

РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ СТЕКЛОПЛАСТИКА НА ТЕРМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕРИАЛА

Приведена физико-математическая постановка комплексной задачи о двумерном нестационарном прогреве и разложении стеклопластика под воздействием высокотемпературного термохимического разрушения, вызванного интенсивным лазерным нагревом. Проведены исследования зависимости степени повреждения материала в окрестности поверхности раскроя, наблюдаемого в процессе лазерной резки стеклопластика, от линейной скорости резки.

E-mail: resch883@rambler.ru

Ключевые слова: лазерная резка, стеклопластик, нестационарный прогрев, термохимическое разрушение.

Под стеклопластиком понимают композиционный материал, состоящий из диоксида кремния и органического связующего. Одна из основных проблем лазерной резки материалов такого типа состоит в обеспечении ровной поверхности раскроя. Дело в том, что большинство органических связующих, входящих в состав стеклопластиков, обладают низкой термической стойкостью, т. е. они разлагаются при достаточно низких значениях температуры (600...1 000 К), а температура разрушения материала, определяемая его высокотемпературными компонентами (двуоксидом кремния и коксовым остатком от пиролиза связующего), обычно превышает 2 500 К. В связи с этим в процессе лазерной резки вдоль поверхности раскроя стеклопластика движется высокотемпературная волна, которая может вызвать недопустимое изменение плотности в слоях материала, прилегающих к этой поверхности.

Естественно, что при достаточно большой скорости движения указанной волны (т. е. при достаточно большой скорости резки материала, а значит, и удельной плотности лазерного излучения) можно добиться выполнения заданных требований по качеству резки стеклопластиков. Однако с технической и экономической точек зрения эту задачу желательно получить при минимальной удельной плотности лазерного излучения. А это диктует необходимость проведения соответствующих расчетно-теоретических и экспериментальных исследований. Решению первой из указанных задач и посвящена настоящая работа.

Физико-математическая постановка задачи. Примем, что объектом исследования является изготовленное из стеклопластика цилиндрическое тело, радиус и высота которого равны R и H соответственно. В центре одно из торцов этого цилиндра (назовем его верхним торцом) на части его поверхности (стенке), ограниченной окружностью радиусом R_L , на материал действует равномерно распределенное высокоинтенсивное лазерное излучение в направлении оси тела. При этом происходит квазистационарное разрушение стеклопластика по всей площади воздействия лазерного излучения, т. е. перемещение поверхности, на которую действует лазерное излучение, с постоянными скоростью и распределением температуры в направлении оси цилиндра, отсчитываемом от поверхности разрушения материала. После образования в цилиндре сквозного отверстия допускается продувка через него холодного газа для уменьшения степени повреждения материала за счет распространения в нем высокотемпературной волны.

Сформулированная постановка задачи описывается следующей системой уравнений [1, 2]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_{\text{нач}} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right], \quad z \in (0, H), \quad r \in (R_L, R), \quad \tau \in (0, \tau_{\text{кон}}], \quad (1)$$

$$T(z, r, \tau) = T_{\text{нач}} = \text{const}, \quad z \in [0, H], \quad r \in [R_L, R], \quad \tau = 0,$$

$$-\lambda_{\text{нач}} \frac{\partial T}{\partial r}(z, r, \tau) = A_c (T_{\Gamma} - T), \quad z \in [0, z^*), \quad r = R_L, \quad \tau \in [0, \tau_{\text{кон}}],$$

$$T(z, r, \tau) = T_{\text{нач}} + (T_{\text{абл}} - T_{\text{нач}}) \exp\left(-v_p \frac{z - z^*}{a_w}\right), \quad z \in [z^*, H],$$

$$r = R_L, \quad \tau \in [0, \tau_{\text{кон}}], \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r}(z, r, \tau) = 0, \quad z \in [0, H], \quad r = R, \quad \tau \in [0, \tau_{\text{кон}}],$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(z, r, \tau) = 0, \quad z = 0, \quad r \in (R_L, R), \quad \tau \in [0, \tau_{\text{кон}}],$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(z, r, \tau) = 0, \quad z = H, \quad r \in (R_L, R), \quad \tau \in [0, \tau_{\text{кон}}],$$

$$a_{\text{нач}} = \frac{\lambda_{\text{нач}}}{c_{\text{нач}} \rho_{\text{нач}}}, \quad a_w = \frac{\lambda_w}{c_m \rho_{\text{нач}}}, \quad z^* = v_p \tau.$$

