УДК 538.9, 546.26 Научная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2026-19-9-24-33

Получение фторированных структур графита при высоких температурах, возникающих при импульсном нагреве

Г. Ю. Мотин

Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

georgii_motin@mail.ru

Аннотация. Исследовалось влияние фторидов и борсодержащих соединений на структуру и морфологию графитовых порошков при быстром джоулевом нагреве. Метод быстрого джоулева нагрева представляет собой импульсный высокотемпературный процесс, основанный на пропускании кратковременного электрического тока через проводящую порошковую смесь, с образованием высоких температур. В качестве источника фтора использовался фторопласт, также применялся тетраборат натрия ($Na_2B_4O_7$) для увеличения сопротивления, а исходным материалом служил синтетический реакторный графит марки ГР-220. Методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии подтверждено успешное внедрение фтора в частицы синтезируемого материала. Приведены микрофотографии как чистых материалов, так и спеченных порошков, получаемых в ходе быстрого джоулева нагрева, откуда видно, что частицы графита претерпели изменения при высоких температурах, став меньше и округлившись. Показано, что при импульсном нагреве фторопласт разлагается с выделением атомарного фтора, способствующего стабилизации sp^3-гибридизованных структур, в то время как бура выполняет роль флюса и источника бора, улучшая однородность распределения компонентов. Полученные результаты позволяют разработать новый метод целенаправленного синтеза углеродных наноматериалов, легированных фтором, с применением импульсного нагрева.

Ключевые слова: порошковые структуры, импульсный нагрев, наноструктурированные материалы, аллотропы углерода, фтор, дисперсные среды, графит

Для цитирования: Мотин Г. Ю. Получение фторированных структур графита при высоких температурах, возникающих при импульсном нагреве // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 9. С. 24–33. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-9-24-33.

Original article

Synthesis of Fluorinated Graphite at High Temperatures Generated by Flash Joule Heat

G. Iu. Motin

Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

georgii_motin@mail.ru

Abstract. This study investigates the influence of fluorides and boron-containing compounds on the structure and morphology of graphite powders during flash joule heating. The flash joule heating method is a high-temperature pulsed process based on passing a short-duration electric current through a conductive powder mixture, thereby generating extremely high temperatures. Polytetrafluoroethylene was used as the fluorine source, sodium tetraborate ($Na_2B_4O_7$, borax) was added to increase electrical resistance, and synthetic reactor-grade graphite (GR-220) served as the starting material. Scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy confirmed successful fluorine incorporation into the synthesized particles. Images of both pristine and flash joule heat treated powders reveal that graphite particles underwent significant morphological changes – becoming smaller and more rounded –due to exposure to high temperatures. It is shown that during

© Мотин Г. Ю, 2026

flash joule heating, polytetrafluoroethylene decomposes, releasing atomic fluorine that promotes the stabilization of sp^3-hybridized carbon structures, while borax acts as a flux and boron source, enhancing component homogeneity. These findings enable the development of a novel method for the targeted synthesis of fluorine-doped carbon nanomaterials using pulsed heating.

Keywords: powder structures, pulsed heating, nanostructured materials, carbon allotropes, fluorine, dispersed systems, graphite

For citation: Motin G. Iu. Synthesis of Fluorinated Graphite at High Temperatures Generated by Flash Joule Heat // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 9. P. 24–33. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-9-24-33.

Введение. Потребность в получении и разработке новых материалов с уникальными свойствами существует как в науке, так и в технике. Одним из таких перспективных материалов выступает графит. Благодаря своим исключительным физическим характеристикам он нашел свое применение как в электронике и энергетике, так и в других производствах. Графит как источник углерода представляет собой отличную базу для модификации различными материалами, в том числе фторированные структуры. Углерод способен образовывать прочные ковалентные связи с различными элементами периодической системы, что позволяет разрабатывать композиты с улучшенными механическими, электрическими и термическими свойствами. В контексте получения фторированных материалов добиваются нескольких ключевых целей: формирование прочных ковалентных C–F связей; повышение химической и термической устойчивости; увеличение удельной плотности энергии у получаемого материала. Фторированный углерод обладает наивысшей удельной энергоемкостью среди всех твердых катодных материалов – до 2190…2466 Вт · ч/кг, катодные материалы на его основе широко применяются в медицине (кардиостимуляторы, кохлеарные имплантаты, дефибрилляторы), военной промышленности и других областях [1]. Применение быстрого джоулева нагрева (БДН) открывает новые перспективы в получении как новых композитных материалов на основе аллотропов углерода, так и одновременно модифицировать поверхность получаемых композитов. Данный метод отличается эффективностью, простотой, дешевизной, возможностью достигать высоких температур за короткие промежутки времени.

Применение энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) – далеко не нововведение, однако именно анализ модифицированных материалов позволяет получить качественную и детальную информацию о получаемых материалах, особенно в сравнении с изначальными порошковыми смесями. Фторуглеродные соединения получают посредством гетерогенного взаимодействия твердых углеродных материалов с газообразным фтором при температурах, не превышающих 600 °C. В статьях такого рода основное внимание уделяется процессам, протекающим на границе раздела фаз, и влиянию температурных условий на степень фторирования углеродной структуры [2]. Помимо этого, проводились исследования по полному фторированию уже графита для образования двумерного кристалла – графенного фторида, с шириной запрещенной зоны порядка 3.5 эВ, что делает его перспективным для применения в электронике [3]. Монофторид графита $(CF)_n$ – это основной элемент соединения фторида графита. В свою очередь, фторированный слой графена называют фторографеном C_1F_1, если образцы графита содержат частицы фтора (C_1F_x, где $x < 1$), – то частично фторированным. Такие материалы имеют свойства открывать запрещенную зону в графене, что делает их привлекательными для внедрения в электронику. Если собрать озвученные свойства фторографена, появляется возможность управлять шириной запрещенной зоны благодаря фторированию, даже в качестве фторирования только наружного слоя образцов графита, может привести к изменению электрических свойств.

