



بررسی و تحلیل اثرات پارامترهای تخلیه قوس الکتریکی بر هدایت الکتریکی مواد سنتز شده کربنی

امیر شاطری

کارشناسی مهندسی برق، موسسه آموزش عالی آپادانا، شیراز

Amir.sh197799@gmail.com

ارسال: مهر ماه ۱۴۰۲ پذیرش: خرداد ماه ۱۴۰۳

چکیده

در این تحقیق و مقاله مواد کربنی با تخلیه قوس با پارامترهای مختلف تخلیه سنتز شدند مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. این مواد از گلبول‌های دوده با ساختار کربن نامنظم تشکیل شده‌اند، همچنین قطعات گرافن نیز در مواد وجود دارد. با این وجود، هدایت الکتریکی مواد کربنی سنتز شده اساساً با تأثیر مقاومت تماس ظاهر شده به دلیل کربن آمورف که قطعات گرافن را می‌پوشاند تعیین می‌شود. رسانایی الکتریکی بسته به شرایط سنتز دارای مقادیری در محدوده 10^{-3} تا $5,3$ زیمنس بر متر است. برای مواد سنتز شده حاوی صفحات گرافن با اندازه‌های بزرگتر از بیشتر گلبول‌های دوده، هدایت الکتریکی با نسبت محتوای صفحات گرافن و گلبول‌های دوده تعیین می‌شود. این ماده دارای رسانایی الکتریکی 33 زیمنس بر متر است.

واژگان کلیدی: نانو کربن؛ رسانایی الکتریکی؛ تخلیه قوس؛ هدایت الکتریکی.

۱- مقدمه

سنتز تخلیه قوس نانو مواد پس از کار سنتز [۱] و نانولوله‌های کربنی کشف شده [۲] مورد توجه زیادی قرار گرفته است. این روش سنتز نانو مواد امکان تولید نانو ذرات فلزی، اکسیدی و کاربیدی با اندازه‌های چند نانومتری را فراهم می‌کند [۳-۵]. با این وجود، به دلیل واکنش پذیری بالا، تماس بین نانو ذرات به یک نانو ذره با اندازه بزرگتر تبدیل می‌شود که باعث کاهش سطح خاص و کاهش واکنش پذیری چنین موادی می‌شود. مشکل انعقاد و رشد اندازه نانو ذرات حل شده است سنتز ماتریس کربن که نانو ذرات را در بر می‌گیرد و از تماس آنها جلوگیری می‌کند. اسکات و مادژتیک اولین کسانی هستند که نانو ذرات بسته بندی شده در ماتریس کربن را سنتز کردند [۶]. اکنون چنین سنتزی شامل استفاده از الکترودهای کربن فلزی مرکب است که کندوپاش کردن آنها منجر به تشکیل نانو ذرات فلزی بسته بندی شده در ماتریس کربن می‌شود. نانو مواد سنتز شده با روش قوس الکتریکی در زمینه‌هایی مانند الکتروکاتالیز [۷] از جمله سلول‌های سوختی، تشکیل مواد الکتروکرومیک [۸] و غیره کاربرد دارند [۹-۱۰]. در این تحقیق و مقاله روش دیگری برای بهبود خواص رسانایی ارائه می‌شود که با سنتز ماتریس کربن با رسانایی الکتریکی کافی همراه است. هدف این کار تعیین اثرات پارامترهای خارجی سنتز تخلیه قوس الکتریکی بر هدایت الکتریکی مواد کربن سنتز شده است. هدایت الکتریکی ماده کربنی به محتوای کربن هیبرید شده sp^2/sp^3 ، اندازه ذرات و فاصله جداسازی [۱۱-۱۳]، مقدار ناخالصی روی سطوح ذرات [۱۴] بستگی دارد. هدایت الکتریکی با فشرده سازی افزایش می‌یابد [۱۵-۱۴]. و بازپخت [۱۶].

