

Пространственные структуры, образующиеся на поверхности углеродных материалов в процессе затвердевания расплава, созданного под действием лазерного импульсно-периодического излучения

Д.В.Абрамов, С.М.Аракелян, С.В.Кутровская, А.О.Кучерик, В.Г.Прокошев

Проведён анализ поверхности углеродных материалов после ее лазерного плавления в процессе взаимодействия лазерного излучения с поверхностью мишени при атмосферном давлении. На основе исследования данных образцов методами электронной микроскопии обнаружено, что при затвердевании жидкой фазы материала возникают поверхностные микроструктуры, предположительно, вследствие развития неустойчивости Рэлея–Тейлора в жидком углероде. Даны оценки инкремента неустойчивости и коэффициента поверхностного натяжения жидкой фазы углерода, проведено численное моделирование процесса проникновения паров углерода в его расплав за время действия одного лазерного импульса.

Ключевые слова: плавление углерода, неустойчивость Рэлея–Тейлора, электронная микроскопия.

1. Введение

В настоящее время существуют различные мнения о механизмах плавления углерода при атмосферном давлении [1–3]. Использование лазерного диагностического комплекса дало возможность наблюдать в реальном масштабе времени процесс плавления углерода [4]. Исследование поверхности образцов после теплового лазерного воздействия позволяет получать дополнительную информацию о процессах, протекающих в области модификации материала [5].

В настоящей работе с помощью электронного микроскопа проведены исследования углеграфитовых образцов, поверхность которых расплавлена под действием лазерного излучения. Характерные микроструктуры, возникающие при затвердевании расплава углерода, обнаружены в области лазерного воздействия (с размером порядка размера лазерного пучка), а также на границе этой области. На поверхности образца зафиксированы пространственные структуры, вид и расположение которых позволяют предположить, что они сформировались в процессе развития неустойчивости Рэлея–Тейлора в жидком углероде.

2. Эксперимент

Образцы из стеклоуглерода и пиролитического графита подвергались воздействию излучения YAG : Nd³⁺-лазера с длиной волны $\lambda = 1.06$ мкм, работающего в импульсно-периодическом режиме при частоте следования импульсов $f = 150$ Гц и длительности импульса $\tau = 2$ мс;

Д.В.Абрамов, С.М.Аракелян, С.В.Кутровская, А.О.Кучерик, В.Г.Прокошев. Владимирский государственный университет, Россия, 600000 Владимир, ул. Горького, 87; e-mail: kucherik@vlsu.ru

Поступила в редакцию 17 января 2008 г., после доработки – 9 сентября 2008 г.

размер пятна лазерного излучения на образце изменялся от 100 до 400 мкм. Средняя мощность излучения варьировалась в пределах 10–100 Вт; при этом обеспечивалась плотность мощности излучения на поверхности образца до 10^7 Вт/см². Время воздействия на образец t составляло 1–10 с.

Поверхность образцов после лазерного нагрева и плавления исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D, дающего изображения поверхности в цифровой форме с увеличением до 100000 при пространственном разрешении до 3.5 нм.

3. Результаты

В процессе теплового воздействия лазерного излучения на поверхность углеродных материалов в образовавшейся ванне расплава – каверне – возникает жидкая фаза углерода [4]. Гидродинамические процессы, протекающие в области взаимодействия лазерного излучения с поверхностью мишени, зависят от типа материала и условий эксперимента. Характерными признаками образования жидкости, наблюдающимися после лазерного воздействия на образец, являются застывшая капля в центральной зоне каверны (наблюдается только на поверхности стеклоуглерода, что, по-видимому, связано с проникновением газа в изначально непористый материал в процессе плавления из-за развивающихся гидродинамических неустойчивостей и вследствие этого с расширением материала при затвердевании) (рис. 1,а), образование конусных пор правильной геометрической формы (рис. 1,б) на мишенях из обоих материалов (стеклоуглерод и пиролитический графит), и появление на образцах из пирографита спиралевидных структур (рис. 1,в) и даже выплесков расплава вещества (рис. 1,г), невозможное для твердофазного разрушения.