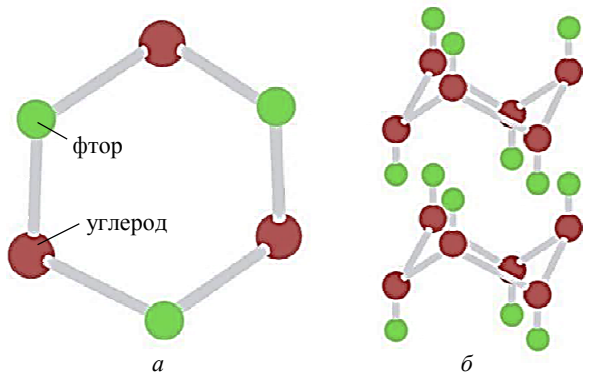


Рис. 1. Структура соединения фтора с углеродом: *а* – вид сверху; *б* – вид сбоку
Fig. 1. Structure of the fluorine–carbon compound: *а* – top view; *б* – side view

Фторид графита, как уже говорилось, находит применение в различных областях, даже в смазочных материалах [4], в качестве катодного компонента для энергоемких устройств [5], как элемент защитных покрытий (коррозионная устойчивость). На рис. 1, *а* представлена модель фторид-графена с гексагональной кристаллической решеткой. Атомы фтора ковалентно связаны с углеродом и располагаются в чередующихся позициях «вверх» и «вниз» относительно плоскости графена. Такая конфигурация приводит к локальному искажению связей C–C, что вызывает небольшое сгибание плоскости материала (рис. 1, *б*). Если говорить в контексте использования БДН, с помощью фторопласта авторы [6] получали фторированные наноалмазы, так как при импульсном нагреве фторопласт (политетрафторэтилен, ПТФЭ) разлагается с выделением атомарного фтора. Атомы фтора под воздействием высоких температур активно взаимодействуют с атомами углерода, особенно интенсивно – на поверхности уже образовавшихся наноалмазов. Фтор, обладая высокой электроотрицательностью, способствует поляризации связей C–C и стабилизации sp^3-гибридизованной структуры за счет формирования поверхностных связей C–F, а резкое охлаждение образца после БДН обеспечивает формирование наноалмазов без дефектов, при этом излишки фтора уходят при обильной газации во время нагрева.

Также существуют современные исследования по влиянию бора и его соединений на свойства различных материалов, включая графит. Особый интерес вызывает не только использование борной кислоты, но и непосредственное внедрение бора в структуру графита, что открывает новые перспективы для создания материалов с улучшенными характеристиками. Например, авторы публикации [7] экспериментально подтвердили, что добавление борной кислоты оказывает существенное влияние на повышение огнестойкости полимерных материалов. Этот эффект обусловлен способностью бора формировать защитные барьеры при высоких температурах, что препятствует распространению пламени и снижает выделение токсичных продуктов горения. При введении бора в структуру графита происходит изменение его кристаллической решетки, что приводит к улучшению физико-механических характеристик – прочности, теплопроводности, термостойкости и др. Это особенно важно для применения в условиях экстремальных температур, где обычный графит может терять свои свойства. В [8] предложен инновационный подход к созданию огнезащитного покрытия, основанный на использовании состава, содержащего карбамид, диаммонийфосфат, борную кислоту и воду.

Ранее уже говорилось, что модификация углерода как фтором, так и тетраборатом натрия представляет собой перспективное направление в улучшении характеристики материала. В данном исследовании использовался $Na_2B_4O_7$ – неорганическое соединение в виде порошка белого цвета, часто используемое в синтезе борсодержащих материалов [9]–[11]. Так, например, в исследовании, посвященном модификации перлита с использованием активированного угля и бора, авторы продемонстрировали эффективность применения буры для изменения физико-химических свойств выбранного материала [9]. Тетраборат натрия добавляли к смеси перлита в соотношении 1:20 в деионизированную воду при добавлении химического восстановителя натрия боргидрида ($NaBH_4$). После сравнения немодифицированного перлита с модифицированным образцом было обнаружено снижение потери массы и уменьшение усадки структуры, что связано с закрытием пор бором и, как следствие, с уменьшением потерь воды. Термогравиметрический анализ показал, что перлит, покрытый бурой, теряет всего 1.191 % массы, в то время как потери для перлита с углеродным покрытием и необработанного перлита составили 3.106 % и 3.153 % соответственно. Это особенно актуально для применения тетрабората натрия модифицированного материала в строительстве, где он может служить основой для бетона с улучшенными теплоизоляционными свойствами.

В [10] рассматривается модификация активированного угля бором с использованием коммерческого активированного угля и растворов буры. Помимо модификации графита, тетраборат натрия добавляют и в другие соединения, например бентонита в биокомпозитах на основе альгината [11]. В частности, было установлено, что малые количества буры способствуют лучшему распределению наполнителя в матрице, создавая более интеркалированную или эксфолизированную структуру композита. Также обнаружено, что бура способствует образованию новых водородных связей и приводит к улучшению гибкости биокомпозитов при сохранении их прочности, а также к повышению термической стабильности.

Цель данного исследования – получить фторированные углеродные наноструктуры на основе графита в среде фторопласта методом быстрого джоулева нагрева без применения токсичного газа F_2 и определить условия, обеспечивающие формирование гомогенных структур.