۲- پیشینه تحقیق و پژوهش

۲-۱- پیشینه و درباره قوس الکتریکی

قوس الکتریکی حالتی از تخلیه الکتریکی در هوا یا دیگر محیط‌هایی است که معمولاً نارسانا هستند. زمانی که جریان الکتریکی توسط هوای بین دو رسانا که مستقیماً با هم در تماس نیستند منتقل شود، قوس الکتریکی ایجاد می‌شود. این قوس به ولتاژ، هدایت الکتریکی محیط و فاصله بین دو رسانا بستگی دارد. قوس الکتریکی یا تخلیه قوس، شکست الکتریکی گازی است که تخلیه الکتریکی طولانی مدت ایجاد می‌کند. جریان از طریق یک محیط که در حالت عادی غیر رساناست، مانند هوا، یک پلاسما تولید می‌کند. پلاسما ممکن است نور مرئی تولید کند. تخلیه قوس با ولتاژ کمتری نسبت به تخلیه درخشان مشخص می‌شود و به انتشار ترمونی الکترونی از الکترودهای پشتیبانی کننده قوس متکی است. اصطلاح قدیمی همان‌طور که در عبارت «لامپ قوس ولتایی» به کار رفته‌است، قوس ولتایی است. در اواخر دهه ۱۸۰۰، لامپ قوس الکتریکی برای روشنایی عمومی بسیار مورد استفاده قرار می‌گرفت. برخی از قوس‌های الکتریکی فشار ضعیف در بسیاری از کاربردها مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان مثال، لوله‌های فلورسنت، جیوه، سدیم و لامپ‌های متال هالید برای روشنایی استفاده می‌شود. لامپ‌های قوس زنون برای پروژکتورهای فیلم استفاده شده‌است. در اواخر قرن نوزدهم، روشنایی قوس الکتریکی برای روشنایی عمومی استفاده گسترده‌ای داشت. تمایل به سوسو زدن و خش خش قوس‌های الکتریکی یک مشکل اساسی بود. در سال ۱۸۹۵، هرتا مارکس آیرتون یک سری مقالات را برای برق نوشت و توضیح داد که این پدیده‌ها نتیجه تماس اکسیژن با میله‌های کربن مورد استفاده برای ایجاد قوس است. جریان الکتریکی از جاری شدن الکترون‌ها در یک مسیر رسانا به وجود می‌آید. هرگاه در چنین مسیری یک شکاف هوا (گاز) ایجاد شود جریان الکترونی و در نتیجه جریان الکتریکی قطع خواهد شد. چنانچه شکاف هوا به اندازه کافی باریک و اختلاف پتانسیل و شدت جریان زیاد باشد، گاز میان شکاف یونیزه شده و قوس الکتریکی برقرار می‌شود. در قوس الکتریکی الکترون‌ها در اثر حرارت سفید رنگ می‌شوند. ستونی از گاز ملتهب رسانای الکتریکی بین الکترون‌ها وجود دارد. چون الکترون مثبت دمایش از الکترون منفی بیشتر است زود تر از بین می‌رود. در نتیجه تصعید شدید کربن صورت گرفته و در آن الکترون (الکترون مثبت) فرورفتگی به وجود می‌آید که به دهانه مثبت معروف است و داغ‌ترین نقطه الکترون‌هاست. دمای دهانه در هوا و در فشار جو به ۴۰۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. در لامپ‌های قوسی سازوکارهای منظم و خود کار خاصی برای نزدیک کردن تکه‌های کربن با سرعت یکنواخت وقتی با سوختن از بین می‌روند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای اینکه سایش و خوردگی الکترون مثبت به خاطر دمای بالای بیشتر است، برای همین همیشه الکترون کربن مثبت کلفت تر از الکترون منفی انتخاب می‌شود [۲۳]. قوسی که بین الکترون‌های کربن در گاز فشرده قرار می‌گیرد (حدود ۲۰ اتمسفر) امکان افزایش دمای مرکز الکترون مثبت تا ۵۹۰۰ درجه سانتیگراد یعنی دما روی سطح خورشید را ممکن ساخته‌است. مشخص شده‌است که کربن در این حالت ذوب می‌شود. در ستونی از گاز و بخاری که از آن تخلیه الکتریکی عبور می‌کند، دمای باز هم بالاتری را می‌توان به دست آورد. بمباران شدید این گاز و بخار با الکترون‌ها و یون‌هایی که با میدان الکتریکی قوس شتاب گرفته‌اند دمای ستون گاز را ۶۰۰۰ تا ۷۰۰۰ درجه سانتیگراد می‌رساند. به این دلیل تقریباً تمام مواد شناخته شده در ستون قوس الکتریکی ذوب و تبخیر می‌شوند؛ و بسیاری از واکنش‌های شیمیایی که در دماهای پایین انجام شدنی نیستند، با قوس الکتریکی امکان‌پذیر می‌شوند؛ مثلاً میله‌های چینی دیر گداز در شعله قوس به سهولت ذوب می‌شود. برای ایجاد تخلیه قوس الکتریکی به ولتاژ زیادی نیاز داریم. با ولتاژ حداقل ۳۰۰ ولت بین الکترون‌ها می‌توان قوس را به وجود آورد. از طرف دیگر جریان داخل قوس زیاد است؛ مثلاً حتی در قوس کوچک جریان به ۵ آمپر می‌رسد، در حالیکه در قوس‌های بزرگ که در مقیاس صنعتی به کار می‌روند جریان به صدها آمپر بالغ می‌شود.

