

УДК 535.341.08; 004.942

О.Г. ЦАРЬКОВА<sup>1</sup>, А.А. РУХАДЗЕ<sup>1</sup>, В.П. ТАРАКАНОВ<sup>1</sup>,  
В.Б. ЦВЕТКОВ<sup>1</sup>, С.В. ГАРНОВ<sup>1</sup>, В.В. НАЗАРЕНКО<sup>2</sup>,  
П.Я. НОСАТЕНКО<sup>2</sup>, Б.А. ВЫСКУБЕНКО<sup>3</sup>

### ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ НЕИЗВЕСТНЫХ ПОТЕРЯХ В ЭРОЗИОННОМ ФАКЕЛЕ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

**Ключевые слова:** углерод-карбидкремниевый композиционный материал (УККМ), высокомошное непрерывное лазерное излучение, численное моделирование температурного поля, программа КАРАТ, двухволновой пирометр, термопара, потери (поглощение и рассеяние) лазерного излучения в эрозионном факеле, коэффициент поглощения образца, эффективный коэффициент поглощения образца.

**Keywords:** carbon silicon carbide composite material (CSCCM), high-power continuous laser radiation, numerical modeling of a temperature field, KARAT code, two-wave pyrometer, thermocouple, losses of laser radiation in an ablation plume, absorptivity, effective absorptivity.

#### 1. Постановка задачи

Поверхность образцов углерод-карбидкремниевое композиционного материала (УККМ) облучалась в воздухе при нормальном давлении непрерывным лазерным излучением (ЛИ) с плотностью мощности около  $3 \text{ кВт/см}^2$  в течение 1 с, вследствие чего они нагревались до температур, при которых начинается абляция материала и горение продуктов абляции.

Проведенные нами эксперименты продемонстрировали, что эрозионный факел может оказывать влияние на нагрев и абляцию материала, но насколько значительна эта роль, оставалось неясным. С целью определения этой роли были проведены модельные эксперименты (МЭ).

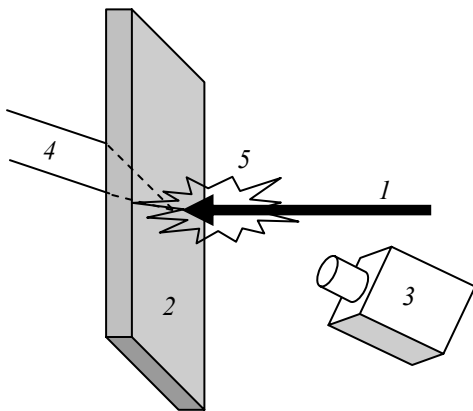
Для достижения целей МЭ было решено опираться на зависимости температуры от времени на обратной стороне образца УККМ, измеренные с помо-

<sup>1</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва.

<sup>2</sup> ОАО «ВПК «НПО машиностроения», г. Реутов.

<sup>3</sup> ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ», г. Саров.

© Коллектив авторов, 2011.



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — лазерное излучение, 2 — образец, 3 — пирометр для измерения температуры на лицевой поверхности, 4 — термопара для измерения температуры на тыльной стороне образца, 5 — приповерхностный факел

щью термопар, не подверженных влиянию эрозионного факела на лицевой поверхности, а также на показания пирометра FMP-1001, с помощью которого измерялась температура поверхности (рис. 1). Измеренные пирометром две яркостные температуры и рассчитанная цветовая температура ограничивают диапазон значений истинной температуры с известной точностью (зависящей от поглощательной способности материала) [1, 2].

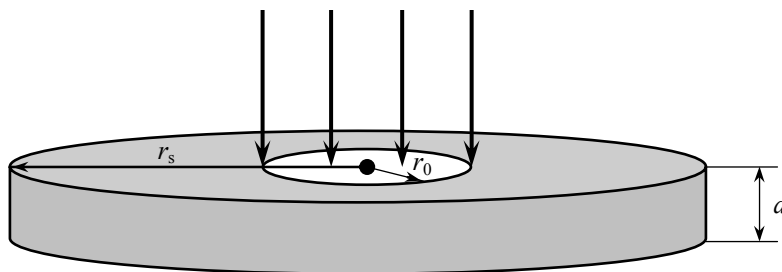
В МЭ решалась задача по моделированию температурных полей образца по времени и сопоставлению расчетных температурных распределений с экспериментальными. Проводился также расчет потока ЛИ, необходимого для достижения такого

распределения. Таким образом, определяется нижняя граница коэффициента поглощения образца, а также оценивается влияние факела на величину энерго-вклада.

