی به گاز رقیق‌کننده، فشار گازها، جریان گازها، زمان ماند گازها، و مدت‌زمان اجرای فرایند نیز همگی از دیگر متغیرهای تأثیرگذار بر ساختار کربن گرماکافتی هستند [۶ و ۳۸]. تاکنون مطالعات بسیاری روی چگونگی تأثیر این متغیرها بر ساختار کربن گرماکافتی صورت گرفته و سازوکارهایی نیز پیشنهاد شده است [۳۹ تا ۴۳].

پوشش دهی ذرات سوخت هسته‌ای

از جمله کاربردهای مهم کربن گرماکافتی در پوشش دهی ذرات سوخت هسته‌ای در واکنشگاه‌های نسل چهارم از نوع واکنشگاه‌های دمای بالا و خنک شونده با گاز است^۵ [۲۸]. ذرات کروی سوخت هسته‌ای در این واکنشگاه‌ها با ۴ لایه‌ی متفاوت پوشانده می‌شوند (شکل ۳-د). لایه‌ی اول یک ساختار ویژه از کربن گرماکافتی با خلل و فرج بسیار و نظم ساختاری پایین است. لایه‌ی دوم و چهارم نیز کربن گرماکافتی با نظم ساختاری بالا هستند و لایه‌ی سوم به‌طور معمول از جنس سیلیسیم کاربید یا زیرکونیم کاربید است. در مجموع این چهار لایه نقش محافظتی ذره‌ی سوخت هسته‌ای و در نقش یک نوع تعدیل‌کننده^۶ در واکنشگاه هسته‌ای عمل می‌کنند [۵۶ و ۵۷].

کاربردهای کربن گرماکافتی

کاشتنی‌های پزشکی^۱

از جمله ویژگی‌های کربن گرماکافتی، ویژگی زیست‌سازگاری^۲ بالای آن است. این ویژگی به همراه ویژگی‌های مکانیکی مطلوب و مقاومت سایشی بالای آن سبب شده است که در ساخت برخی کاشتنی‌های پزشکی به‌طور موفقیت‌آمیزی به کار رود [۱ و ۲۴]. تاکنون از پوشش کربن گرماکافتی در ساخت کاشتنی‌های دریچه‌ی مصنوعی قلب (شکل ۳-الف) و نیز مفاصل مصنوعی انگشتان دست (شکل ۳-ب) استفاده شده است.

دیسک ترمز هواپیما

به دلیل ویژگی‌های مکانیکی بسیار مطلوب و بالای کامپوزیت‌های الیاف کربنی/کربن گرماکافتی، از این کامپوزیت‌ها در ساخت دیسک ترمز هواپیما استفاده می‌شود (شکل ۳-ج) [۲۸ و ۴۴].

حسگرهای الکتروشیمیایی

مواد با مقاومت اکسایشی بالا و صنایع هوا-فضا

در روش تجزیه‌ای طیف‌سنجی اتمی^۷ با اتمی‌کننده^۸ کوره گرافیتی، سطح لوله‌های گرافیتی اتمی‌کننده با فیلم نازکی از کربن گرماکافتی پوشانده می‌شود (شکل ۳-ه). گرافیت معمولی به دلیل وجود خلل و فرج‌های بالا، مقاومت اکسایشی پایینی دارد و پس از چند بار استفاده به‌سرعت اکسید و تخریب می‌شود.

به دلیل ویژگی‌های ساختاری کربن گرماکافتی، تاکنون مطالعات بسیاری به‌منظور کاربرد این پوشش کربنی در ساخت حسگرهای حساس الکتروشیمیایی انجام شده است [۲۹ تا ۵۵]. اندازه کوچک