۲-۲- پیشینه و درباره هدایت الکتریکی

هدایت الکتریکی بر مبنای جریان الکترون‌ها بنا شده‌است. از میان عنصرهای جدول تناوبی، فلزات که در میان آنها فلزات قلیایی و قلیایی خاکی نیز وجود دارند، به دلیل گذردهی خوب الکترون‌ها از میان خود، به عنوان هادی خوب الکتریسیته شناخته می‌شوند. در

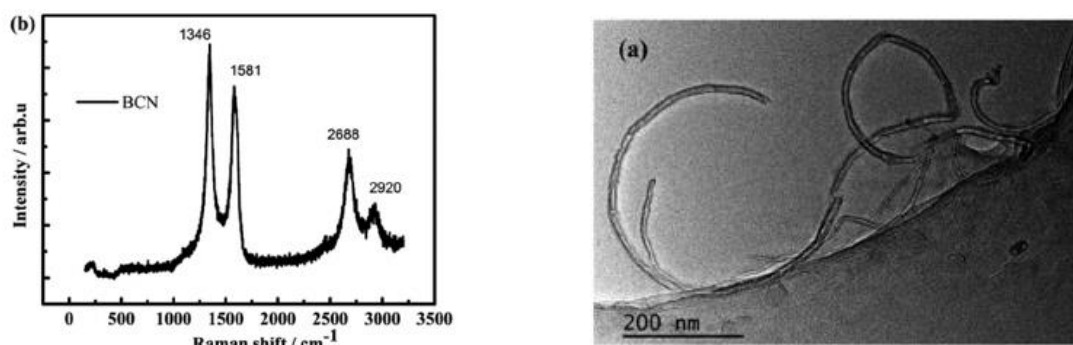
مقابل، آب مقطر به دلیل قدرت کم در عبور دادن الکترون‌ها، هادی ضعیف‌الکتریسته به حساب می‌آید. موادی که به شدت یونیزه شده باشند، الکترولیت‌هایی قوی هستند. اسیدهای قوی و نمک‌ها نوعی از الکترولیت قوی محسوب می‌شوند چراکه به طور کامل در محلول یونیزه و سبب حمل بار الکتریکی در محلول و در نتیجه ایجاد جریان الکتریکی می‌شوند. موادی که به طور کامل یونیزه نشوند، در دسته‌بندی الکترولیت‌های ضعیف جای می‌گیرند. اسید و بازهای ضعیف جزو این گروه هستند زیرا در محلول‌ها به طور کامل یونیزه نمی‌شوند. هدایت الکتریکی یک الکترولیت معیاری برای قابلیت‌گذردهی الکتریسته و واحد آن در دستگاه بین‌المللی یکاها، (زیمنس بر متر) است. اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در صنعت و محیط زیست به عنوان یک روش ارزان و قابل اعتماد برای بررسی میزان یون موجود در یک محلول، به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور مثال، اندازه‌گیری هدایت الکتریکی و کنترل آن، از روش‌های معمول در تصفیه آب برای مصارف خانگی و صنعتی است. در بسیاری از موارد، هدایت الکتریکی به طور مستقیم با کل مواد جامد محلول مرتبط می‌شود. هدایت الکتریکی آب دیونیزه (یون‌زدوده) با کیفیت، معمولاً در حدود ۵٫۵ میکرو زیمنس بر متر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. این مقدار برای آب آشامیدنی بین ۵ تا ۵۰ میکرو زیمنس بر متر و برای آب دریا حدود ۵۰۰۰۰۰ میکرو زیمنس بر متر تخمین زده می‌شود. هدایت الکتریکی در گذشته از طریق اتصال الکترولیت به یک مدار پل وتسون اندازه‌گیری می‌شد. محلول‌های رقیق از قانون «کولراش» در رابطه با هدایت الکتریکی تبعیت می‌کنند.