## 2. Описание расчетной модели

Размеры образцов в экспериментах —  $30 \times 6 \times 0.35$  см, размеры пятна облучения — примерно  $3 \times 3$  см. При таких условиях можно считать, что теплообмен образца с окружающей средой через боковую поверхность не будет заметно влиять на процесс нагрева образца и математическая задача теплопроводности близка к двумерной.

Исходя из такого допущения, с помощью расчетно-теоретической модели (РТМ) решалась задача по определению поля температур по объему для плоского образца в форме таблетки, схематически изображенного на рис. 2, при облучении его лицевой поверхности ЛИ с радиусом пятна  $r$ , определяемым



**Рис. 2.** Модельный образец в форме таблетки толщиной  $a$  и радиусом  $r_s$ ,  $r_0$  — характерный радиус пятна ЛИ, падающего на образец

площадью лазерного пучка в проведенных экспериментах. Следует отметить, что решение задачи в аксиально симметричной форме не вносит существенной погрешности по сравнению с реальной формой образца и пятна ЛИ.

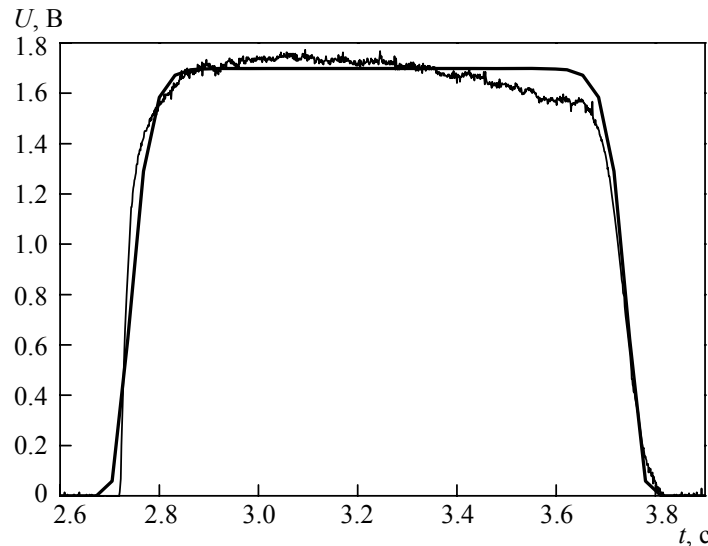
Таблетка толщиной  $a$  представляет собой твердую термостойкую среду радиуса  $r_s$  с анизотропной теплопроводностью (рис. 2). Образец УККМ представляет собой настолько термостойкое вещество, что во время всего лазерного импульса удаляется только порядка  $1/1000$  от всей массы образца. По сравнению с толщиной образца глубина кратера после абляции составляет порядка 1 %. Поэтому в МЭ можно не учитывать теплоты фазовых переходов низкотемпературных компонентов образца из-за относительной малости этих величин в тепловом балансе.

Лицевая поверхность материала облучается импульсом высокоинтенсивного ЛИ с плотностью потока излучения

$$q(r, t) = q_0(t) \exp\left(-\frac{r^{2n}}{r_0^{2n}}\right), \quad (1)$$

где  $n$  — целое число больше единицы, величина  $r_0$  характеризует радиальное распределение потока излучения по поверхности (в виде супергауссового распределения). Функция  $q_0(t)$  (единичная ступенька длиной, равной времени импульса) характеризует временную форму импульса ЛИ. Функция  $q(r, t)$  имеет вид столбчатого распределения, представленного на рис. 3.

