

Исследование продуктов термодеструкции графита при квазистационарном нагреве

И. С. Самойлов, А. В. Емельянов, А. В. Еремин, В. П. Полищук, Р. Х. Амиров

Методом эмиссионно-абсорбционной спектроскопии на длинах волн 515 и 589 нм исследовалась термодеструкция графитового стержня при температуре около 3 кК и скорости ее роста – ~1 К/с. Излучение на длине волны 515 нм определяется возбужденными молекулами C₂, на длине волны 589 нм – излучением микрочастиц. По мере роста температуры стержня температура на длине волны 515 нм увеличивалась, а на длине волны 589 нм – снижалась, что объясняется увеличением концентрации возбужденных молекул C₂ и микрочастиц графита вблизи стержня.

Ключевые слова: микрочастицы, графит, газофазные реакции, неравновесность, пары углерода.

Ссылка: Самойлов И. С., Емельянов А. В., Еремин А. В., Полищук В. П., Амиров Р. Х. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 4. С. 366.

Reference: I. S. Samoylov, A. V. Emelianov, A. V. Eremin, V. P. Polishchuk, and R. Kh. Amirov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (4), 366 (2019).

Введение

Углеродные структуры с самыми различными свойствами получают при конденсации на поверхности соединений углерода из парогазовой фазы. Для получения пара углерода широко используется испарение графита, нагреваемого проходящим током или дуговым разрядом. Поэтому исследование продуктов термодеструкции графита представляет интерес для технологии синтеза различных углеродных материалов.

В работе [1] исследовались твердофазные превращения в графитовых стержнях, нагревавшихся в атмосфере аргона при давлении ~50 кПа фиксированным электрическим током

до температуры ~3 кК. За время выдержки образца в течение ~10³ с происходил рост удельного сопротивления графита, что проявлялось в монотонном росте температуры стержня и падения напряжения на нем. Если максимальная температура образца достигала ~3,3 кК, то он разрушался и возникал дуговой разряд [2, 3]. В работах [2, 3] приведены свидетельства образования пленки расплава на поверхности графитовых электродов возникшего разряда.

По данным наших работ [2, 3], в течение ~10 с перед разрушением стержня вблизи его поверхности наблюдались подвижные «тени», происхождение которых может быть связано с выбросом микрочастиц с поверхности образца.

Целью данной работы являлось исследование методом эмиссионно-абсорбционной спектроскопии продуктов термодеструкции графитового стержня (пар углерода и микрочастицы) перед его разрушением.

Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на стенде, описанном в работах [1–3]. Исследовались образцы, изготовленные из спектрального гра-

Самойлов Игорь Сергеевич, в.н.с., к.ф.-м.н.
Емельянов Александр Валентинович, с.н.с., к.ф.-м.н.
Еремин Александр Викторович, зав. лаб., д.ф.-м.н.
Полищук Владимир Павлович, зав. лаб., к.ф.-м.н.
Амиров Равиль Хабибулович, с.н.с., д.ф.-м.н.
Объединенный институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2.
Тел. +7(495) 483-22-97. E-mail: pulse@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 28 июня 2019 г.

© Самойлов И. С., Емельянов А. В., Еремин А. В.,
Полищук В. П., Амиров Р. Х., 2019

фита с содержанием основных примесей (%): Fe – 9×10^{-5} , Mg – 3×10^{-5} , Mn – 8×10^{-5} , Al – 1×10^{-3} , Si – 5×10^{-4} , Cu – 1×10^{-4} , В – 2×10^{-4} . Удельное сопротивление используемого графита при комнатной температуре – $\rho_{e0} = 11$ (мкм Ом); плотность $\rho = 1,7$ г/см³. Наиболее нагретая часть стержня имела диаметр 3 мм и

длину 20 мм. Стержень устанавливался горизонтально в молибденовые держатели. Опыты проводились в вакуумной камере, снабженной системой диагностических кварцевых окон. Перед экспериментом камера откачивалась до давления ~ 1 Па и заполнялась аргоном с давлением ~ 50 кПа.