Методика эксперимента. Для синтеза фторированных углеродных структур использовали порошок синтетического реакторного графита марки ГР-220 (размером ~20 мкм), тетраборат натрия ($Na_2B_4O_7$) с размером частиц ~50…100 мкм, источником фтора служила поверхность фторопластовой трубки куда, помещались порошковые заготовки. Порошки смешивали до получения однородной смеси в течение 10 мин в кварцевой ступке, получаемую порошковую смесь засыпали в цилиндрическую фторопластовую камеру длиною 30 мм, внутренним диаметром 3…4 мм и наружным диаметром 13 мм. В дальнейшем засыпаемую смесь трамбовали с добавлением спирта чистотой 99.6 %, получаемые реакционные камеры сушили в течение суток на открытом воздухе.

Для проведения БДН требуется: реакционная камера, импульсный источник тока, осциллографы для регистрации токов и напряжений. Основой служит конденсаторная батарея емкостью от нескольких единиц до сотен фарад, заряжаемая от регулируемого источника постоянного тока при напряжении 100…500 В. При замыкании цепи происходит разряд конденсаторов через спрессованную порошковую заготовку, помещенную в изолированную реакционную камеру (обычно из кварца, керамики или фторопласта). В роли электродов применялись графитовые стержни, обеспечивающие электрический контакт с образцом. В ходе импульса (длительностью 20…500 мс) регистрируются напряжение, ток и время импульса. Установка компактна, не требует вакуумных систем или инертных газов, а весь процесс синтеза занимает менее секунды, что делает метод БДН энергоэффективным и масштабируемым.

Для исследования морфологии поверхности и проведения ЭДС применялся сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Hitachi SU1510. Анализ проводился в вакууме при давлении в камере 270 Па, порошки закреплялись на столике с помощью клейкой ленты. Для получения микрофотографий морфологии поверхности применялся детектор вторичных электронов, работающий при ускоряющем напряжении 5…15 кэВ. Элементный состав и распределение элементов по поверхности оценивались с помощью интегрируемого датчика при напряжении 30 кэВ.

Результаты. ЭДС в контексте данного исследования – это методика анализа. На основе полученных изображений и элементного состава микроструктуры фторированных углеродных соединений она позволяет визуально и аналитически оценить успешность внедрения фтора на поверхности порошковых материалов. Еще одним важным моментом служит оценка равномерного распределения компонентов фтора по всем образцам порошкового графита. Исследования по модификации графита различными материалами проводятся и по сей день, в частности и методом импульсного нагрева [6], [12], [13]. Так, на рис. 2 представлен спектр рассеяния исходного порошка графита марки ГР-220. Если судить по характерному пику, видно, что данный графит довольно чистый – так как примесей не наблюдается, чистота ГР-220 составляет порядка 99 %. Доминирующий пик $C \cdot K\alpha$ – при ~0.277 кэВ, с интенсивностью ~12 000 имп/с, что соответствует длине волны 44.7 Å [14].

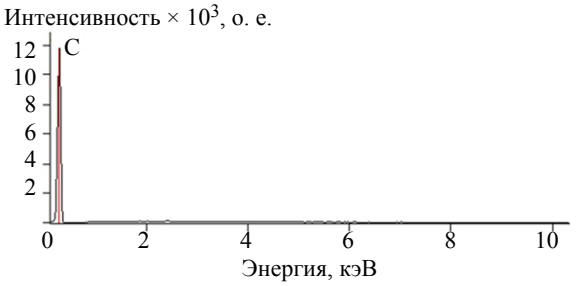
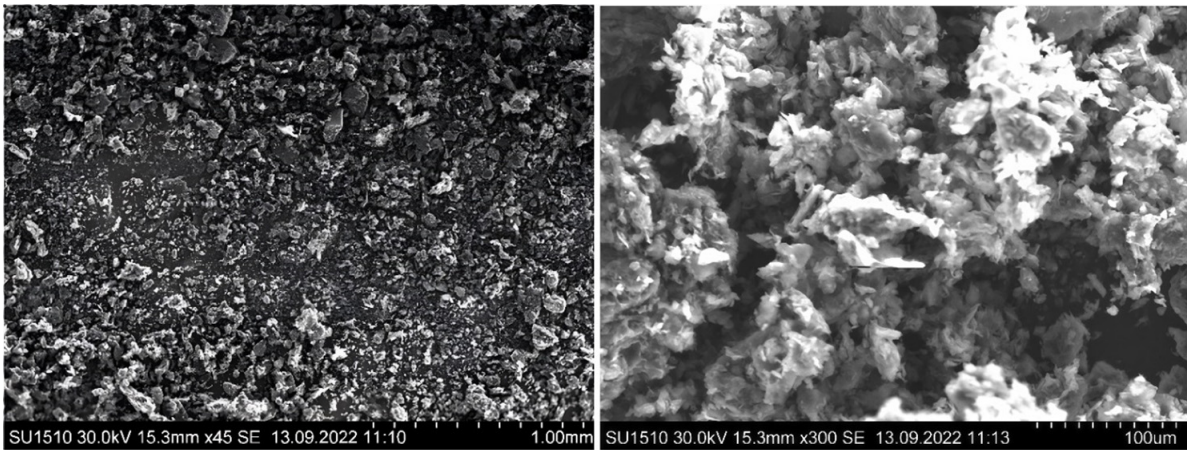


Рис. 2. Спектральная кривая чистого реакторного графита
Fig. 2. Spectral curve of pure reactor graphite

Электронные микрофотографии порошка ГР-220 в исходном состоянии приведены на рис. 3. Видно, что поверхность имеет неровный и шероховатый характер, что типично для графита; встречаются как мелкие частицы графита, так и большие кластеры, как субмикронные частицы размером ~0.5 мкм, так и более крупные, размером 100 мкм. Поскольку графит предварительно измельчали в ступке, вполне объяснимы такие разбросы размеров. В целом структура частиц характерна для синтетического графита.