Поток тепла поглощается на поверхности образца, растекается вдоль поверхности и проникает вглубь. Этот процесс описывается уравнением теплопроводности



**Рис. 3.** Форма импульса лазерного излучения в реальном эксперименте (тонкая линия) и в модельном эксперименте (жирная линия, показатель степени супергауссового импульса  $n = 10$ )

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \chi_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \chi_r(T) \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

где  $\chi_{z,r}(T)$  — коэффициенты поперечной и продольной (по отношению к поверхности) температуропроводности образца, связанные с коэффициентами теплопроводности  $\kappa_{z,r}(T)$  соотношением

$$\chi_{z,r}(T) = \frac{\kappa_{z,r}(T)}{c_p(T) \rho}, \quad (3)$$

где  $c_p$  и  $\rho$  — теплоемкость и плотность материала.

Уравнение (2) для рассматриваемой задачи дополняется начальным и граничными условиями

$$\begin{cases} T(z, r, t = 0) = T_0, \\ \kappa_z(T) \frac{\partial T(z = 0, r, t)}{\partial z} = A(T) q(r, t) - \varepsilon \sigma T^4(z = 0, r, t), \\ \kappa_z(T) \frac{\partial T(z = a, r, t)}{\partial z} = -\varepsilon \sigma T^4(z = a, r, t), \\ \kappa_r(T) \frac{\partial T(z, r = r_s, t)}{\partial r} = -\varepsilon \sigma T^4(z, r = r_s, t). \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $T_0$  — начальная температура (до облучения импульсом лазера),  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$  — постоянная Стефана–Больцмана,  $A$  — коэффициент поглощения лазерного излучения на поверхности образца,  $\varepsilon$  — среднеинтегральный по спектру коэффициент черноты материала.

При написании краевых условий в расчет не брались тепловые потери, вызванные теплопроводностью на границах образец–воздух, так как они очень малы по сравнению с излучательными потерями при высоких температурах.

Уравнение теплопроводности (2) с начальным и граничными условиями (4) позволяет определить пространственно-временное распределение температуры по объему образца.

Решение этой задачи в явном виде записано на языке FORTRAN и откомпилировано на персональном компьютере посредством компайлера Digital Visual Fortran, version 6.1. РТМ выдает результат счета в графическом и в табличном виде в разные моменты времени нагрева и для разных пространственных координат (цилиндрических) при работе в операционной системе Windows XP.

### 3. Теплофизические и оптические параметры, использованные в РТМ

Модельные эксперименты подготовлены и проведены с использованием исходных данных, соответствующих результатам экспериментов, и известных теплофизических характеристик УККМ (температурные зависимости тепло-

проводности вдоль и поперек, теплоемкости и среднеинтегрального коэффициента черноты). Предварительно неизвестные оптические характеристики материала образца были подобраны в процессе расчета.

Моделирование нагрева ЛИ образцов УККМ проводилось в соответствии с экспериментальными результатами измерения температуры на тыльной стороне образца с помощью вольфрам-рениевых термопар и показаниям пирометра FMP-1001, фиксировавшего температуру лицевой поверхности во время нагрева. Под температурой лицевой или тыльной стороны подразумевается температура в центре проекции лазерного пучка на эти поверхности.

Использованный в экспериментах высокотемпературный двухволновой микропирометр FMP-1001, изготовленный фирмой ООО «Вектор» (Москва), имеет диапазон измеряемых пирометром яркостных температур 850–5000 °С, инструментальную погрешность измерения яркостных температур на длинах волн 0.73 и 0.884 мкм не выше  $\pm 0.5\%$ , спектральную полосу пропускания 0.03 мкм, диаметр площадки визирования 1.5 мм, время измерения системы сбора данных по пяти каналам 20 мкс [3]. Использование в эксперименте пирометра с подобными параметрами позволяет в некоторых случаях анализировать возможные процессы на поверхности изучаемого образца — такие, как плавление, горение вещества, образование интерференционных пленок на поверхности или разрушение материала [1, 2].