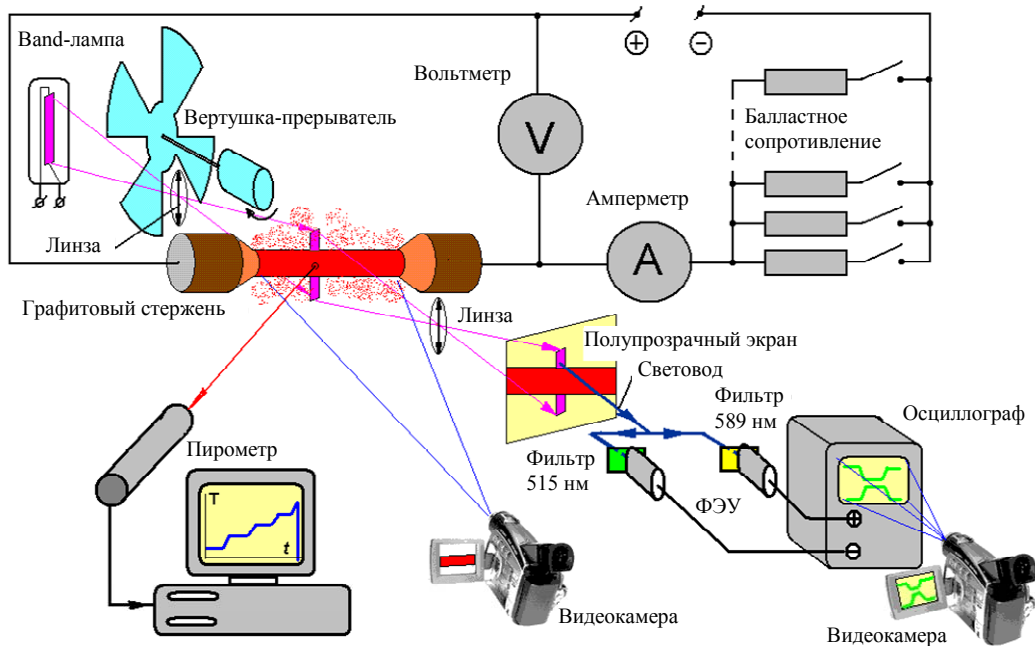


Рис. 1. Схема эксперимента и спектральных измерений.

Образец нагревался постоянным током, регулируемым с помощью реостата. В процессе нагрева регистрировались ток нагрева и напряжение на стержне. Характерное значение тока было около 100 А, напряжение – около 10 В. Температура в центре образца T_s измерялась яркостным пирометром IS-140 на длине волны 0,9 мкм с пространственным разрешением 0,9 мм и временным разрешением 10 мс. При определении истинной температуры использовались значения спектральной степени черноты графита на длине волны 0,9 мкм из работы [2].

Схема реализации метода эмиссионно-абсорбционной спектроскопии пояснена на рис. 1. В качестве источника света применялась калиброванная ленточная вольфрамовая лампа ТРУ-СИ-10-300. Изображение накальной ленты лампы в масштабе 1:1 фокусировалось на оси в центре графитового стержня с помощью линзы и затем другой линзой с таким же фокусным расстоянием проецирова-

лось на полупрозрачный экран также в масштабе 1:1. В результате на экране наблюдались изображения накальной лампы и стержня. В экране на месте изображения накальной ленты было выполнено отверстие для световодов диаметром 0,3 мм, по которым излучение поступало на два ФЭУ. Перед одним ФЭУ установлен интерференционный фильтр $\lambda = 589$ нм, перед другим – $\lambda = 515$ нм. Сигналы с ФЭУ поступали на вход осциллографа. Излучение лампы модулировалось вращающимся диском с вырезанными секторами. В результате на экране осциллографа регистрировалось модулированное на 100 % излучение просвечивающей лампы. Это позволяло регистрировать как поглощение просвечивающего излучения, так и собственное излучение продуктов термодеструкции графита (ПТГ) на выбранных длинах волн.