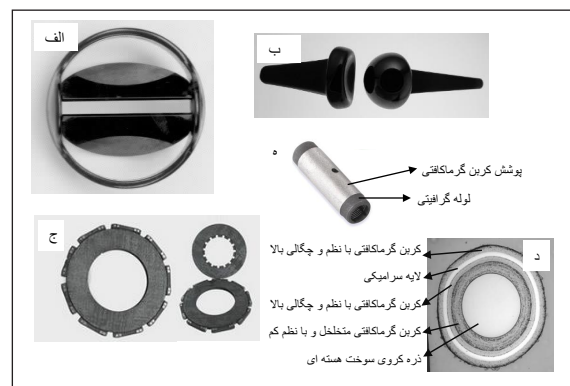
1. Medical implants 2. Biocompatibility 3. Surface microstructure 4. Electrochemically active sites
5. High-temperature gas-cooled nuclear reactors 6. Moderator 7. Atomic spectroscopy 8. Atomizer 9. Graphite furnace

به دلیل ویژگی‌های مکانیکی بالا، مقاومت سایشی بالا و نیز مقاومت اکسایشی بالای کامپوزیت‌های فیبر کربنی-کربن گرماکافتی، از این کامپوزیت‌ها در ساخت برخی قطعات موشک که در معرض سایش و اکسایش هستند مانند قسمت افشانک و نوک موشک استفاده می‌شود. همچنین از کربن گرماکافتی به‌دست آمده از دماهای بالا در ساخت برخی قطعات موشک که در معرض سایش و اکسایش شدید هستند مثل گلوگاه افشانک^۲ موشک استفاده می‌شود [۶۳ و ۶۴].

نتیجه‌گیری

کربن گرماکافتی یک ساختار کربنی از نوع گرافیت با اندازه ریزبلورهای به‌طورمعمول در حدود ۱ تا ۳ نانومتر است. این ساختار کربنی به‌طورمعمول با روش رسوب‌دهی شیمیایی در فاز بخار به‌صورت فیلمی نازک روی سطح یک بستر مناسب لایه نشانی می‌شود. در برخی موارد با کنترل دقیق شرایط فرایند رسوب‌دهی، لایه نشانی بر سطوح درونی با خلل و فرج‌های یک بستر متخلخل انجام می‌پذیرد که در نهایت کامپوزیتی از کربن گرماکافتی و آن بستر متخلخل به دست می‌آید. به دلیل ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی، و زیست‌سازگاری بالای این نوع کربن، در زمینه‌های متنوعی کاربرد داشته است و به همین دلیل پژوهش‌های بسیاری روی ویژگی‌ها، ساختار و فرایند ساخت این نوع کربن انجام شده است. در این پژوهش، با معرفی کوتاهی از کربن گرماکافتی و روش‌های معمول ساخت این نوع کربن، ساختار و روش‌های مطالعه ساختار کربن گرماکافتی، و نیز متغیرهای تأثیرگذار بر فرایند لایه نشانی به‌طور مختصر مرور شد. همچنین به کاربردهای گسترده کربن گرماکافتی در زمینه‌های کاشتنی‌های پزشکی، دیسک ترمز هواپیما، حسگرهای الکتروشیمیایی، پوشش دهی ذرات سوخت هسته‌ای، و کاربردهای کربن گرماکافتی در صنایع هوا-فضا اشاره شد.

همچنین، وجود خلل و فرج‌های سطحی بسیار سبب بروز اثر حافظه^۱ در روش تجزیه‌ای یاد شده خواهد شد. به همین منظور سطح گرافیت با پوشش نازکی از کربن گرماکافتی لایه نشانی شده در دماهای بالا پوشانده می‌شود [۵۸ تا ۶۲]. این پوشش به‌طور قابل‌توجهی سبب افزایش عمر و افزایش مقاومت اکسایشی لوله گرافیتی اتمی کننده می‌شود. کربن گرماکافتی به‌دست آمده از لایه نشانی در دماهای بالا، از جهت ساختاری شامل صفحات گرافیتی با نظم ساختاری بالایی است [۳۸] که سبب می‌شود این نوع کربن گرماکافتی که به گرافیت گرماکافتی^۲ نیز معروف است چگالی بالا و خلل و فرج‌های بسیار کمی داشته باشد. این ویژگی‌ها سبب می‌شود که این نوع ساختار کربنی مقاومت اکسایشی بالایی را در دماهای بالا و اتمسفر اکسند از خود نشان دهد.