Формирование ограниченной области с повторяющимися микропорами позволяет предположить, что в процессе воздействия в ванне расплава развивается неустой-

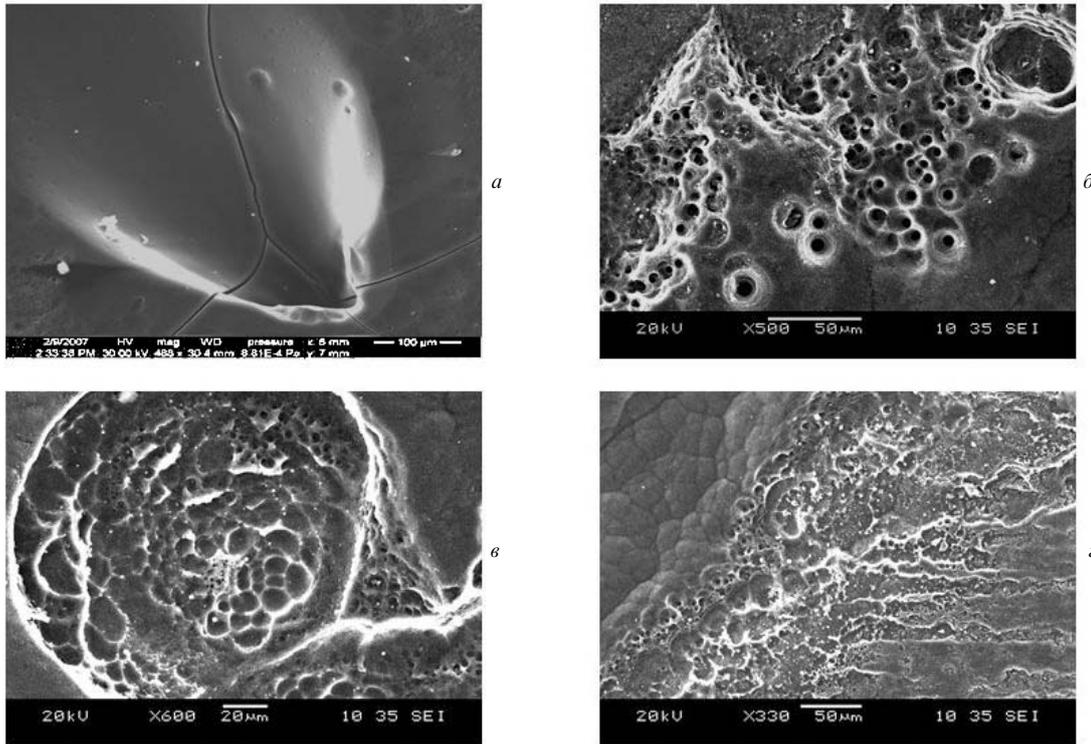


Рис.1. Электронно-микроскопические изображения поверхности: застывшая выпуклость в центральной зоне на поверхности стеклоглерода (а), конусные поры правильной геометрической формы (б), застывшая спиралевидная структура (в) и выплески жидкой фазы материала (г).

чивость Рэлея – Тейлора. Неустойчивость такого типа возникает на границе раздела двух жидкостей, когда тяжелая жидкость расположена над легкой и присутствует начальное возмущение [6]. В общем случае это возмущение ξ можно описать в виде капиллярных волн:

$$\xi = \frac{\xi_0}{2} e^{\gamma t} \cos kx, \quad (1)$$

где γ – инкремент неустойчивости, который можно рассчитать по формуле

$$\gamma = \left[\frac{ak(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1 + \rho_2} \right]^{1/2}; \quad (2)$$

a – ускорение движения раздела границ двух жидкостей; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны возмущений поверхности; ρ_2 – плотность тяжелой жидкости (расплав углерода); ρ_1 – плотность легкой жидкости (пар).

В рассматриваемом случае развития неустойчивости в области теплового воздействия лазерного излучения на

поверхность углеродосодержащего материала тяжелая жидкость (расплав) расположена, наоборот, под легкой (пары углерода). Однако обратное давление плазменно-эрозионного факела, возникающего непосредственно над облучаемой поверхностью, ускоряет легкую жидкость в направлении поверхности, моделируя тем самым процесс взаимного проникновения двух сред по сценарию развития неустойчивости Рэлея – Тейлора [6] (рис.2,а).