Экран осциллографа снимался на видеокамеру, что позволило регистрировать процесс термодеструкции образца, длившийся

$\sim 10^2$ с, с временным разрешением не хуже 0,2 мс. Сигнал после фильтра $\lambda = 515$ инвертировался, что позволило различать на экране осциллографа сигналы от разных ФЭУ. На рис. 2 приведен кадр съемки экрана осциллографа при комнатной температуре образца. Нулевая линия для линии $\lambda = 589$ нм находится в верхней левой части экрана, и сигнал имеет отрицательную полярность (правая нижняя часть экрана). Нулевая линия для линии $\lambda = 515$ нм находится в нижней левой части экрана, сигнал имеет положительную полярность (правая верхняя часть экрана). Начальные амплитуды сигналов для обеих длин волн просвечивающего излучения выравнивались. Таким образом, в левой половине экрана осциллографа регистрировались сигналы, пропорциональные амплитуде собственного излучения ПТГ на длинах волн 515 и 589 нм, а в правой половине экрана на тех же длинах волн регистрировалось поглощение просвечивающего излучения.

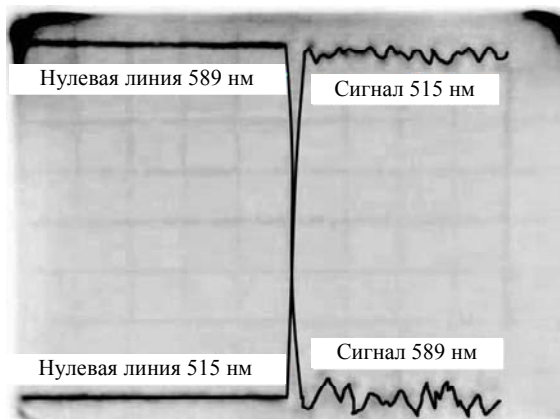


Рис. 2. Сигналы с двух ФЭУ для $\lambda = 589$ нм и $\lambda = 515$ нм (инвертированный) при температуре стержня 293 К (развертка 2 мс/дел.).

Используемая оптическая схема позволяла диагностировать процессы в зоне диаметром 0,3 мм (диаметр световода), находящейся под стержнем на расстоянии 1,5 мм от него.

Для диагностики процесса образования облака ПТГ у поверхности стержня и измерения его эффективной температуры на различных длинах волн использовался обобщенный метод обращения спектральных линий [4]. Согласно этому методу, температура ПТГ $T_{c.v.}$ может быть определена из уравнения

$$T_{c.v.} = T_{\lambda} \left[1 + \frac{T_{\lambda} k}{E_{\nu}} \ln \left(1 - \frac{I_a - I_0}{I_e} \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

где E_{ν} – энергия фотона, k – постоянная Больцмана, T_{λ} – яркостная температура эталонной лампы на длине волны λ , I_a – интенсивность излучения эталонной лампы, прошедшего через слой ПТГ (т. е. интенсивность излучения в абсорбционном канале), I_0 – интенсивность излучения эталонной лампы в отсутствие ПТГ, I_e – интенсивность излучения ПТГ. Одновременно в одном и том же сечении измерялись абсорбционные сигналы и интенсивности собственного излучения ПТГ на двух длинах волн 589 и 515 нм с шириной полосы ± 2 нм. Измерения на 515 нм соответствовали переходу 0-0 полосы излучения Свана молекулы C_2 , длина волны 589 нм лежала в стороне от полос излучения C_2 . Таким образом, излучение на длине волны 515 нм может определяться молекулами C_2 (температура T_m), а на длине 589 нм – излучением аэрозольных частиц графита (температура T_p).

Из измерений абсорбционных сигналов определялась оптическая плотность изучаемой среды:

$$a_p = -\ln(I_a / I_0) / L \quad (2)$$

где L – длина луча в камере.

Результаты и обсуждение

В экспериментах фиксированный ток накала устанавливалась так, чтобы температура в центре образца T_s составляла 2,7–2,8 кК. Во время выдержки образца при фиксированном токе происходил монотонный рост падения напряжения на нем и, как следствие, – рост его температуры, что объясняется локальным увеличением удельного сопротивления графита [1, 2]. Свечение образца оставалось однородным вплоть до температуры $T_s \cong 3$ кК. При более высокой температуре наблюдалось локальное затемнение образца выделяемыми ПТГ в виде «теней», перемещавшихся у поверхности образца. С дальнейшим ростом температуры образца снижалась прозрачность «теней».