شکل ۳ (الف) دریچه قلب مصنوعی با حلقه فلزی از جنس آلیاژهای تیتانیوم و دریچه‌های از جنس گرافیت پوشش داده شده با فیلم کربن گرماکافتی. (ب) یک نمونه مفصل دو تکه‌ی گوی و کاسه‌ای شکل مصنوعی انگشتان دست از جنس گرافیت با پوشش کربن گرماکافتی. (ج) دیسک ترمز هواپیما از جنس کامپوزیت کربن/کربن. (د) تصویر میکروسکوپی از یک ذره کروی سوخت هسته‌ای (اورانیوم اکسید) که با چهار لایه متفاوت پوشش داده شده است. (ه) لوله گرافیتی پوشش داده شده با کربن گرماکافتی به‌منظور کاربرد در روش طیف‌سنجی اتمی با اتمی کننده کوره گرافیتی.

مراجع

[1] Bokros, J.C.; "Deposition, structure, and properties of pyrolytic carbon" in "Chemistry

and PHysics of Carbon", Walker, P.L.; (Ed.) Marcel Dekker, New York; 1-118, 1969.

1. Memory effect

2. Graphitic Microcrystals

3. Nozzle throat

- [2] Oberlin, A.; Carbon 40, 7–24, 2002.
- [3] Delhaes, P.; Carbon 40, 641–657, 2002.
- [4] Taylor, C.A.; Wayne, M.F.; Chiu W.K.S.; Surf. Coat. Technol. 182, 131–13, 2004.
- [5] Vignoles, G.L.; Langlais, F.; Descamps, C.; Mouchon, A.; Poche, H.L.; Reuge, N.; Bertrand, N.; Surf. Coat. Technol. 241, 188–189, 2004.
- [6] Hüttinger, K.J.; “Fundamentals of chemical vapor deposition in hot wall reactors” in “World of carbon, Volume 2, Fibers and Composites”, Delhaès P.; (Ed.) Taylor and Francis, London and New York; 75–86, 2003.
- [7] Je, J.H.; Lee, J.Y.; J. Mater. Sci. 20, 839–844, 1985.
- [8] Je, J.H.; Lee, J.Y.; Carbon 22, 563–570, 1984.
- [9] Je, J.H.; Lee, J.Y.; J. Mater. Sci. 20, 643–647, 1985.
- [10] Becker, A.; Hüttinger, K.J.; Carbon 36, 177–199, 1998.
- [11] Benzinger, W.; Becker, A.; Hüttinger, K.J.; Carbon 34, 957–966, 1996.
- [12] Becker, A.; Hüttinger, K.J.; Carbon 36, 201–211, 1998.
- [13] Becker, A.; Hüttinger, K.J.; Carbon 36, 213–224, 1998.
- [14] Becker, A.; Hüttinger, K.J.; Carbon 36, 225–232, 1998.
- [15] Brüggert, M.; Hu, Z.; Hüttinger, K.J.; Carbon 37, 2021–2030, 1999.
- [16] Antes, J.; Hu, Z.; Zhang, W.; Hüttinger, K.J.; Carbon 37, 2031–2039, 1999.
- [17] Hu, Z.; Hüttinger, K.J.; Carbon 39, 433–441, 2001.
- [18] Benzinger, W.; Hüttinger, K.J.; Carbon 37, 941–946, 1999.
- [19] Benzinger, W.; Hüttinger, K.J.; Carbon 37, 931–940, 1999.
- [20] Benzinger, W.; Hüttinger, K.J.; Carbon 37, 1311–1322, 1999.
- [21] Zhang, Y.-f.; Luo, R.-y.; New Carbon Mater. 27, 42–48, 2012.
- [22] Zhang, M.; Su, Z.; Xie, Z.; Chen, J.; Huang, Q.; Procedia Engin. 27, 847–854, 2012.
- [23] Hao, M.-y.; Luo, R.-y.; Xiang, Q.; Hou, Z.-h.; Yang, W.; Shang, H.-d.; New Carbon Mater. 29, 444–453, 2014.
- [24] Vallerot, J.-M.; Bourrat, X.; Mouchon, A.; Chollon, G.; Carbon 44, 1833–1844, 2006.
- [25] More, R.B.; Haubold, A.D.; Bokros, J.C.; “Pyrolytic carbon for long-term medical implants” in “Biomaterials science: an introduction to materials in medicine”, Ratner, B.D.; Hoffmann, A.S.; Schoen, F.J.; (Eds) Elsevier, London; 170–181, 2004.
- [26] Lopez-Honorato, E.; Meadows, P.J.; Shatwell, R.A.; Xiao, P.; Carbon 48, 881–890, 2010.
- [27] Bourrat, X.; Filliona, A.; Naslain, R.; Chollon, G.; Brendle, M.; Carbon 40, 2931–2945, 2002.
- [28] Bourrat, X.; Langlais, F.; Chollon, G.; Vignoles, L.G.; J. Braz. Chem. Soc. 17, 1090–1095, 2006.
- [29] Hadi M.; Rouhollahi, A.; Yousefi, M.; J. Electroanal. Chem. 681, 114–120, 2012.
- [30] Hadi M.; Rouhollahi, A.; Yousefi, M.; Taidy, F.; Malekfa, R.; Electroanalysis 18, 787–792, 2006.
- [31] Hadi M.; Rouhollahi, A.; Yousefi, M.; Sens. Actuat. B 160, 121–128, 2011.
- [32] Vallerot, J.-M.; Bourrat, X.; Carbon 44, 1565–1571, 2006.
- [33] Reznik, B.; Gerthsen, D.; Zhang, W.; Hüttinger, K.J.; Carbon 41, 369–384, 2003.
- [34] Pfrang, A.; Reznik, B.; Gerthsen, D.; Schim-