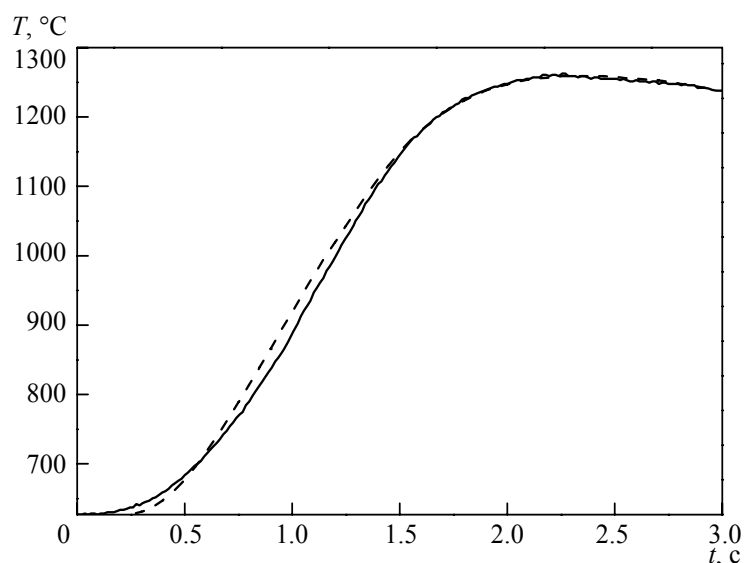
В каждом МЭ, соответствующем конкретному эксперименту, варьировались величины эффективного поглощения материала образцов в зависимости от температуры для наилучшего приближения к опытным данным (в соответствии с техническими условиями изготовления УККМ допустимы вариации как в составе, так и в физических свойствах этого материала). Кроме того, в каждом МЭ выбирались наиболее характерные точки образца для подробного описания температурных полей и градиентов в областях наибольших изменений температуры.

#### 4. Моделирование процессов нагрева УККМ и оценка эффектов экранировки факелом

Представляемый модельный эксперимент был выполнен при следующих условиях. Время лазерного воздействия, плотность мощности и радиус пятна лазерного излучения, а также начальная температура образца в МЭ совпадали с параметрами реального эксперимента ( $t = 1.05$  с,  $q_{\text{ср}} = 2730$  Вт/см<sup>2</sup>,  $r = 1.69$  см,  $T_0 = 600$  °С). Формы модельного импульса и лазерного импульса в реальном эксперименте показаны на рис. 3. Такая форма модельного импуль-

**Таблица 1.** Величина эффективного коэффициента поглощения  $A_{\text{эфф}}$  (подбор) в зависимости от температуры с учетом экранировки факелом лазерного излучения

| $T, ^\circ\text{C}$ | 600 | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 |
|---------------------|-----|------|------|------|------|
| $A_{\text{эфф}}$    | 0.4 | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.4  |



**Рис. 4.** Температура на тыльной поверхности в зависимости от времени в эксперименте (сплошная линия) и при расчете (штриховая линия) для значений эффективного коэффициента поглощения из табл. 1

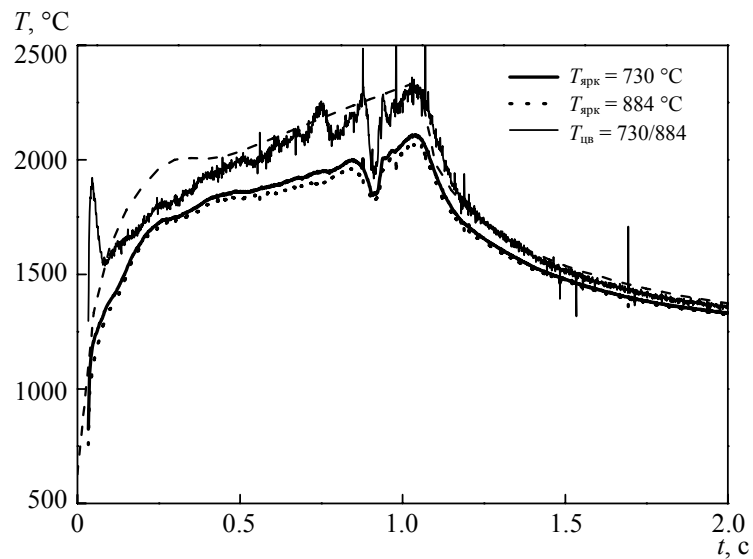
са достигается выбором показателя степени модельного супергауссового распределения (1)  $n = 10$ . Коэффициент поглощения  $A_{\text{эфф}}$  был подобран (см. табл. 1) так, чтобы температурная зависимость расчетной модели совпадала с экспериментальной зависимостью температуры тыльной поверхности образца от времени (рис. 4).