На рис. 3 и 4 приведены изображения графитового стержня, снятые с интервалом около 4 с на конечной стадии разогрева при фиксированном токе накала 157 А, давление аргона 48 кПа. Изображение на рис. 3 соответствует начальной стадии формирования облака ПТГ у поверхности стержня, а на рис. 4 показано сформировавшееся облако ПТГ. Облако перемещалось вдоль поверхности образца со скоростью ~ 1 см/с. Через $\sim 0,5$ с после кадра на рис. 4 центральный участок стержня разрушился, что привело к возникновению дугового разряда.

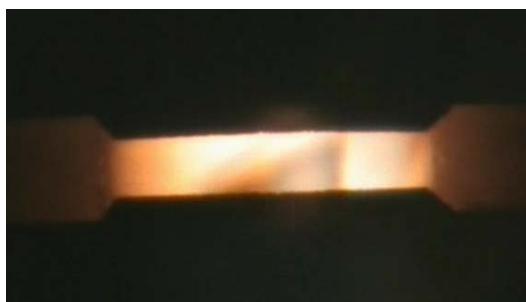


Рис. 3. Графитовый стержень в начале стадии формирования облака ПТГ.



Рис. 4. Графитовый стержень на конечной стадии формирования облака ПТГ перед взрывообразным разрушением.

На рис. 5 приведены осциллограммы собственного излучения ПТГ и ленточной вольфрамовой лампы на длинах волн 589 и 515 нм на стадии интенсивного формирования облака ПТГ. Осциллограммы в левой половине экрана обусловлены собственным излучением ПТГ на обеих длинах волн. На правой половине экрана сигналы определяются суммой собственного излучения облака ПТГ и светом лампы сплошного спектра, частично поглощенного в облаке ПТГ. Скачки сигналов на осциллограммах связаны с движением облака ПТГ, что наглядно проявлялось на видеосъемке стержня (см. рис. 3, 4).

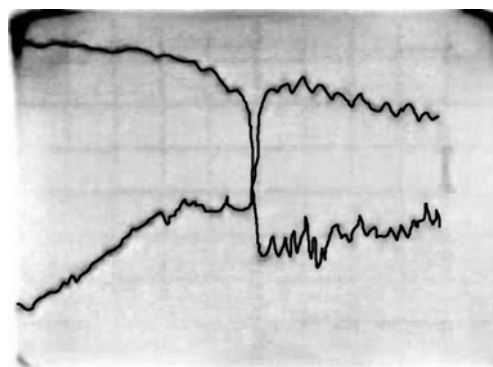


Рис. 5. Пример осциллограмм собственного излучения ПТГ на длинах волн 589 и 515 нм (левая половина экрана) и суммы собственного излучения ПТГ и частично поглощенного излучения лампы сплошного спектра (правая половина экрана) на стадии интенсивного образования ПТГ (развертка 2 мс/дел).

В данном эксперименте ток был выключен через ~ 1 с после разрушения стержня и возникновения дуги. После этого в течение десятков секунд в луче лампы сплошного спектра визуально наблюдалось наличие мелкой аэрозоли, ослабляющей луч лампы (см. рис. 6). Собственное излучение ПТГ при этом отсутствовало. После откочки камеры сигналы с ФЭУ вернулись к первоначальному виду, показанному на рис. 2.

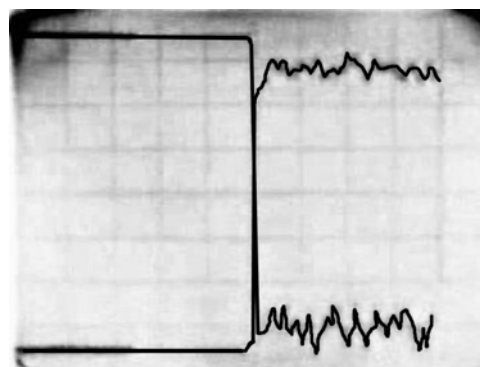


Рис. 6. Осциллограммы поглощения излучения лампы сплошного спектра на длинах волн 589 и 515 нм остывшими парами углерода и графитовой аэрозолью через ~ 30 с после разрушения графитового стержня (правая половина экрана), развертка 2 мс/дел.