Чтобы в процессе БДН действительно возник «пробой» образца, необходимо изменить сопротивление, иначе импульс просто пройдет по образцу и не вызовет его нагрев. Для этого добавлялся порошок тетрабората натрия (рис. 4) – бе-



а *б*

Рис. 3. СЭМ-изображение чистого реакторного графита ГР-220 при увеличении: *а* – × 45; *б* – × 300
Fig. 3. SEM image of pure reactor graphite RG-220 at a magnification of: *а* – × 45; *б* – × 300

лый кристаллический порошок, используемый в качестве флюса при высокотемпературной пайке. При нагреве выше 741° С он плавится с образованием низковязкой стекловидной фазы, способствующей улучшению контакта между частицами и удалению оксидных примесей. Поверхность частиц – шероховатая с выраженной рельефной текстурой, порошок представляет собой гранулы частиц $Na_2B_4O_7$.

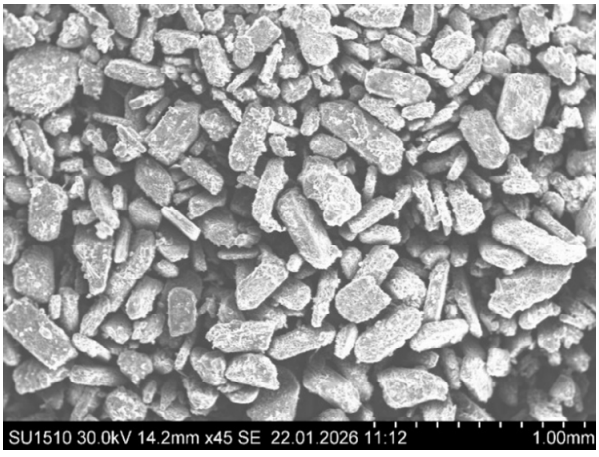
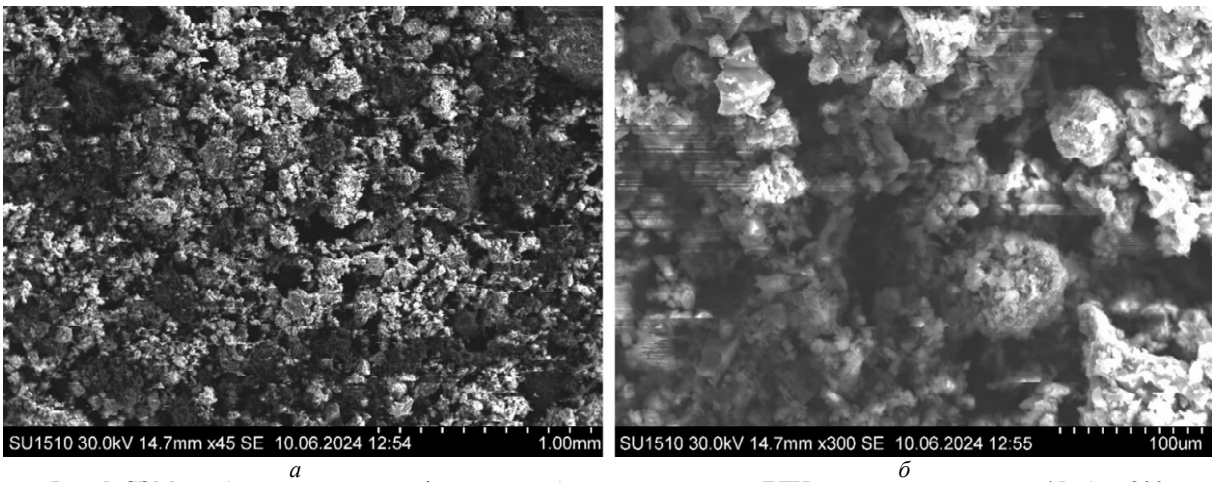


Рис. 4. СЭМ-изображение порошка тетраборат натрия при увеличении × 45
Fig. 4. SEM image of sodium tetraborate powder at a magnification of × 45

Изначальные порошковые заготовки представляли собой смеси углерода с бурой в разных пропорциях. Исходные порошки перемешали, после чего итоговая смесь обрела серый цвет и характерную сыпучую структуру. После быстрого импульсного нагрева при напряжении 200…300 В наблюдалось изменение образцов – они потемнели, кроме того, образцы стали напоминать спеченную структуру, что можно связать с частичным выгоранием графита и возможной реакцией между углеродом и тетраборатом натрия. У части образцов немного повысилась механическая прочность, а также в некоторых областях сохранилась рыхлость, тогда как в других зонах материал стал намного плотнее, образовав крупные структуры. Если же обратить внимание на морфологию поверхности образцов со смесью графита и буры (рис. 5), то можно видеть, что структурная плотность материалов изменилась, однако различить явные отдельные частицы графита или буры не представляется возможным.

По спектральным кривым полученного образца на рис. 5 видно, что исследуемые образцы по составу действительно представляют собой соединение буры ($Na_2B_4O_7$) с углеродом. Если говорить о спектральных кривых модифицируемых образцов, то из рис. 5 понятно, что основные элементы, входящие в состав буры, присутствуют, однако попадаются элементы Al и Si. Есть предположение, что остаточные следы этих элементов обнаруживались в экспериментальной камере. Также заметен большой пик содержания кислорода. Возможно, это связано с процессом окисления углерода во время спекания порошка и с адсорбцией кислорода на поверхности крупных частиц материала, а также с наличием у тетрабората натрия атомов кислорода.