Заметим, что  $A_{\text{эфф}}$  — это НЕ коэффициент поглощения самого образца, а эффективный коэффициент поглощения в данном эксперименте, с учетом частично поглощенной в факеле лазерной энергии. Этот коэффициент показывает, какая часть лазерного излучения действительно поглощается образцом.

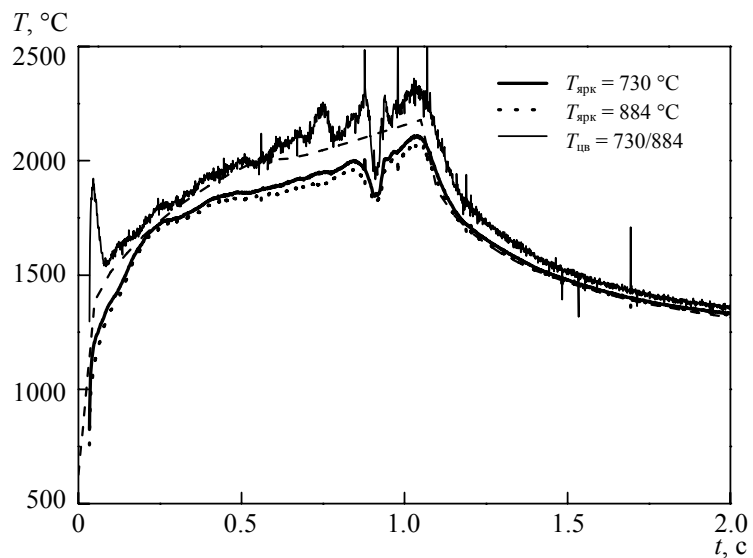
При совпадении экспериментальной и расчетной температурных зависимостей от времени на тыльной поверхности (рис. 4) зависимости  $T(t)$  на лицевой поверхности (эксперимент и расчет) выглядят, как показано на рис. 5.

В модельном эксперименте уменьшение коэффициента поглощения при температурах выше 2000 °C (см. табл. 2) приводит к хорошему совпадению расчетной температуры на лицевой поверхности с температурой реального эксперимента (рис. 6). Однако при этом поток тепла к тыльной поверхности становится недостаточным для достижения тех же температур, что и в эксперименте (рис. 7), поскольку температура на лицевой поверхности не достигает необходимых максимальных величин как расчетная температура на рис. 5.

Кажущееся противоречие можно объяснить тем, что образуемый над лицевой поверхностью факел не только ограничивает лучевой поток, падающий на образец (уменьшая эффективный коэффициент поглощения образца), но и уменьшает величину теплового излучения с поверхности, которое попадает в



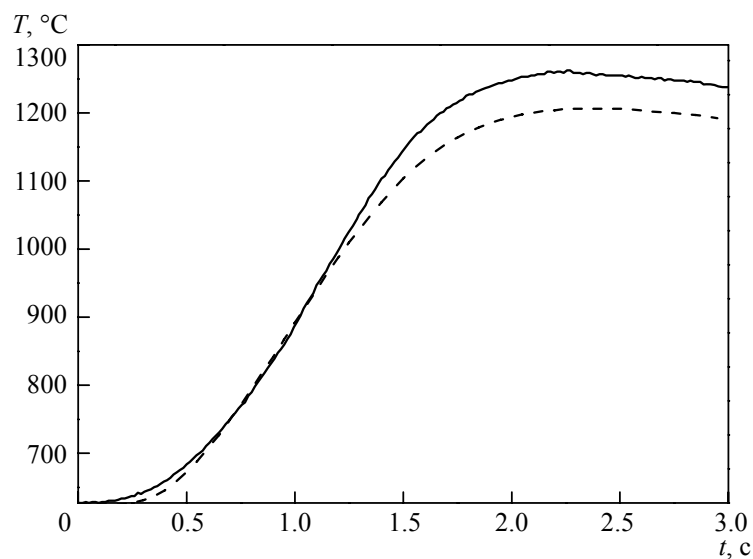
**Рис. 5.** Температура на лицевой поверхности в зависимости от времени в эксперименте (две яркостных и цветовая температуры) и при расчете (штриховая линия) для значений эффективного коэффициента поглощения из табл. 1



**Рис. 6.** Температура на лицевой поверхности в зависимости от времени в эксперименте (две яркостных и цветовая температуры) и при расчете (штриховая линия) для значений коэффициента поглощения из табл. 2

объектив пирометра. Поэтому пирометр фиксирует меньшую температуру, чем в действительности достигается на поверхности образца.