На рис. 7 приведен пример фрагмента термограммы образца в момент его разрушения и возникновения дуги, ток через образец - 150 А, давление аргона - 52 кПа. Средняя скорость роста температуры образца перед

разрушением составляла около 3 К/с. Кратковременные снижения температуры, связаны с частичным перекрытием облаком ПТГ фрагмента стержня, температура которого измерялась пирометром. Разрушение стержня произошло при температуре 3,2 кК, а непосредственно перед этим перекрытие образца облаком ПТГ привело к скачку измеряемой температуры вниз до 3,07 кК. Разрушение стержня и возникновение дуги при достижении температуры $\cong 3,3$ кК описано в наших работах [2, 3].

На рис. 8 приведены результаты обработки по формуле (1) сигналов с ФЭУ в течение

4 с непосредственно перед разрушением стержня. За это время температура стержня увеличилась на $\sim 0,02$ кК. Линиями показаны усредненные значения температур. Как видно, в начальный момент температуры ПТГ, измеренные на длинах волн 515 и 589 нм, – близки, температура молекул T_m превышает температуру частиц на 0,04 кК. Затем различие температур T_m и T_p начинает увеличиваться: температура частиц (589 нм) снижается с 2,33 кК до 2,24 кК, а температура на длине 515 нм увеличивается с 2,37 до 2,45 кК. К моменту разрушения стержня разница температур T_m и T_p достигла 0,21 кК.

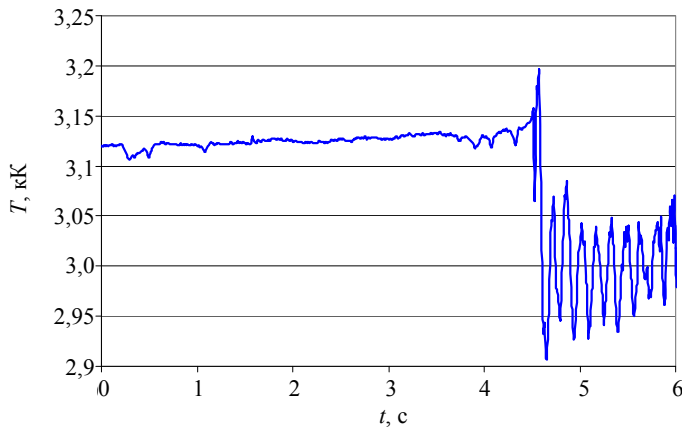


Рис. 7. Термограмма образца при его разрушении и возникновении дуги.

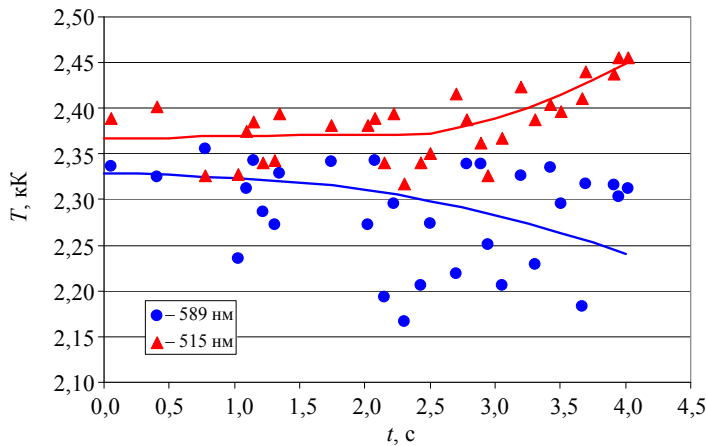


Рис. 8. Температура облака ПТГ на длинах волн 589 и 515 нм.