СЭМ-изображения получали в режиме вторичных электронов при напряжении 30 кэВ, угол выхода детектора составлял 34.3°. Для коррекции количественного анализа применялся метод Proza. Данный метод обеспечивает точную компенсацию эффектов поглощения и атомного номера при ЭДС-анализе. В результате анализа получаются не только СЭМ-снимки порошковых



а *б*

Рис. 5. СЭМ-изображение смеси графита и тетрабората натрия после БДН при увеличении: *а* – ×45; *б* – ×300
Fig. 5. SEM image of a graphite–sodium tetraborate mixture after flash joule heating at a magnification of: *а* – ×45; *б* – ×300

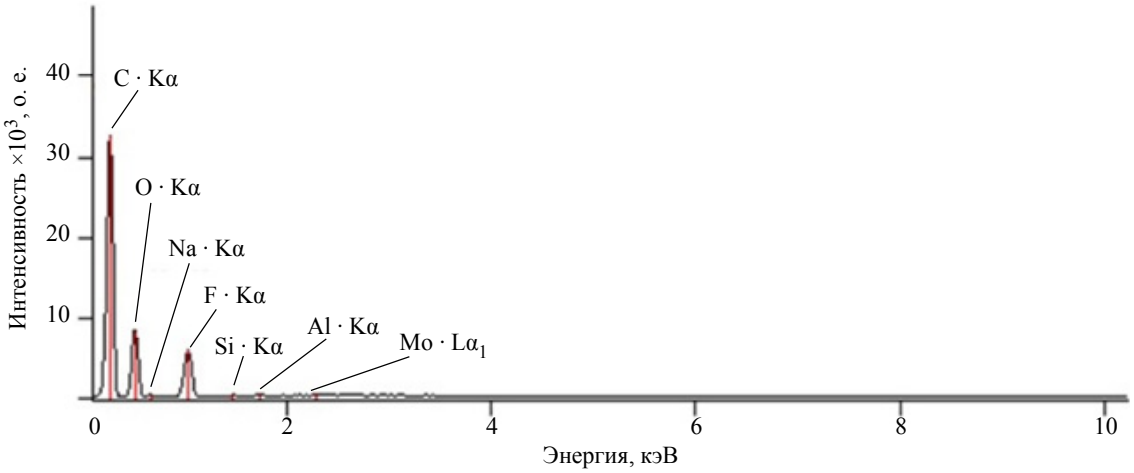


Рис. 6. Спектральная кривая образца порошковой смеси реакторного графита и тетрабората натрия
Fig. 6. Spectral curve of the powder mixture sample of reactor graphite and sodium tetraborate

Элементный состав спеченного порошка
Elemental composition of the sintered powder

Элемент	Массовая доля, %	Погрешность	Атом, %	Погрешность
C	24.46	+/–0.14	32.61	+/–0.18
O	40.49	+/–0.25	40.52	+/–0.25
F	17.26	+/–0.23	14.55	+/–0.19
Na	17.18	+/–0.08	11.97	+/–0.06
Al	0.61	+/–0.01	0.35	+/–0.01
Итог	100.0	–	100.0	–

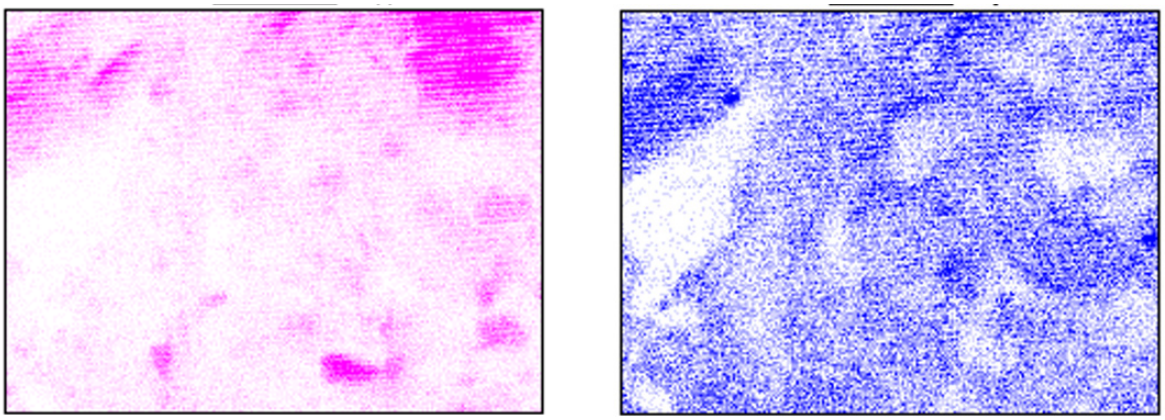
заготовок, но и таблицы количественных данных элементного состава. Более подробная информация по полученным во время анализа СЭМ-изображениям представлена в таблице.

Основную массовую долю продукта составляет углерод, есть и следы фтора, так как эксперимент проходил в трубке из фторопласта диаметром 4 мм, но его доля не составляет больше 5–20 %.

Обсуждение результатов. Анализ полученных данных показывает, что применение БДН во фторопластовой трубке с добавлением тетрабората натрия позволяет модифицировать структуру графита. ЭДС-спектры получаемых материалов подтверждают наличие фтора на поверхности частиц. Наличие значительного количества кислорода (массовая доля ~50 %) объясняется как адсорбцией на поверхности частиц, так и включением кислорода из структуры $Na_2B_4O_7$. Морфологические изменения (рис. 5) указывают на частичное спекание частиц и формирование плотных агломератов, что связано с локальным повышением температуры до 2000…3000 К. При этом равномерное распределение элементов по всему объему образца, подтвержденное анализом

нескольких СЭМ-изображений, говорит о высокой степени гомогенизации, что также подтверждается картой распределения элементов крупной прессованной частицы (рис. 7). На рисунке видно, что углерод и фтор распределены по поверхности неоднородно. Области с повышенной интенсивностью сигнала фтора преимущественно располагаются в зонах с пониженной интенсивностью сигнала углерода, тогда как на участках, где углерод практически отсутствует, интенсивность фтора также снижается. Наблюдаемая пространственная корреляция может указывать на возможное взаимодействие фтора с углеродсодержащей фазой и, предположительно, на фторирование поверхности углеродных частиц.