۳- روش‌های تجربی تحقیق

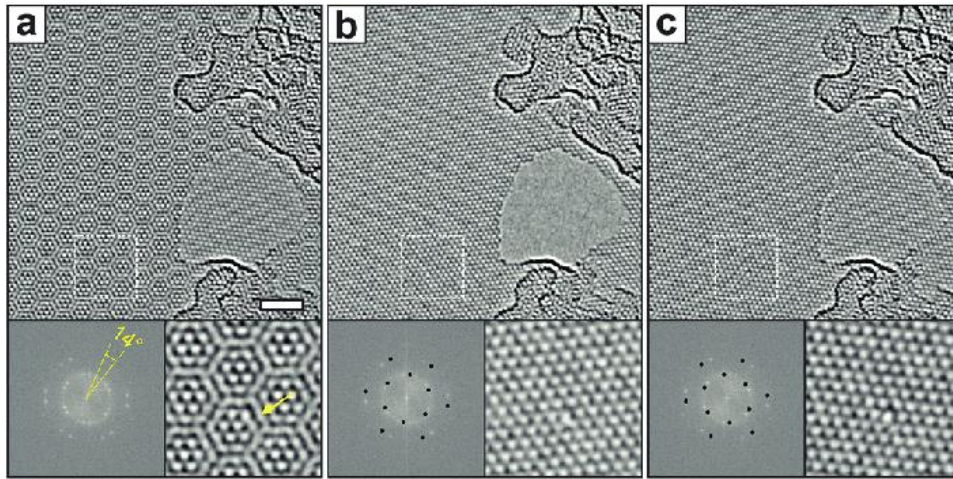
شرح تنظیمات آزمایشی در [۴] به تفصیل آمده است. راه‌اندازی به منبع تغذیه DC متصل شد. میله گرافیتی استوانه‌ای جامد با قطر ۶ میلی‌متر به عنوان آنود اسپری شده استفاده شد. کاتد متحرک اسپری نشده گلوله استوانه‌ای گرافیتی به قطر ۲۰ میلی‌متر بود. هلیوم به عنوان گاز بافر استفاده شد. دو سری آزمایش انجام شد. در سری اول آزمایش‌ها با مقادیر جریان یکسان ۱۲۰ آمپر و در فشارهای مختلف گاز بافر از ۳ تا ۲۰۰ تور (۱ اتمسفر استاندارد برابر است با ۷۶۰ تور) انجام شد. مواد با برچسب C50، C25، C12، C6، C3، C200 و C100 سنتز شدند (تعداد مربوط به مقدار فشار در تور است). در سری دوم آزمایش‌ها فشارهای یکسان گاز بافر روی ۱۲ تور و مقدار فعلی تخلیه قوس در محدوده ۶۰ تا ۱۵۰ آمپر تنظیم شد. سنتز شدند (عدد بین "C" و "A" مطابق با مقدار جریان در آمپر است).