Увеличение температуры ПТГ на длине волны 515 нм может быть связано с увеличением концентрации электронно-возбужденных молекул C_2^* . Отметим, что в работе [6] отмечалось, что в экзотермических реакциях рекомбинации атомарного углеродного пара может происходить активное образование возбужденных молекул C_2^* . Увеличение концентрации возбужденных молекул C_2^* , излучающих на длине волны 515 нм, можно оце-

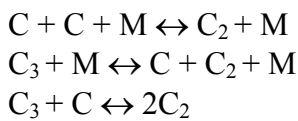
нить на основании данных рис. 8 из формулы Планка для спектральной интенсивности излучения:

$$u_\lambda(T, \lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (3)$$

где h – постоянная Планка. Если принять, что в начальный момент различие температур T_m и

T_p (~0,04 кК) определяется излучением молекул C_2 , то из формулы (3) следует, что вклад излучения молекул составляет ~18 % от суммарного излучения ПТГ. Непосредственно перед разрушением (при $T_m = 2,45$ кК) вклад их излучения возрастает до 66 % от излучения ПТГ, при этом интенсивность излучения на длине волны 515 нм, оцениваемая из (3), возросла на 47 %. Из этого следует, что интенсивность излучения молекул увеличилась примерно в пять раз.

По данным [5], при температуре ~3 кК в паре углерода преобладают атомы и трехатомные молекулы, доля молекул C_2 составляет ~1 % от всех частиц. При увеличении температуры графита на 0,02 кК концентрация частиц увеличивается ~20 % [5]. Таким образом, оцененное увеличение концентрации молекул C_2^* не может объясняться их испарением с поверхности. Однако двухатомные молекулы углерода могут образовываться в результате газофазных реакций [6]:



С учетом того, что концентрация атомов и трехатомных молекул углерода значительно превышает концентрацию молекул C_2 , то сравнительно небольшое увеличение концентрации C и C_3 (на ~20 %) при возрастании температуры образца может привести к значительному увеличению концентрации C_2 . При этом, как отмечено выше, в результате химических реакций могут активно образоваться и возбужденные молекулы C_2^* .

Образование молекул C_2 в условиях данного эксперимента носит неравновесный характер. В этих процессах могут принимать участие и электроны, хотя их концентрация мала, но их температура достаточно высока. Напряженность продольного электрического поля E у поверхности образца равнялась ~2 В/см, концентрация атомов аргона N_a при давлении ~50 кПа и температуре ~3 кК – составляет ~ 10^{18} см⁻³. Таким образом, параметр Таунсенда (E/N_a) равняется ~ $0,2 \times 10^{-17}$ В/см². По данным [7] при этих условиях температура электронов в аргоне составляет ~2 эВ.

Температуру микрочастиц T_p вблизи поверхности стержня можно оценить из баланса энергии, принимая, что они нагреваются тепловым излучением стержня. Так как площадь поверхности частиц, на которую падает излучение от стержня, примерно вдвое меньше, чем площадь поверхности, с которой происходит сброс энергии излучением, то установившаяся температура микрочастицы найдется из соотношения:

$$T_p \cong T_s (\epsilon_t / 2)^{0,25} \quad (4)$$

где ϵ_t – интегральная степень черноты графита, по данным [1], для используемого графита $\epsilon_t = 0,85$. Из соотношения (4) при $T_s = 3,1$ кК температура микрочастицы $T_p \cong 2,5$ кК, что, как видно из рис. 8, близко к значению температуры ПТГ на длине волны 589 нм в начале графика. Последующее снижение температуры T_p , вероятно, связано с увеличением числа микрочастиц вблизи поверхности, которые, экранируя излучение стержня, снижали температуру частиц в зоне наблюдения. При этом мог возрастать вклад в излучение микрочастиц, которые находились на удалении от стержня, и имели поэтому более низкую температуру. Косвенным подтверждением этому может служить увеличившийся разброс температуры ПТГ на длине волны 589 нм по сравнению с температурой на 515 нм (см. рис. 8).