Здесь T — температура материала, К; τ — временная координата, с; $a_{\text{нач}}$ — коэффициент температуропроводности исходного материала, $\text{м}^2/\text{с}$; z, r — координаты цилиндрической системы, начало которой расположено в точке пересечения оси цилиндра с поверхностью верхнего торца, ось z направлена вдоль оси цилиндра в сторону нижнего торца тела, а ось r — по нормали к ней, м; $T_{\text{нач}}$ — начальная температура материала, К; $\lambda_{\text{нач}}$ — начальный коэффициент теплопроводности исходного материала, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $A_{\text{конв}}$ — коэффициент конвективного теплообмена, равный нулю в процессе образования отверстия в материале и равный его заданному значению с того момента времени, когда отверстие оказывается сплошным, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $T_{\text{г}}$ — температура охлаждающего газа; $T_{\text{абл}}$ — температура абляции материала, реализуемая на поверхности реза; $c_{\text{нач}}$ — начальная удельная теплоемкость исходного материала, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\rho_{\text{нач}}$ — начальная плотность исходного материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; $v_{\text{р}}$ — скорость резки, $\text{м}/\text{с}$; z^* — текущее значение координаты z , соответствующее положению поверхности реза; $[0, \tau_{\text{кон}}]$ — область определения по временной координате; a_{w} — коэффициент температуропроводности материала, $\text{м}^2/\text{с}$, рассчитанный по его теплопроводности λ_{w} при температуре абляции и среднеинтегральной удельной теплоемкости c_m .

В такой постановке задачи пренебрегается зависимостями свойств материала от температуры и степени разложения материала, а также поглощением теплоты, обусловленным разложением материала и движением образовавшихся при этом коксовых газов.

С учетом этого профиль температур, записанный в форме (2), является решением квазистационарной задачи вида

$$-c_m \rho_{\text{нач}} v_{\text{р}} \frac{dT}{d(z-z^*)} = \lambda_{\text{w}} \frac{d^2 T}{[d(z-z^*)]^2}, \quad z \in (z^*, \infty), \quad r \in [0, R_L],$$

$$T(z-z^*, r) = T_{\text{абл}}, \quad z = z^*, \quad r \in [0, R_L],$$

$$T(z-z^*, r) = T_{\text{нач}}, \quad z = \infty, \quad r \in [0, R_L],$$

$$-\lambda_{\text{w}} \frac{dT}{d(z-z^*)}(z-z^*, r) = c_m \rho_{\text{нач}} v_{\text{р}} (T_{\text{абл}} - T_{\text{нач}}), \quad z = z^*, \quad r \in [0, R_L].$$

Процесс разложения материала рассмотрим в кинетической постановке, записанной в форме [3]:

$$\frac{d\rho}{d\tau} = -(\rho - \rho_{\text{lim}})K_d \exp\left(-\frac{E_d}{R_{\text{un}}T}\right), \quad z \in [0, H], \quad r \in [R_L, R], \quad \tau \in (0, \tau_{\text{кон}}], \quad (3)$$

$$\rho(z, r, \tau) = \rho_{\text{нач}}, \quad z \in [0, H], \quad r \in [R_L, R], \quad \tau = 0. \quad (4)$$

Здесь ρ — текущая плотность материала; ρ_{lim} — плотность материала в состоянии предельного разложения; K_d — предэкспоненциальный множитель, с^{-1} ; E_d — энергия активации, Дж/кмоль; R_{un} — универсальная газовая постоянная, $R_{\text{un}} = 8314,36$ Дж/(кмоль·К).

При температуре, не превышающей некоторое заданное значение $T_{\text{min},d}$, скорость изменения плотности материала полагается равной нулю. Скорость резки и температура разрушения материала, реализующаяся на поверхности реза, определяются решением системы дифференциальных уравнений, которая представляет собой частный случай опубликованной в работе [4] постановки задачи о квазистационарной абляции стеклопластика, обтекаемого высокоскоростным и (или) высокотемпературным газовым потоком.