۴- نتایج و بحث

ساختار و فرآیندهای تشکیل مواد کربن تخلیه قوس در منطقه سنتز فولرن مورد مطالعه قرار گرفت [۱۷-۱۸]. در این تحقیق و مقاله، ماده کربن سنتز شده شامل میعانات کربن نامنظم با پیوندهای تصادفی σ - π [۱۹] است که دارای اشکال گلوله‌های دوده با اندازه متوسط در محدوده تا ۲۰۰ نانومتر بسته به شرایط سنتز است (شکل ۱ (a)).

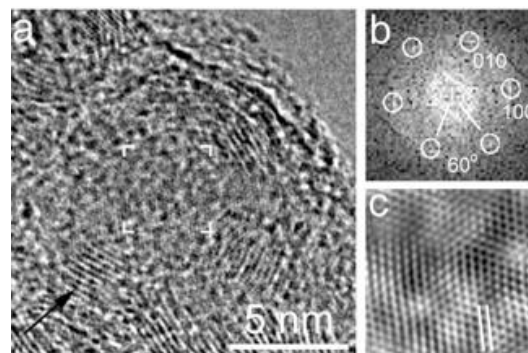


شکل ۱- تصویر TEM مشخصه (a) و طیف رامان مشخصه (b) از مواد کربن سنتز شده. نتایج به دست آمده برای C100



شکل ۲- تصاویر HRTEM از ساختارهای کربنی با قطعات گرافن انباشته، پیچ خورده و پیچ خورده. نتایج به دست آمده برای C3

با این حال، تجزیه و تحلیل طیف سنجی رامان وجود پیک‌های D و G را در نواحی ۱۳۵۲ سانتی‌متر متقابل و ۱۵۹۵ سانتی‌متر متقابل به ترتیب نشان داد، که با ساختار گرافیت کربن هیبرید شده sp^2 مرتبط هستند (شکل ۱ (b)). همچنین پیک D در ۱۵۰۹ سانتی‌متر متقابل در طیف مشاهده می‌شود که با اختلال در مواد کربنی همراه است [۲۰]. به طور تجربی مشخص شده است که سنتز چند توری در فشار گاز بافر بی اثر منجر به تشکیل گلبول‌های دوده با اندازه متوسط حدود ۱۰ نانومتر می‌شود. استفاده از فشارهای بالاتر گاز بافر، اندازه گویچه‌های دوده را افزایش می‌دهد که با افزایش فشار، به طور یکنواخت تا ۴۰ نانومتر افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، استفاده از مقادیر مختلف جریان دشارژ تأثیر معنی‌داری بر اندازه متوسط گلبول‌ها ندارد. مطالعه دقیق تر ساختار گلبول‌های دوده کربنی توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری با وضوح بالا (HRTEM) نشان داده است که همزمان با کربن آمورف، نواحی دارای ساختارهای گرافیت مانند گرافن به شکل لایه‌های منحنی، بسته، پیچ خورده و انباشته هستند. به وضوح قابل مشاهده است (شکل ۲، شکل ۳ (b)). با استفاده از نتایج طیف سنجی رامان، اندازه‌های نانوذرات گرافن La با مقادیر نسبت شدت پیک D به G برآورد شد [۲۱، ۲۲]. اندازه La بسته به شرایط سنتز متفاوت است و در محدوده ۰٫۵ تا ۲ نانومتر است. هنگامی که ماده کربن سنتز شده به صورت مکانیکی فشرده شد، مقاومت الکتریکی طبق نظریه نفوذ کاهش می‌یابد، و به طور مجانبی به مقدار خاصی نزدیک می‌شود (شکل ۳ (c))، که برای هر ماده آزمایشی تعیین شد. با فشرده سازی، چگالی به مقادیر ۰٫۴ تا ۱٫۷ گرم بر سانتی متر مکعب برای مواد مختلف سنتز شده رسید. مقدار رسانایی الکتریکی در محاسبه چگالی ۲ گرم بر سانتی متر مکعب، وابستگی‌های پیچیده‌ای را به فشار گاز بافر و جریان تخلیه نشان می‌دهد (شکل ۳ (a)).