Подобным образом поставленный модельный эксперимент позволяет оценить величины реального коэффициента поглощения образца  $A$  в зависимости



**Рис. 7.** Температура на тыльной поверхности в зависимости от времени в эксперименте (сплошная линия) и при расчете (штриховая линия) для значений коэффициента поглощения из табл. 2

от температуры. Действительно, для того чтобы температура на лицевой поверхности соответствовала измеренной в эксперименте с помощью пирометра, эффективная величина коэффициента должна уменьшиться с 0.45 до 0.33 при температуре 2000 °С (см. табл. 1 и 2) и с 0.4 до 0.35 при температурах выше 2500 °С. Это значит, что тепловой поток с поверхности, проходя через часть факела по направлению к пирометру, уменьшается примерно в 1.4 раза при  $T = 2000$  °С и в 1.1 раза при  $T \geq 2500$  °С. Из этого следует, что и при прохождении через весь факел лазерный поток уменьшается не меньше чем в 1.4 раза при  $T = 2000$  °С (т.е.  $A \geq 0.61$ ) или в 1.1 раза при  $T = 2500$  °С (т.е.  $A \geq 0.46$ ).

Полученные оценки реального коэффициента поглощения образца  $A$  в зависимости от температуры представлены в табл. 3.

**Таблица 2.** Величины коэффициента поглощения  $A'$  (подбор) в зависимости от температуры для иллюстрации экранировки факелом как лазерного излучения, так и теплового потока по направлению от поверхности к пирометру

| $T, ^\circ\text{C}$ | 600 | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 |
|---------------------|-----|------|------|------|------|
| $A'$                | 0.4 | 0.45 | 0.45 | 0.33 | 0.35 |

**Таблица 3.** Оценки величин реального коэффициента поглощения образца в зависимости от температуры

| $T, ^\circ\text{C}$ | 600 | 1000 | 1500 | 2000        | 2500        |
|---------------------|-----|------|------|-------------|-------------|
| $A$                 | 0.4 | 0.45 | 0.45 | $\geq 0.61$ | $\geq 0.46$ |



Стоит отметить, что экспериментальные погрешности, в свою очередь, влияют на точность моделирования.

Погрешность термопар при достижении максимальной температуры тыльной поверхности могла достигать +5 % из-за инерционности и из-за заделки термопар (недостаточного контакта и отвода тепла прижимным устройством). Наличие такой погрешности задает нижнюю границу коэффициента поглощения материала. Более точно нижнюю границу величины коэффициента поглощения в таком случае можно определить только при известной погрешности конкретных термопарных измерений.

Верхнюю границу оценки коэффициента поглощения УККМ определяет форма факела и расположение окна пирометра, в которое попадает ограниченное конусом визирования тепловое излучение образца, прошедшее через часть факела. В данной статье учет вызванной расположением пирометра погрешности не приводится из-за недостатка эмпирических данных.

Если принять за 100 % весь лазерный поток, падающий на поверхность образца, то уменьшение его в 1.4 раз дает примерно 30 % потерь в эрозионном факеле при температурах 2000 °C и выше. Кстати, стоит заметить, что приведенные выше оценки получены при условии полного совпадения рассчитанной температуры тыльной поверхности и показаний термопар, т.е. без учета погрешности термопар. При ее учете действительная температура тыльной стороны будет выше измеренной, а это значит, что и температура лицевой стороны выше, т.е. экранировка факела будет превышать 30 %.

Экранировка факелом около 30 % лазерного излучения происходит в течение примерно 0.5 с, когда температура поверхности достигает 2000 °C и выше. Таким образом, в факеле теряется около  $25 \text{ кВт} \cdot 0.5 \text{ с} \cdot 0.3 = 3.75 \text{ кДж}$ , т.е. от всей энергии лазерного импульса в факеле теряется примерно 15 % (или больше).