Сравнение с литературными данными [5] показывает, что механизм действия фтора при БДН аналогичен процессам, описанным для синтеза фторированных наноалмазов: атомарный фтор, образуется при термическом разложении. Однако 1–5 % в составе получаемого продукта – это крайне мало, из-за чего можно сделать вывод, что следует добавлять порошки с содержанием фтора непосредственно в образец, тем самым увеличив возможность фторирования получаемых материалов. В процессе БДН, так как углерод обладает высоким химическим сродством с кислородом, это приводит к образованию газообразных соединений – монооксида углерода CO и диоксида углерода CO_2. Это сродство количественно характеризуется отрицательными значениями энергии Гиббса (ΔG) образования указанных оксидов при 298 К ΔG (CO) = −137.16 кДж/моль



а *б*

Рис. 7. Карты распределения элементов по поверхности образца, крупной частицы после БДН: *а* – C; *б* – F
Fig. 7. Elemental distribution maps over the surface of a large particle of the sample after flash joule heating: *а* – C; *б* – F

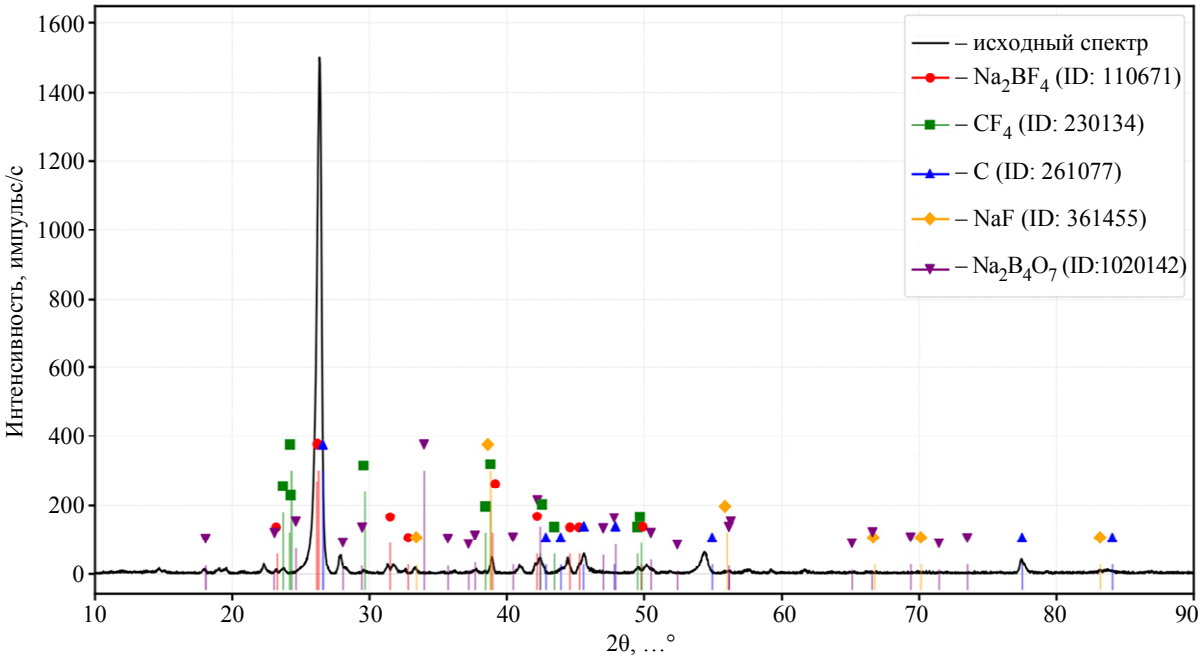


Рис. 8. Результаты рентгеноструктурного анализа порошковой смеси $Na_2B_4O_7$ с порошком графита после БДН
Fig. 8. Results of the X-ray diffraction analysis of the $Na_2B_4O_7$–graphite powder mixture after flash joule heating

и $\Delta G\,(CO_2) = -394.39$ кДж/моль. Данные газы не имеют запаха и опасны для человека только в больших концентрациях. Однако при горении фторопласта, напротив, образуются токсичные газы, поэтому следует проводить БДН либо в хорошо проветриваемом помещении, либо используя вытяжную вентиляцию. Также был проведен рентгеноструктурный анализ образцов (рис. 8), и он показал следующие результаты. Для проведения анализа использовался дифрактометр ДРОН-6 при излучении CuKα (K-серия в рентгеновской нотации Зигбана), исходные данные брались из базы данных PDWin (анализ проводился в специально разработанной программе). Регистрация положений дифракционных максимумов проводилась в координатах угла рассеяния 2θ, а интенсивность дифракционных максимумов определялась высотой пика и его площадью. Определение точного положения дифракционных максимумов по углу 2θ необходимо для определения элементов и оценки структурных изменений итоговой порошковой смеси после проведения БДН. Это позволяет оценить сохранение исходного состава порошка, оценить степень упорядоченности кристаллической решетки, а также выявить формирование новых фаз в процессе импульсного нагрева.

На дифрактограмме порошковой смеси $Na_2B_4O_7$ с графитом после БДН доминирует интенсивный рефлекс вблизи $2\theta \approx 26.5°$, однозначно соответствующий отражению (002) графита. Наряду с графитом идентифицированы рефлексы исходного тетрабората натрия, проявляющиеся в виде серии пиков малой и средней интенсивности, однако принципиально важным результатом служит обнаружение фаз, содержащих фтор: фторида натрия NaF с характерными рефлексами при $2\theta \approx 33$, 39 и 56°, тетрафторбората натрия $NaBF_4$ и тетрафторида углерода CF_4, пики которого проявляются в областях $2\theta \approx 24…28°$ и 32…36°. Появление фторсодержащих соединений объясняется взаимодействием компонентов смеси с фторопластовой средой разрядной камеры в процессе БДН, плазма высвобождает в ходе высоких температур атомы фтора с их последующим взаимодействием с атомами натрия, бора и углерода. Таким образом, рентгенофазовый анализ свидетельствует о том, что в результате БДН происходит синтез новых фторсодержащих фаз: NaF, $NaBF_4$, CF_4.