Массовое содержание в материале механической смеси диоксида кремния и органического связующего равно φ_{SiO_2} и $\varphi_{\text{св}}$. В свою очередь, элементарный химический состав связующего задается массовыми долями $V_{j\text{св}}$, занимаемыми в нем химическими элементами О, Н, С. Поскольку в рамках рассматриваемой задачи отсутствуют сдвигающие силы, действующие на расплав диоксида кремния со стороны набегающего на материал газового потока, унос массы диоксида кремния в жидкой фазе и механический унос массы конденсированного углерода в пленке расплава диоксида кремния не учитываются.

Исследуемый процесс рассмотрим в одномерной квазистационарной постановке. При этом следует учитывать следующие физико-химические превращения в материале:

деструкцию связующего (принимается, что она протекает при заданной температуре T_d с образованием коксового остатка и газовой фазы, химический состав которой ограничен оксидом углерода и молекулярным водородом);

гетерогенное химическое взаимодействие между коксовым остатком от пиролиза связующего и диоксидом кремния (этот процесс в кинетической постановке задачи сопровождается образованием оксидов кремния и углерода);

сублимация диоксида кремния на стенке (скорость протекания этого процесса описывается формулой Ленгмюра—Кнудсена);

окисление конденсированного углерода и коксовых газов на стенке кислородом внешней среды и кислородом, образующимся при диссоциации испарившихся молекул диоксида кремния;

химические реакции в пограничном слое на стенке (с учетом допущения о том, что стенка является абсолютно каталитической);

диффузионный массоперенос компонентов газовой смеси в пограничном слое, базирующийся на использовании аналогии с протекающим в нем процессом теплообмена.

В соответствии с работой [4] при такой постановке задача описывается следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dG_k}{d(z-z^{**})} = \omega_r \xi_k, \quad k = \overline{1,5}, \quad z \in (z^*, z^{**}), \quad (5)$$

$$-\left(\sum_{k=1}^5 c_k G_k \right) \frac{dT}{d(z-z^{**})} = \frac{d}{d(z-z^{**})} \left[\lambda \frac{dT}{d(z-z^{**})} \right] - \omega_r \Delta Q_r, \quad z \in (z^*, z^{**}), \quad (6)$$

$$G_1(z^{**}) = -G_{\text{абл}} \varphi_{\text{SiO}_2}, \quad (7)$$

$$G_2(z^{**}) = -G_{\text{абл}} \varphi_{\text{CB}} \left(\nu_{\text{C CB}} - \nu_{\text{O CB}} \frac{M_{\text{C}}}{M_{\text{O}}} \right), \quad (8)$$

$$G_3(z^{**}) = 0, \quad (9)$$

$$G_4(z^{**}) = -G_{\text{абл}} \varphi_{\text{CB}} \nu_{\text{O CB}} \frac{M_{\text{CO}}}{M_{\text{O}}}, \quad (10)$$

$$G_5(z^{**}) = -G_{\text{абл}} \varphi_{\text{CB}} \nu_{\text{H CB}}, \quad (11)$$

$$T(z^{**}) = T_d, \quad (12)$$

$$-\lambda \frac{dT}{d(z-z^{**})} \Big|_{z=z^{**}} = G_{\text{абл}} \left[c_{\text{нач}} (T_d - T_{\text{нач}}) + \Delta Q_d \right], \quad (13)$$

$$\xi_1 = -\frac{M_{\text{SiO}_2}}{M_{\text{C}}}, \quad \xi_2 = -1, \quad \xi_3 = \frac{M_{\text{SiO}}}{M_{\text{C}}}, \quad \xi_4 = \frac{M_{\text{CO}}}{M_{\text{C}}}, \quad \xi_5 = 0,$$

$$G_1(z^*) = -a_{\text{ак}} \varphi_{\text{SiO}_2} \frac{P_{\text{SiO}_2}^* - P_{\text{SiO}_2}}{\sqrt{2\pi R_{\text{ун}} T / M_{\text{SiO}_2}}}, \quad (14)$$