- mel, Th.; Carbon 41, 179–198, 2003.
- [35] Reznik, B.; Fotouhi, M.; Gerthsen, D.; Carbon 42, 1311–1313, 2004.
- [36] Reznik, B.; Norinaga, K.; Gerthsen, D.; Deutschmann, O.; Carbon 44, 1298–1352, 2006.
- [37] Reznik, B.; Hüttinger, K.J.; Carbon 40, 617–636, 2002.
- [38] Bourrat, X.; “Structure of pyrocarbons” “World of carbon, Volume 2, Fibers and Composites”, Delhaès P.; (Ed.) Taylor and Francis, London and New York; 159–187, 2003.
- [39] Dong, G.L.; Hüttinger, K.J.; Carbon 40, 2515–2528, 2002.
- [40] De Pauw, V.; Collin, A.; Send, W.; Hawecker, J.; Gerthsen, D.; Pfrang, A.; Schimmel, Th.; Carbon 44, 3091–3101, 2006.
- [41] De Pauw, V.; Kalhofer, S.; Gerthsen, D.; Carbon 42, 279–286, 2004.
- [42] Hu, Z.J.; Zhang, W.G.; Hüttinger, K.J.; Reznik, B.; Gerthsen, D.; Carbon 41, 749–758, 2003.
- [43] Bourrat, X.; Lavenac, J.; Langlais, F.; Naslain, R.; Carbon 39, 2369–2386, 2001.
- [44] Chen, J.; Xiong, X.; Carbon Sci. 8, 25–29, 2007.
- [45] Hadi, M.; Rouhollahi, A.; Yousefi, M.; Electroanalysis 23, 2011, 1497–1505.
- [46] Hadi, M.; Rouhollahi, A.; J. Electroanal. Chem. 727, 13–20, 2014.
- [47] Hadi, M.; Rouhollahi, A.; Yousefi, M.; Carbon–Sci. Technol. 2, 93–97, 2009.
- [48] Hadi, M.; Anal. Methods 7, 8778–8785, 2015.
- [49] Hadi, M.; Rouhollahi, A.; Yousefi, M.; J. App. Electrochem. 42, 179–187, 2012.
- [50] Hadi, M.; Rouhollahi, A.; Taidy, F.; Yousefi, M.; Electroanalysis 19, 668–673, 2007.
- [51] Hadi, M.; Rouhollahi, A.; Anal. Chim. Acta 721, 55–60, 2012.
- [52] Hadi, M.; Rouhollahi, A.; Electrochim. Acta 58, 647–653, 2011.
- [53] Keeley, G.P.; McEvoy, N.; Nolan, H.; Kumar, S.; Rezvani, E.; Holzinger, M.; Cosnier, S.; Duesberg, G.S.; Anal. Methods 4, 2048–2053, 2012.
- [54] Nolan, H.; McEvoy, N.; Keeley, G.P.; Callaghan, S.D.; McGuinness, C.; Duesberg, G.S.; Phys. Chem. Chem. Phys. 15, 18688–18693, 2013.
- [55] Keeley, G.P.; McEvoy, N.; Kumar, S.; Peltekis, N.; Mausser, M.; Duesberg, G.S.; Electrochem. Commun. 12, 1034–1036, 2010.
- [56] High Temperature Gas Cooled Reactor Fuels and Materials, IAEA, VIENNA, 2010
- [57] Abitzer, C.; et al.; “CVD Coating in Fluidized-Bed Furnace: Pyrolytic Carbon and SiC Deposition”, Eurocourse on coated particle fuel, Petten, NL; 2007.
- [58] Sturgeon, R.E.; Chakrabarti, C.L.; Anal. Chem. 49, 90–97, 1977.
- [59] Norval, E.; An Hadi, M.; Rouhollahi, A.; al. Chim. Acta, 181, 169–178, 1986.
- [60] Clyburn, S.A.; Kantor, T.; Veillon, C.; Anal. Chem. 46, 2213–2215, 1974.
- [61] Thompson, K.C.; Godden, R.G.; Thomerson, D.R.; Anal. Chim. Acta 74, 289–297, 1975.
- [62] Manning, D.C.; Ediger, R.D.; At. Absorpt. Newsl. 15, 42–44, 1976.
- [63] Buckley, J.D.; Ceramic Bulletin 67, 364–368, 1988.
- [64] Pierson, H.O.; “Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes: properties, processing, and applications”, Noyes Publications, New Jersey; 1993.