Ускорение движения границы раздела жидкой и газовой фаз углерода оценивается согласно работе [6] и составляет для приведенных выше условий экспериментов $\sim 10^3$ м/с². Инкремент неустойчивости γ при таком ускорении получается равным 10^5 с⁻¹.

Из соотношения (2) очевидным образом следует, что существует некоторая минимальная длина волны λ_m , которой соответствует наибольший инкремент неустойчивости, т. е. возмущения с такой длиной волны будут развиваться быстрее остальных.

По изображениям поверхности, полученным после лазерного воздействия (рис.2,б), можно оценить длину

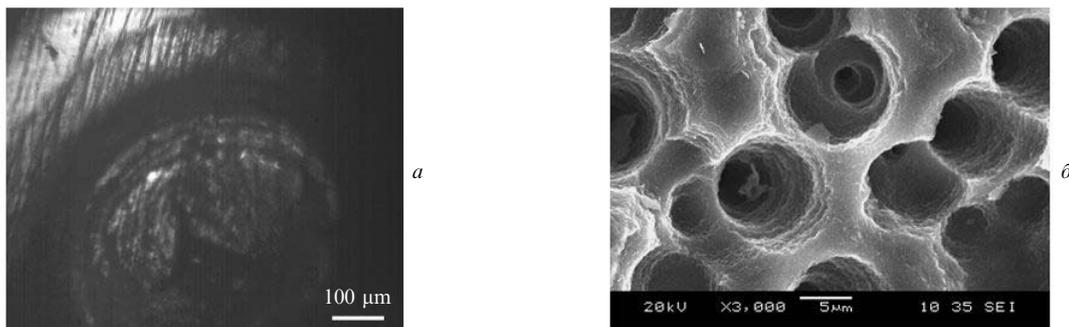


Рис.2. Электронно-микроскопические изображения поверхности: периодические светлые кольца на поверхности стеклоглерода (а) и конусовидные структуры на поверхности пиролитического графита (б).

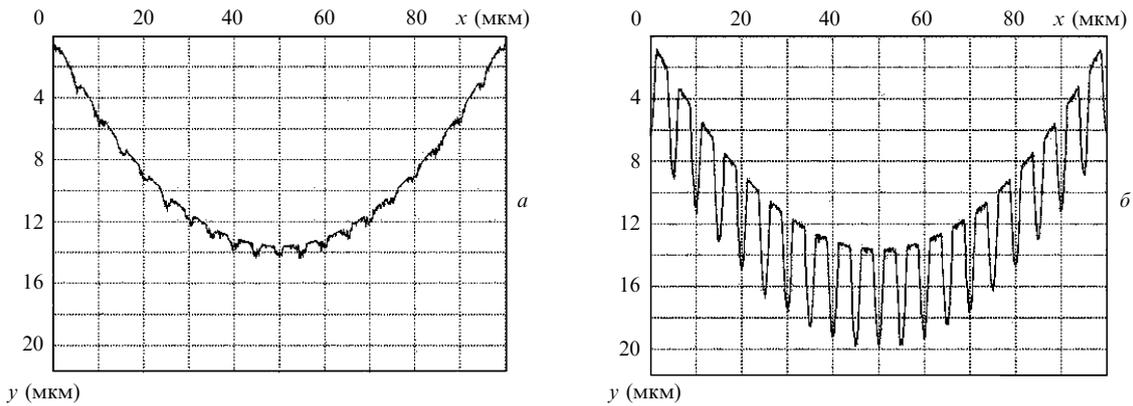


Рис.3. Формирование начального возмущения на границе расплав – пар под действием давления паров отдачи при $t = 0$ (а) и 10^{-4} с (б).

волны начального возмущения: $\lambda_m = 5 \pm 0.5$ мкм. Действительно, видно, что средний размер таких возмущений – «пор» – практически не изменяется по поверхности. Таким образом, можно предположить, что наблюдаемый в эксперименте диаметр пор и является характерным размером доминирующих начальных возмущений, для которого согласно [7] верно следующее равенство:

$$\lambda_m = \sqrt{6\pi}\zeta, \tag{3}$$

где

$$\zeta = \left(\frac{2\sigma}{\rho a}\right)^{1/2} \tag{4}$$

– капиллярная постоянная; ρ – плотность. Равенство (3) позволяет оценить поверхностное натяжение жидкого углерода как $10^{-9} - 10^{-10}$ Н/м.