شکل ۳- وابستگی رسانایی الکتریکی به فشار گاز بافر و جریان تخلیه (a)، تصویر HRTEM از گرافیت نانوذرات در (b) C3، تصویر HRTEM از نانوذرات گرافیتی جاسازی شده در پوسته آمورف در (c) C60A

همچنین رسانایی الکتریکی مستقل از اندازه ساختارهای گرافیت در محدوده اندازه‌ای است که برای مواد سنتز شده تعیین شده است، به دلیل مقدار زیاد مقاومت تماسی که به دلیل وجود مقدار زیادی کربن نامرتب آمورف ظاهر می‌شود (شکل ۳ (b)). مقاومت تماس با مقدار کربن آمورف تعیین می‌شود. تأثیر آن برای مواد به دست آمده از سنتز تخلیه قوس در جریان ۱۴۰ آمپر و فشار گاز

بافر ۱۲ تور به حداقل می‌رسد، زمانی که هم گلبول‌های دوده و هم صفحات گرافن با اندازه‌های ۲۰ تا ۱۸۰ نانومتر با اندازه متوسط تشکیل شدند. ۶۵ نانومتر (شکل ۳ (C))، که قابل مقایسه و بزرگتر از اندازه گلبول‌های دوده است. در این حالت، رسانایی الکتریکی با نسبت محتوای صفحات گرافن و گلبول‌های دوده تعیین می‌شود و از نظریه نفوذ پیروی می‌کند.

۵- نتیجه گیری

به عنوان نتایج در این تحقیق و مقاله سنتز تخلیه قوس در فشارهای مختلف گاز بافر و جریان‌های تخلیه، نانومواد کربنی تولید شدند که بسته به شرایط سنتز، گلبول‌های دوده با اندازه متوسط در محدوده ۱۰ تا ۴۰ نانومتر را نشان می‌دهند. این مواد حاوی نانوذرات گرافن با اندازه‌های La در محدوده ۰,۵ تا ۲ نانومتر بسته به شرایط سنتز هستند. با این حال رسانایی الکتریکی مواد سنتز شده عمدتاً تحت تأثیر پدیده مقاومت تماسی است که به دلیل وجود مقدار زیادی کربن آمورف ظاهر می‌شود که نانوذرات گرافن را می‌بندد. برای چنین مواد سنتز شده، بسته به شرایط سنتز، رسانایی الکتریکی دارای مقدار 10^{-3} زیمنس بر متر برای ماده به دست آمده در فشار ۲۰۰ تور و ۱۲۰ آمپر تا ۵,۳ زیمنس بر متر برای ماده تولید شده در ۱۲ تور و ۱۲۰ آمپر. در صورت حضور در مواد سنتز شده صفحات گرافن با اندازه متوسط ۶۵ نانومتر که از بیشتر گلبول‌های دوده بزرگتر است، رسانایی الکتریکی چندین برابر افزایش می‌یابد و به ۳۳ زیمنس بر متر می‌رسد. رسانایی با نسبت محتوای گلبول‌های دوده و ساختارهای گرافن تعیین می‌شود. بنابراین، سنتز تخلیه قوس در شرایطی که بالاترین رسانایی الکتریکی ساختار کربن تولید شده را تضمین می‌کند، ویژگی‌های الکتروکاتالیستی، الکتروکرومیک و سایر ویژگی‌های ماده سنتز شده را بهبود می‌بخشد.