$$(A_h + G_{\text{абл}}) \sum_i^{47} C_i \nu_{ji} = A_h C_{je}^+ + \sum_{k=1}^5 G_k \nu_{jk}, \quad j = \overline{1, 5}, \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{48} C_i = 1, \quad (16)$$

$$p_i = \frac{\prod_{j=1}^5 p_j^{n_{ji}}}{k_{\text{eq}i}}(T), \quad i = \overline{6, 47}, \quad (17)$$

$$C_i = \frac{p_i M_i}{p_e M_{\Sigma}}, \quad i = \overline{1, 48}, \quad (18)$$

$$M_{\Sigma} = \left(\sum_{i=1}^{48} \frac{C_i}{M_i} \right)^{-1}, \quad (19)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial(z - z^{**})} \Big|_{z=z^*} = A_h (h_{\text{в}} - h_{\Sigma}) + q_L - \sum_{k=1}^5 G_k h_k - G_{\text{абл}} h_{\Sigma} - \varepsilon \sigma T^4, \quad (20)$$

$$h_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{48} C_i h_i^{-1}.$$

Здесь G_k — проекция массовой скорости движения k -й компоненты материала на ось z , кг/(м²·с); z^{**} — значение координаты z , в которой расположен фронт разложения связующего; ω_r , ΔQ_r — массовая скорость гетерогенного химического окисления углерода диоксидом кремния, кг/(м³·с), и тепловой эффект этой реакции, Дж/кг; $G_{\text{абл}}$ — массовая скорость абляции материала, кг/(м²·с); M_i , M_{Σ} — молярная масса i -го вещества и смеси соответственно, кг/кмоль; c_k — удельная теплоемкость k -й компоненты материала (для газовой компоненты — удельная изобарная теплоемкость), Дж/(кг·К); $c_{\text{нач}}$ — начальная удельная теплоемкость; ΔQ_f — тепловой эффект деструкции связующего; $a_{\text{ак}}$ — коэффициент аккомодации стенки по отношению к молекулам диоксида кремния; p_e , p_i^* — давление на

внешней границе пограничного слоя и насыщенного пара вещества на стенке, Па; p_i — парциальное давление i -го вещества на стенке; C_i — массовая концентрация i -го вещества в смеси на стенке; C_{je}^+ — массовая концентрация j -го химического элемента в смеси на внешней границе пограничного слоя; n_{ji} — число атомов j -го химического элемента в i -м веществе; $k_{\text{равн}i}$ — константа равновесия образования i -го молекулярного вещества из атомов, Па; A_h — коэффициент конвективного теплообмена, кг/(м²·с); $h_{\text{в}}$ — энтальпия воздуха, Дж/кг; q_L — удельный тепловой поток лазерного излучения, идущий на нагрев и разрушение материала, Вт/м²; h_i — энтальпия i -го вещества; ε — степень черноты стенки; σ — константа Стефана — Больцмана, Вт/(м²·К⁴).

Индексом $k=1—5$ обозначены компоненты материала $\text{SiO}_2^{(к)}$, $\text{C}^{(к)}$, $\text{SiO}^{(г)}$, $\text{CO}^{(г)}$, $\text{H}_2^{(г)}$. При этом индексы (к) и (г) означают конденсированную и газовую фазы вещества соответственно.

При расчете состава газовой фазы на стенке учитывается возможность наличия 47 веществ, образованных из кислорода, водорода, азота, углерода, кремния и аргона (последнему присваивают номер 48). В списке этих веществ первые пять мест занимают атомарные компоненты.

Скорость гетерогенного окисления углерода диоксидом кремния во внутренних слоях материала [1]

$$\omega_r = -\frac{G_2}{G_{\text{абл}}} \rho_{\text{нач}} \exp\left(15,477 - \frac{34720}{T}\right).$$

Коэффициент теплообмена A_h связан с коэффициентом $A_{hн}$ на непроницаемой стенке формулой вида [2]

$$A_h = \frac{A_{hн}}{3\left(G_{\text{абл}} / A_{hн}\right)^2 + G_{\text{абл}} / A_{hн} + 1}.$$