4. Модель

В рамках предположения о формировании пор на поверхности стеклоуглерода вблизи области лазерного теплового воздействия за счет развития неустойчивости Рэлея – Тейлора и последующего затвердевания расплава выполнено численное моделирование процесса проникновения паров углерода в расплав за время действия одного лазерного импульса. Начальное возмущение границы раздела двух фаз – расплава и паров углерода – задавалось в виде волн, определяемых выражением (1). Однако, поскольку в процессе развития неустойчивости проникновение паров в расплав имеет случайный характер, вблизи границ раздела помимо регулярного экспоненциально растущего периодического возмущения использовалась модель фрактального броуновского дви-

жения [7]. С учетом параметров эксперимента получаем начальный профиль поверхности, представленный на рис.3,а, который за 10^{-4} с существенным образом искажается (рис.3,б).

При этом до вытеснения расплава из области лазерного воздействия под давлением плазменно-эрозионного факела могут формироваться пространственные структуры глубиной ~ 2 мкм.

5. Обсуждение

В рамках рассматриваемого подхода развитие неустойчивости на границе раздела двух фаз – расплава и паров углерода – происходит следующим образом. При образовании жидкой фазы углерода в результате лазерного плавления [4, 5] начинается активное испарение ее поверхности, что приводит к образованию интенсивного плазменно-эрозионного факела над областью лазерного воздействия. С увеличением обратного давления факела этот газ испарений, который можно считать легкой жидкостью, начинает проникать в тяжелую жидкость – расплав [6]. Начальный момент развития неустойчивости на поверхности раздела двух фаз сопровождается движением капиллярных волн (рис.4,а), которые в дальнейшем распадаются, и начинается более активное взаимное проникновение жидкостей, что приводит к образованию пористых структур в расплаве. За счет того, что под действием обратного давления паров расплав вытесняется из области лазерного воздействия, после его затвердевания пористые структуры содержатся также и на границе каверны (рис.4,б).

В условиях неламинарного движения расплава возможна ситуация, когда малый объем газа целиком ин-

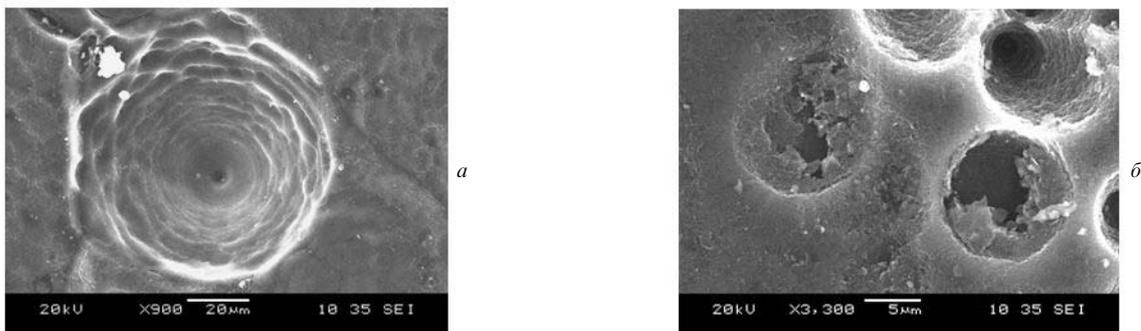


Рис.4. Изображение пузырьков на поверхности пиролитического графита: непрорвавшийся пузырек (а) и пузырьки, разрушившиеся после кристаллизации (б).