Для обсуждаемого эксперимента по соотношению (2) оценивалось увеличение оптической плотности ПТГ на исследованных длинах волн. Важный результат заключается в том, что оптическая плотность среды, измеренная в полосе (0,0) Свана молекул C_2 (515 нм), практически не отличается от оптической плотности, измеренной в стороне от нее (589 нм). Этот результат свидетельствует, что основной вклад в спектры поглощения вносят конденсированные частицы углерода с размерами не менее 5 нм. Согласно работам [8, 9], в видимой области спектра коэффициент экстинкции углеродных частиц размером свыше более 5 нм более чем на два порядка превышает коэффициент поглощения молекулярных полос. В то же время, углеродные частицы с размером менее 5 нм являются практически прозрачными в видимой области спектра [10].

Эжекция микрочастиц с поверхности графита довольно подробно рассматривался в работе [11], в которой этот процесс исследовался при нагреве графитовых образцов в атмосфере аргона. Температура, при которой выброс частиц значительно интенсифицировался, в зависимости от марки графитового материала изменялась в диапазоне от 2,95 до 3,15 кК. Размер частиц составлял от долей микрона до десятков микрон, их максимальная скорость достигала ~ 30 м/с. Изменялась интенсивность осаждения частиц на коллекторе, установленном на расстоянии ~ 5 см от образца. Для частиц с размером ~ 20 мкм интенсивность составляла $\sim 10^5$ частиц/(см² с), при размерах частиц до 0,5 мкм она увеличилась до $\sim 10^9$ частиц/(см² с). По данным работы [11] при температуре образца около 3,1 кК уменьшение его массы на 60–90 % определялось выбросом микрочастиц. Интенсивные потоки частиц наблюдались при давлении аргона до ~ 10 Па, при давлении свыше $\sim 10^2$ Па они не наблюдались. В качестве механизма, объясняющего эжекцию микрочастиц, в работе [11] рассматривался рост давления газа в закрытых порах графита.

Отметим, что используемый в работе двухлучевой «обобщенный метод обращения спектральных линий», строго говоря, справедлив лишь для измерений температур в газовых объемах, где соотношение интенсивностей эмиссионных и абсорбционных сигналов определяется законом Кирхгофа. Однако измерения [12], проведенные в ударных волнах, содержащих наночастицы сажи, показали, что данная методика является вполне корректной для измерения температуры «поглощающих» (или «рэлеевских») частиц, т. е. частиц с размерами много меньше длины волны зондирующего излучения, у которых вклад рассеяния в коэффициент экстинкции пренебрежимо мал по сравнению с вкладом поглощения.

Заключение

Экспериментально получено, что по мере разогрева графитового стержня оптическая плотность облака продуктов термодеструкции

графита (ПТГ) возрастает, при этом значения температуры, измеренные на длинах волн 515 и 589 нм, начинают различаться между собой. Различие может достигать нескольких сотен градусов К. Температура на длине волны 515 нм, которая связана с излучением электронно-возбужденных молекул C_2^* , увеличивается, что может быть объяснено возрастанием концентрации возбужденных молекул C_2^* , образующихся в результате экзотермических газофазных реакций с участием атомов углерода и молекул C_3 . Температура на длине 589 нм, определяемая излучением аэрозольных частиц графита, уменьшается, что можно объяснить увеличением концентрации микрочастиц графита, экранирующих излучение стержня.