Выводы.

1. Установлено что БДН в фторопластовой реакционной камере с добавлением тетрабората натрия позволяет получать фторированные частицы углерода. ЭДС-анализ подтвердил равномерное распределение элементов по объему образца, что свидетельствует о высокой степени гомогенизации даже при кратковременном воздействии.

2. Показано, что фторопласт не только служит как диэлектрик и основа реакционной камеры, но и активно участвует в химических процессах, выступая источником фтора для модификации поверхности углеродных наноструктур.

3. Тетраборат натрия выполняет двойную функцию: улучшает теплопередачу и контакт между частицами, а также как источник бора, потенциально способствующий формированию бор-углеродных фаз. Полученные результаты открывают возможности для дальнейшего получения функциональных фторированных карбидных и алмазоподобных материалов.

4. В результате рентгеноструктурного анализа продуктов БДН порошковой смеси $Na_2B_4O_7$ с графитом подтвердил сохранение кристаллической структуры графита в качестве основной фазы при частичном сохранении исходного тетрабората натрия, а также выявил образование ряда фторсодержащих соединений: NaF, $NaBF_4$, CF_4.

Список литературы

1. The electrochemical performance of fluorinated ketjenblack as a cathode for lithium/fluorinated carbon batteries / Sh. Jiang, P. Huang, J. Lu, Z. Liu // RSC Adv. 2021. Vol. 11, no. 41. P. 25461–25470. doi: 10.1039/d1ra03873g.

2. Fluorocarbon materials produced by the thermo destruction of polytetrafluoroethylene and possibility of theirs application in Li/$(CF_x)_n$ batteries / D. P. Opra, S. V. Gnedenkov, A. K. Tsvetnikov, S. L. Sinebryukhov, V. I. Sergienko // Phys. Procedia. 2012. Vol. 23. P. 86–89. doi: 10.1016/j.phpro.2012.01.022.

3. Reversible fluorination of graphene: towards a two-dimensional wide bandgap semiconductor / S.-H. Cheng, K. Zou, F. Okino, H. R. Gutierrez, A. Gupta, N. Shen, P. C. Eklund, J. O. Sofo, J. Zhu // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 81, no. 20. doi: 10.1103/PhysRevB.81.205435.

4. Fusaro R. L., Sliney H. E. Graphite fluoride $(CF_x)_n$ – A new solid lubricant // A S L E Trans. 1970. Vol. 13, no. 1. P. 56–65. doi: 10.1080/05698197008972282. URL: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/05698197008972282 (дата обращения: 25.06.2026).

5. Some new synthetic approaches to graphite–fluorine chemistry / R. J. Lagow, R. B. Badachhape, J. L. Wood, J. L. Margrave // J. of the Chem. Soc., Dalton Trans. 1974. Vol. 3, no. 12. P. 1268–1273. doi: 10.1039/DT9740001268.

6. Ultrafast and controllable phase evolution by flash joule heating / W. Chen, J. T. Li, Z. Wang, W. A. Algozeeb, D. X. Luong, C. Kittrell, E. A. McHugh, P. A. Advincula, K. M. Wyss, J. L. Beckham, M. G. Stanford, B. Jiang, J. M. Tour // ACS Nano. 2021. Vol. 15, no. 7. P. 11158–11167. doi: 10.1021/acsnano.1c03536.

7. Мельникова Т. В., Назаренко О. Б. Влияние борной кислоты на характеристики горючести эпоксидных полимеров // Вестн. науки Сибири. 2015. № 15. С. 108–112.

8. Ноздрюхин А. Д., Черепанова М. В., Потапов И. С. Увеличение термостойкости листового терморасширенного графита // Вестн. ПермНИПУ. Химическая технология и биотехнология. 2019. № 1. С. 83–92. doi: 10.15593/2224-9400/2019.1.8.

9. Kiliçer A. Characterization and thermal behavior of modified perlite with carbon and borax // Yüzüncü Yıl University J. of the Institute of Natural & Appl. Sci. 2022. Vol. 27, no. 1. P. 93–100. doi: 10.53433/yyufbed.1059673.

10. Characterization of boron-modified activated carbons / A. Orhan, N. Çek, S. Sezer, I. Demir // Inorganics. 2025. Vol. 13, no. 2. Art. 54. P. 1–14. doi: 10.3390/inorganics13020054.

11. Benli B. Effect of borax addition on the structural modification of bentonite in biodegradable alginate-based biocomposites // J. Appl. Polym. Sci. 2013. Vol. 128, no. 6. P. 4172–4180. doi: 10.1002/app.38609.

12. Phase controlled synthesis of transition metal carbide nanocrystals by ultrafast flash Joule heating / B. Deng, Z. Wang, W. Chen, J. T. Li, D. X. Luong, R. A. Carter, G. Gao, B. I. Yakobson, Y. Zhao, J. M. Tour // Nature Commun. 2022. Vol. 13, no. 1. Art. 262. doi: 10.1038/s41467-021-27878-1.

13. Sustainable valorization of asphaltenes via flash joule heating / M. A. S. R. Saadi, P. A. Advincula, M. Sh. H. Thakur, A. Z. Khater, Sh. Saad, Ali Shayesteh Zeraati, Sh. K. Nabil, A. Zinke, S. Roy, M. Lou, S. N. Bheemasetti, Md A. Al Bari, Y. Zheng, J. L. Beckham, V. Gadhamshetty, A. Vashisth, Md G. Kibria, J. M. Tour, P. M. Ajayan, M. M. Rahman // Sci. Advances. 2022. Vol. 8, no. 46. Art. eadd3555. doi: 10.1126/sciadv.add3555.