При анализе поверхности образца после лазерного воздействия было обнаружено, что в первую очередь удаляется кремний, являющейся составной частью композитного материала. Кремний и его оксиды имеют наименьшую из основных компонентов температуру плавления и испарения [4–6]. Энергозатраты, соответствующие удаленной массе, равны 29 кДж/г, что практически точно соответствует энергии ионизации кремния (первый электрон) — 28 кДж/г. Энергия диссоциации оксидов кремния оказывается меньше этой величины (около 8 кДж/г для  $\text{SiO}_2$  и 18 кДж/г для  $\text{SiO}$ ). Это позволяет предположить, что при горении продуктов абляции может происходить ионизация атомов в факеле.

## 5. Заключение

Таким образом, в нашей работе:

- проведено численное моделирование нагрева образцов углерод-карбидокремниевый композиционный материал непрерывным лазерным излуче-

нием с плотностью мощности около  $3 \text{ кВт/см}^2$  и длительностью импульса около 1 с;

- определена температурная зависимость эффективного коэффициента поглощения (т.е. той части лазерного излучения, которая действительно поглотилась образцом) с учетом потерь в факеле;
- показано, что образуемый над лицевой поверхностью факел не только значительно ограничивает поток лазерного излучения, падающего на образец (уменьшая эффективный коэффициент поглощения образца), но и уменьшает величину теплового излучения с поверхности, которое попадает в объектив пирометра (и пирометр фиксирует более низкую температуру, чем в действительности достигается на поверхности образца);
- оценены величины реального коэффициента поглощения образца в зависимости от температуры;
- показано, что экранировка лазерного излучения эрозионным факелом может составлять примерно 30 % (и даже превышать этот уровень) при температурах  $2000^\circ\text{C}$  и выше;
- по результатам модельного эксперимента показано, что удельная величина потерь лазерного излучения в факеле превышает уровень, при котором возможна ионизация атомов при горении продуктов абляции.

## ABSTRACT

Under laser action ( $I = 3 \text{ kW/cm}^2$ ,  $t = 1 \text{ s}$ ) on carbon silicon carbide composite material (CSCCM) in air at normal pressure, the surface of the sample have been heating up to temperature above  $2000^\circ\text{C}$  and higher and ablation products have been burning. A plume over a surface of the sample did not allow one to define optical properties of the material with enough precision. Moreover, degree of influence of the plume on heating and ablation of the sample remained to be not clear.

In the article, results of numerical modeling of the sample temperature fields by means of the KARAT code and their comparison with experimental time dependences of temperatures, received with thermocouple measurements (on the back side of the sample) and with a pyrometer indications (on the surface) are presented.

The modeling of laser heating process allowed us to define effective absorptivity of the sample taking into account a part of energy absorbed in the plume, to estimate absorptivity of the material without losses in the plume and to estimate also energy losses in the plume.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Царькова О.Г. Оптические и теплофизические свойства металлов, керамик и алмазных пленок при высокотемпературном лазерном нагреве // Действие лазерного излучения на поглощающие среды / Под ред. С.В. Гарнова, А.А. Самохина. М.: Наука, 2004. С. 30–82 (Труды ИОФАН; Т. 60).

2. *Tsarkova O.G.* Optical and thermal properties of metals, ceramics, and CVD diamond films upon high-temperature laser heating // *Phys. Wave Phenom.* 2007. Vol. 15, N 1. P. 12–45.
3. Высокотемпературный двухволновый микропирометр FMP-1001. Техническое описание. М.: ООО «Вектор», 2009; Сертификат о калибровке средства измерений № К-20/10. М.: ФГУП ВНИИОФИ, 2010.
4. Химическая энциклопедия / Под ред. И.Л. Кнунянца. Т. 2. М.: Советская энциклопедия, 1990. С. 508.
5. *Самсонов Г.В.* Силициды и их использование в технике. Киев: Изд-во АН УССР, 1959.
6. *Wolf H.F.* Silicon Semiconductor Data. Oxford–N.Y.: Pergamon Press, 1969.