Проведенное исследование продуктов термодеструкции графита представляет интерес для технологии синтеза различных углеродных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асиновский Э. И., Киселев В. И., Менделеев В. Я., Полищук В. П., Сквородько С. Н. // ТВТ. 2006. Т. 44. № 3. С. 401.
2. Амиров Р. Х., Киселев В. И., Менделеев В. Я., Полищук В. П., Самойлов И. С., Сквородько С. Н. // ТВТ. 2016. Т. 54. № 5. С. 680.
3. Полищук В. П., Самойлов И. С., Амиров Р. Х., Киселев В. И. // ТВТ. 2018. Т. 56. № 3. С. 338–345. DOI: 10.7868/S0040364418030031.
4. Рёсслер Ф. Измерения температуры. Физика быстропротекающих процессов. – М.: Мир, 1971. Т. 1. С. 463–513.
5. Несмеянов А. Н. Давление пара химических элементов. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 396 с.
6. Вагнер Х. Г., Денне Й., Емельянов А. В., Еремин А. В., Заслонко И. С., Шумова В. В. // ДАН, Химия. 2001. Т. 379. № 1. С. 63–68.
7. Физические величины. Справочник под ред. Григорьева И. С., Мейлихова Е. З. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
8. Quinten M., Kreibig U., Henning Th., Mutschke H. // Appl. Opt. 2002. Vol. 41. No. 33. P. 7102.
9. Emelianov A., Eremin A., Jander H., Wagner H. Gg. / Proc. 29-th Symp. on Comb. 2002. P. 2115.
10. Basile G., Rolando A., D'Alessio A., D'Anna A., Minutolo P. / Proc. 29-th Symp. on Comb. 2002. P. 2104.
11. Whittaker A. G., Kintner P. L. // Carbon. 1976. Vol. 14. P. 257.
12. Drakon A. V., Eremin A. V., Makeich A. A. // Combustion Science and Technology, 2005. Vol. 2. P. 23.

The study of products of thermal decomposition of graphite with quasi-stationary heating

I. S. Samoylov, A. V. Emelianov, A. V. Eremin, V. P. Polishchuk, and R. Kh. Amirov

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
Bld. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia
E-mail: pulse@ihed.ras.ru

Received June 28, 2019

The thermal destruction of a graphite rod at the temperature of about 3 kK and its growth rate of about 1 K/s was studied by the method of emission absorption spectroscopy at wavelengths of 515 and 589 nm. The radiations at the wavelength of 515 and 589 nm are determined respectively by excited C₂ molecules and microparticles. As the temperature of the rod grows, the temperature at the wavelength of 515 nm increased, while at the wavelength of 589 nm it decreased. Such behaviour is explained by an increase in the concentration of excited C₂ molecules and graphite microparticles near the rod.

Keywords: microparticles, graphite, gas-phase reactions, nonequilibrium, carbon vapour.

REFERENCES

1. E. I. Asinovskii, V. I. Kiselev, V. Ya. Mendelev, V. P. Polishchuk, and S. N. Skovorod'ko, *High Temperature* **44**, 396 (2006).
2. R. Kh. Amirov, V. I. Kiselev, V. Ya. Mendelev, V. P. Polishchuk, I. S. Samoylov, and S. N. Skovorod'ko, *High Temperature* **54**, 644 (2018).
3. V. P. Polishchuk, I. S. Samoylov, R. Kh. Amirov, and V. I. Kiselev, *High Temperature* **56**, 327 (2018).
4. F. Rossler, *Temperature measurements. High-speed Physics. Vol. 1.* (Springer-Verlag, 1967).
5. A. N. Nesmianov, *Vapour pressure of the chemical elements.* (Moscow, Publ. House of Academy of Sciences of USSR, 1961) [in Russian].
6. H. Gg. Wagner, J. Deppe, A. V. Emelianov, A. V. Eremin, I. S. Zaslanko, and V. V. Shumova, *Doklady of Academy of Sciences. Chemistry* **379**, 181 (2001).
7. *Handbook Physical Quantities.* Edit. by Grigoriev I. S., Meylikhov E. Z. (Moscow, Energoizdat, 1991) [in Russian].
8. M. Quinten, U. Kreibig, Th. Henning, and H. Mutschke, *Appl. Opt.* **41**, 7102 (2002).
9. A. Emelianov, A. Eremin, H. Jander, and H. Gg. Wagner, in *Proc. 29-th Symp. on Comb.* (2002) p. 2115.
10. G. Basile, A. Rolando, A. D'Alessio, A. D'Anna, and P. Minutolo, in *Proc. 29-th Symp. on Comb.* (2002) p. 2104.
11. A. G. Whittaker and P. L. Kintner, *Carbon*, **14**, 257 (1976).
12. A. V. Drakon, A. V. Eremin, and A. A. Makeich, *Combustion Science and Technology*, **2**, 23 (2005).