From heart valves to skies: A review on structures, fabrication methods, and diverse applications of pyrolytic carbon

M. Hadi^{1,*}, A. Ehsani² and R. Alizadeh¹

1. Assistant Prof. of Analytical Chemistry, Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Qom, Qom, Iran
2. Assistant Professor of Physical Chemistry, Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Qom, Qom, Iran

Received: September 2016, Revised: November 2016, Accepted: December 2016

Abstract: Pyrolytic carbon usually is deposited on a substrate surface as a carbon coating following pyrolysis of some light hydrocarbon gases at high temperatures from about 900 to 2200 °C by the chemical vapor deposition method. This carbon material structurally consists of a large number of graphitic nanocrystals or graphitic sheets of only a few nanometers in size. Due to high biocompatibility, physical, mechanical, wear resistance, and oxidation resistance properties, it has been used in various fields such as some medical implants (prosthetic heart valves and finger joint implants), nuclear industry (coating of nuclear fuels in high temperature gas-cooled reactors), voltammetric electrochemical sensors, aircraft brake disks, high temperature refractory materials (coating of graphite tubes in graphite furnace atomic absorption spectroscopy), and aerospace industries (nozzle of rocket motors or nose shields of some missiles). In this paper, along with a brief introduction of its structure and fabrication methods, a review of its diverse applications is also presented.

Keywords: Pyrolytic carbon, Chemical vapor deposition, Medical implants, Aerospace Industries, Electrochemical sensors