۶- مراجع

1. Kratschmer, W.; Lamb, L.; Fostiropoulos, K. & Huffman, D. R. Solid C60: a new form of carbon, *Nature*, 1990, 347, 354 – 358
2. Iijima, S. Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, 1991, 354, 56 – 58
3. Maltsev, V. A.; Novopashin, S. A.; Nerushev, O. A.; Snytnikov, P. V.; Sakhapov, S. Z. & Smovzh, D. V. Synthesis of metal nanoparticles on a carbon matrix. *Nanotechnologies in Russia*, 2007, 2, 85-89
4. Smovzh, D. V.; Sakhapov, S. Z.; Zaikovskii, A. V. & Novopashin, S. A. Morphology of aluminium oxide nanostructures after calcination of arc discharge Al/C soot, *Ceramics International*, 2015, 41, 8814-8819
5. Zaikovskii, A. V.; Mal'tsev, V. A. & Novopashin, S. A. Synthesis of tungsten carbide nanoparticles in WO₃ pyrolysis in a plasma arc. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 22, 77-85
6. Scott, J. H. J. & Majetich, S. A. Morphology, structure, and growth of nanoparticles produced in a carbon arc, *Phys. Rev. B*, 1995, 52, 12564-12571
7. R.V. Gulyaev, E.M. Slavinskaya, S.A. Novopashin, D.V. Smovzh, A.V. Zaikovskii, D.Yu. Osadchii, O.A. Bulavchenko, S.V. Korenev, A.I. Boronin. Highly active PdCeOx composite catalysts for low-temperature CO oxidation, prepared by plasma-arc synthesis. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2014, 147, 132– 143
8. A.V. Zaikovskii Analysis of Phase Composition of Materials Synthesized in Carbon and Tungsten Trioxide Pyrolysis in a DC Electric Arc in Helium Medium. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 22(1), 47– 52.
9. Saravanan G., Mohan S. Pt nanoparticles embedded on reduced graphite oxide with excellent electrocatalytic properties. *Applied Surface Science*. 2016, 386, 96-102.
10. Ibrahim M.A., Falleh Al-Solamy, Omar A. Al-Hartomy, Ahmed Al-Ghamdi, Farid El-Tantawy. Electrocatalytic reduction of oxygen on Ni/Graphite Nanoparticles. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2012, 9(4), 041003
11. Euler K.J., Kirchoff H., Metzendorf A. The electric conductivity and related phenomena of compressed powder materials. *J Mater Chem*, 1979, 4(4), 611–629.
12. Zorin F.I. Electrical resistivity of powdered graphites. *Inorg Mater*, 1986, 22(1), 47–49.
13. Donnet J.B., Voet A. Carbon black. New York: Marcel Dekker, 1976.
14. Pantea D, Darmstadt H, Kaliaguine S, Summchen L, Roy C. Electrical conductivity of thermal carbon blacks. Influence of surface chemistry. *Carbon*. 2001, 39, 1147–1158.
15. J. Sanchez-Gonzalez a, A. Macias-Garcia a, M.F. Alexandre-Franco b, V. Gomez-Serrano. Electrical conductivity of carbon blacks under compression. *Carbon*, 2005, 43, 741-747.

16. D. Dasgupta, F. Demichel, A. Tacliaferro. Electrical conductivity of amorphous carbon and amorphous hydrogenated carbon. *Philosophical Magazine B*, 1991, 63(6), 1255-1266.
17. Gorelik O.P., Dyuzhev G.A., Novikov D.V., Oichenko V.M., Fursei G.N. Cluster structure of fullerene-containing soot and C60 fullerene powder. *Technical Physics*. 2000, 45(11), 1489-1495.
18. Afanas'ev D.V., Bogdanov A.A., Dyuzhev G.A., Kruglikov A.A. Formation of fullerenes in an arc discharge. *Technical Physics*. 1997, 42(2), 234-237.
19. Belikov A.E., Zaikovskiy A.V., Maltsev V.A. ET. Al. The properties of carbon-carbonic condensate synthesized in the plasma arc. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2009, 16(4), 647-650
20. Cuesta A, Dhamelincoirt P, Laureyns J, Martinez-Alonso A, Tascon J. M. D. Raman microprobe studies on carbon materials. *Carbon*, 1994, 32, 1523-1532
21. Ferrari, A. C. & Robertson, J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon, *Phys. Rev. B*, 2000, 61, 14095-14107
22. Tuinstra, F. Raman Spectrum of Graphite, *The Journal of Chemical Physics*, 1970, 53, 1126
23. <https://www.elsevier.com/books/the-science-and-technology-of-carbon-nanotubes/yamabe/978-0-08-042696-9>.