При заданной массовой скорости абляции материала системы уравнений (5), (6) с граничными условиями (7)—(13) может рассматриваться как задача Коши с неизвестным положением границы области интегрирования по координате z , которое определяется в процессе интегрирования этой системы уравнений из условия удовлетворения граничным условиям на стенке, записанным в форме

(14)—(19). В свою очередь, удельный тепловой поток q_L , вызывающий заданную скорость абляции, однозначно определяется из уравнения баланса теплоты на стенке (20), а скорость резки материала лазерным излучением рассчитывается по формуле

$$v_p = \frac{G_{\text{абл}}}{\rho_{\text{нач}}}.$$

Решение уравнения Фурье (1) ищется методом переменных направлений [5], а изменение плотности материала в каждом узле сетки находится из решения задачи Коши, записанной в форме уравнения (3) с граничным условием (4).

Анализ зависимости потери плотности материала от скорости его лазерной резки. Исследование зависимости степени повреждения стеклопластика проиллюстрируем на примере лазерной резки стеклопластика, характеризующегося следующими химическим составом и свойствами:

$$\varphi_{\text{SiO}_2} = 0,5, \quad \varphi_{\text{СВ}} = 0,5, \quad \nu_{\text{OСВ}} = 0,20, \quad \nu_{\text{HСВ}} = 0,05, \quad \nu_{\text{HСВ}} = 0,75,$$

$$\lambda_{\text{нач}} = 0,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}, \quad c_{\text{нач}} = 1 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}, \quad \rho_{\text{нач}} = 1500 \text{ кг/м}^3,$$

$$\rho_{\text{lim}} = 0,85\rho_{\text{нач}}, \quad K_d = 8 \text{ с}^{-1}, \quad E_d = 2 \text{ 900 Дж/кмоль}, \quad T_{\text{mind}} = 400 \text{ К},$$

$$T_d = 700 \text{ К}, \quad \Delta Q_d = 1,27 \text{ МДж/кг}, \quad T_{\text{нач}} = 300 \text{ К}, \quad a_{\text{ак}} = 1.$$

Все термодинамические свойства индивидуальных веществ соответствуют данным работы [6], а элементарный химический состав воздуха принят таким же, как и в работе [7], т. е.

$$C_{\text{Oe}} = 0,23144, \quad C_{\text{Ne}} = 0,75520, \quad C_{\text{Are}} = 0,014336.$$

Давление на внешней границе пограничного слоя принято равным 1 атм, коэффициент теплообмена на непроницаемой стенке — 25 кг/(м²·ч), а коэффициент вдува — 0,6.

На рис. 1 приведен график зависимости температуры на поверхности прожигаемого отверстия от координаты Z и времени τ , а на рис. 2 — зависимость толщины поврежденного слоя материала от времени и степени повреждения разлагающейся части материала. Под степенью повреждения материала здесь понимают величину, рассчитанную по следующей формуле:

$$\eta = \frac{\rho - \rho_{\text{lim}}}{\rho_{\text{нач}} - \rho_{\text{lim}}}.$$

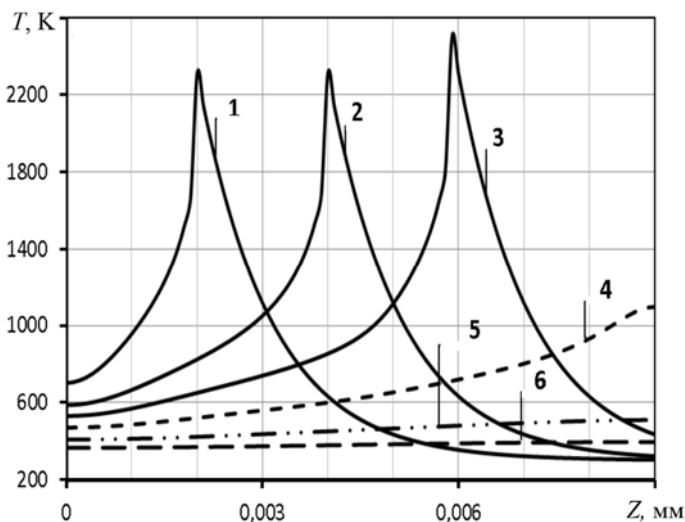


Рис. 1. Зависимость температуры T на поверхности прожигаемого отверстия от координаты Z и времени τ , с:

2(1), 4(2), 6(3), 10(4), 20(5), 40(6)

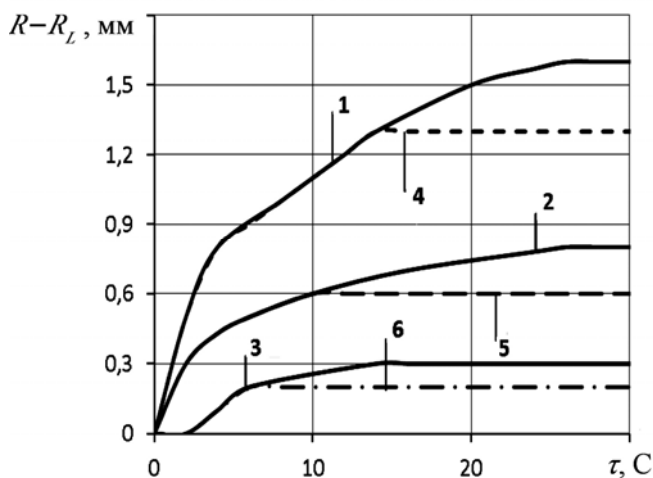


Рис. 2. Зависимость толщины $R - R_L$ поврежденного слоя материала от времени τ и степени повреждения η разлагающейся части материала:

$A_{\text{конв}} = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\eta = 0,1$ (1); $A_{\text{конв}} = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\eta = 0,5$ (2); $A_{\text{конв}} = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\eta = 0,9$ (3); $A_{\text{конв}} = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\eta = 0,1$ (4); $A_{\text{конв}} = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\eta = 0,5$ (5); $A_{\text{конв}} = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\eta = 0,9$ (6)

Приведенные данные соответствуют скорости резки, равной 1 мм/с, сквозное отверстие образуется за 9 с, после чего допускается охлаждение поверхности этого отверстия холодным газом, продуваемым через него.

Как следует из анализа представленных в работе данных, несмотря на то, что на поверхности отверстия в процессе его образования

температура превышает 2 200 К, заметное повреждение материала ($\eta > 0,5$) наблюдается на глубине не более 0,8 мм, что во многих случаях является допустимым.

Для снижения указанной степени повреждения материала необходимо увеличивать скорость резки. Охлаждение материала за счет продувки через отверстие холодного газа (см. рис. 2) в определенной степени позволяет уменьшить глубину повреждения материала.

Таким образом, предложена физико-математическая постановка задачи и метод решения сопряженной задачи о нагреве, прогреве, разложении и термохимическом разрушении стеклопластика в процессе его лазерной резки. Установлено, что в рассмотренных типичных условиях лазерной резки при скоростях протекания этого процесса порядка 1 мм/с на удалении от поверхности реза, превышающем 0,5 мм, степень разложения связующего в материала не превышает 0,5.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-01-00841а) и ФЦП «Научные и педагогические кадры инновационной России на 2009—2013 годы» (Государственный контракт № 14.740.11.0140 от 13 сентября 2010 года, шифр «2010-1.1-405.102-006»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967.
2. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976.
3. Бичер Н., Розенсвейг Р. Е. Механизм абляции пластмасс с неорганическим армированием // Ракетная техника и космонавтика, 1961. Т. 1. № 4. С. 80–91.
4. Горский В. В., Носатенко П. Я. Математическое моделирование процессов тепло- и массообмена при азротермохимическом разрушении композиционных теплозащитных материалов на кремнеземной основе. М.: Научный мир, 2008.
5. Беляев Н. М., Рядно Ф. А. Методы теории теплопроводности. М.: Высш. шк., 1982.
6. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Л.В. Гурвич, Г.А. Хачкурузов, В.А. Медведев и др. М.: Изд. АН СССР, 1962. Т. 2.
7. Таблицы термодинамических свойств воздуха: Для температур от 200 до 6 000 К и давлений от 0,00001 до 100 атмосфер / А.С. Предводителев, Е.В. Ступоченко, Е.В. Самуйлов и др.; Под ред. А.С. Предводителева. М.: Вычислительный центр АН СССР, 1962.

Статья поступила в редакцию 03.07.2012.