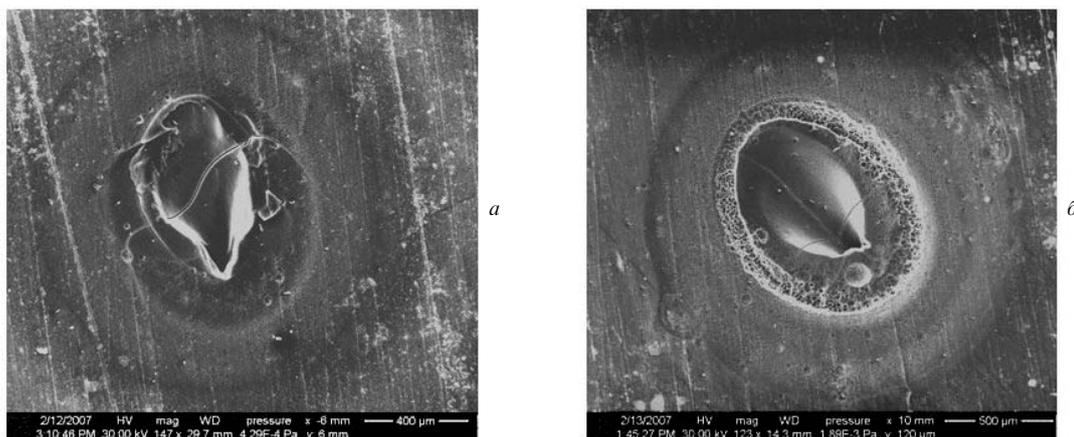


Рис.5. Характерный вид каверны на поверхности стеклоглерода: застывшая в центре выпуклая капля расплава и кольцевые зоны осадений при воздействии в течение 5 с и менее (а), а также зона конусообразных структур – пузырьков – после воздействия в течение более 5 с (б).

капсулирован в объеме расплава. В этом случае, оказавшись вне области высоких внешних давлений паров отдачи, что реализуется на краю каверны, газ устремляется вверх к поверхности. Однако из-за быстрого затвердевания жидкого углерода (по экспериментальным наблюдениям за время не более 0.2 мкс) оставшиеся в приповерхностном слое пузырьки газа не всегда достигают поверхности. Это приводит к образованию характерных возмущений поверхности образца в виде холмов (рис.4,а) или же неглубоких (по сравнению с порами, образовавшимися под действием сильного давления паров) ямок. Отличительными особенностями последних являются застывшие на краях чешуйки (рис.4,б).

Образование вихревых структур (рис.1,б) может быть связано с неоднородностью поля внешнего давления паров на расплав или же с высокой скоростью движения расплава.

Установлено также, что в условиях нашего эксперимента только после лазерного воздействия на поверхность образца в течение 5 с образуется достаточное количество расплавленного материала для регистрации развития неустойчивости Рэлея – Тейлора (рис.5).

6. Заключение

Методами электронной микроскопии проведено исследование затвердевшей поверхности углеродных обра-

зцов после лазерного поверхностного плавления. Показано, что наблюдаемая морфология поверхности связана с плавлением пирографита/стеклоглерода при давлении, близком к атмосферному. Предложен механизм формирования пространственных поверхностных структур за счет развития внутри области лазерного воздействия неустойчивости расплава по сценарию Рэлея – Тейлора. Численный расчет подтверждает возможность локального развития неустойчивости по такому механизму за время действия одного лазерного импульса. Однако в условиях нашего эксперимента для наблюдения гидродинамических явлений при лазерном нагреве поверхности необходимо иметь достаточное количество расплава, которое образуется за определенное время.

1. Whittaker A.G. *Science*, **200** (4343) 763 (1978).
2. Whittaker A.G. *Nature*, **276** (5689), 695 (1978).
3. Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Костановский А.В. *УФН*, **172** (8), 931 (2002).
4. Абрамов Д.В., Аракелян С.М., Галкин А.Ф., Квачева Л.Д., Климовский И.И., Кононов М.А., Михайлицын Л.А., Кучерик А.О., Прокошев В.Г., Савранский В.В. *Письма в ЖЭТФ*, **84** (5), 315 (2006).
5. Абрамов Д.В., Герке М.Н., Кучерик А.О., Кутровская С.В., Прокошев В.Г., Аракелян С.М. *Квантовая электроника*, **37** (11), 1051 (2007).
6. Чивель Ю.А. *Квантовая электроника*, **18** (10), 1218 (1991).
7. Саранин В.А. *Равновесие жидкостей и его устойчивость* (М.: изд-во Института компьютерных исследований 2002).