14. Bearden J. A. X-Ray Wavelengths // Rev. of Modern Phys. 1967. Vol. 39, no. 1. P. 78–124. doi: 10.1103/RevModPhys.39.78.

Информация об авторе

Мотин Георгий Юрьевич – аспирант и сотрудник кафедры информационно-измерительных систем электроники и автоматики, Физико-технический институт Петрозаводского государственного университета, пр. Ленина, 33, Петрозаводск, 185910, Россия.
E-mail: georgii_motin@mail.ru

References

1. The electrochemical performance of fluorinated ketjenblack as a cathode for lithium/fluorinated carbon batteries / Sh. Jiang, P. Huang, J. Lu, Z. Liu // RSC Adv. 2021. Vol. 11, no. 41. P. 25461–25470. doi: 10.1039/d1ra03873g.

2. Fluorocarbon materials produced by the thermo destruction of polytetrafluoroethylene and possibility of theirs application in Li/$(CF_x)_n$ batteries / D. P. Opra, S. V. Gnedenkov, A. K. Tsvetnikov, S. L. Sinebryukhov, V. I. Sergienko // Phys. Procedia. 2012. Vol. 23. P. 86–89. doi: 10.1016/j.phpro.2012.01.022.

3. Reversible fluorination of graphene: towards a two-dimensional wide bandgap semiconductor / S.-H. Cheng, K. Zou, F. Okino, H. R. Gutierrez, A. Gupta, N. Shen, P. C. Eklund, J. O. Sofo, J. Zhu // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 81, no. 20. doi: 10.1103/PhysRevB.81.205435.

4. Fusaro R. L., Sliney H. E. Graphite fluoride $(CF_x)_n$ – A new solid lubricant // A S L E Trans. 1970. Vol. 13, no. 1. P. 56–65. doi: 10.1080/05698197008972282. URL: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/05698197008972282 (data obrashhenija: 25.06.2026).

5. Some new synthetic approaches to graphite–fluorine chemistry / R. J. Lagow, R. B. Badachhape, J. L. Wood, J. L. Margrave // J. of the Chem. Soc., Dalton Trans. 1974. Vol. 3, no. 12. P. 1268–1273. doi: 10.1039/DT9740001268.

6. Ultrafast and controllable phase evolution by flash joule heating / W. Chen, J. T. Li, Z. Wang, W. A. Algozeeb, D. X. Luong, C. Kittrell, E. A. McHugh, P. A. Advincula, K. M. Wyss, J. L. Beckham, M. G. Stanford, B. Jiang, J. M. Tour // ACS Nano. 2021. Vol. 15, no. 7. P. 11158–11167. doi: 10.1021/acsnano.1c03536.

7. Mel'nikova T. V., Nazarenko O. B. Vlijanie bornoj kisloty na harakteristiki gorjuchesti jepoksidnyh polimerov // Vestn. nauki Sibiri. 2015. № 15. S. 108–112. (In Russ.).

8. Nozdrjuhin A. D., Cherepanova M. V., Potapov I. S. Uvelichenie termostojkosti listovogo termorasshirennogo grafita // Vestn. PermNIPU. Himicheskaja tehnologija i biotehnologija. 2019. № 1. S. 83–92. doi: 10.15593/2224-9400/2019.1.8. (In Russ.).

9. Kiliçer A. Characterization and thermal behavior of modified perlite with carbon and borax // Yüzüncü Yıl University J. of the Institute of Natural & Appl. Sci. 2022. Vol. 27, no. 1. P. 93–100. doi: 10.53433/yyufbed.1059673.

10. Characterization of boron-modified activated carbons / A. Orhan, N. Çek, S. Sezer, I. Demir // Inorganics. 2025. Vol. 13, no. 2. Art. 54. P. 1–14. doi: 10.3390/inorganics13020054.

11. Benli B. Effect of borax addition on the structural modification of bentonite in biodegradable alginate-based biocomposites // J. Appl. Polym. Sci. 2013. Vol. 128, no. 6. P. 4172–4180. doi: 10.1002/app.38609.

12. Phase controlled synthesis of transition metal carbide nanocrystals by ultrafast flash Joule heating / B. Deng, Z. Wang, W. Chen, J. T. Li, D. X. Luong, R. A. Carter, G. Gao, B. I. Yakobson, Y. Zhao, J. M. Tour // Nature Commun. 2022. Vol. 13, no. 1. Art. 262. doi: 10.1038/s41467-021-27878-1.

13. Sustainable valorization of asphaltenes via flash joule heating / M. A. S. R. Saadi, P. A. Advincula, M. Sh. H. Thakur, A. Z. Khater, Sh. Saad, Ali Shayesteh Zeraati, Sh. K. Nabil, A. Zinke, S. Roy, M. Lou, S. N. Bheemasetti, Md A. Al Bari, Y. Zheng, J. L. Beckham, V. Gadhamshetty, A. Vashisth, Md G. Kibria, J. M. Tour, P. M. Ajayan, M. M. Rahman // Sci. Advances. 2022. Vol. 8, no. 46. Art. eadd3555. doi: 10.1126/sciadv.add3555.

14. Bearden J. A. X-Ray Wavelengths // Rev. of Modern Phys. 1967. Vol. 39, no. 1. P. 78–124. doi: 10.1103/RevModPhys.39.78.

Information about the author

Georgii Iu. Motin – postgraduate student and staff member of Department of Electronics and Power Engineering, Institute of Physics and Technology, Petrozavodsk State University, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, 185910, Russia.
E-mail: georgii_motin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.04.2026; принята к публикации после рецензирования 23.09.2026; опубликована онлайн 27.11.2026.

Submitted 20.04.2026; accepted 23.09.2026; published online 27.11.2026.