

## О ВОЗДЕЙСТВИИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ НА КОМПОЗИЦИОННОЕ ТЕПЛОЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ С ПОВЕРХНОСТНЫМ ПОГЛОЩЕНИЕМ ЭНЕРГИИ

д.т.н., проф. И.М. Приходько, В.А. Дуреев, А.Л. Винник

Рассматривается воздействие непрерывного лазерного излучения на композиционное теплозащитное покрытие: поверхностное поглощение излучения, модель теплового источника, температурное поле в материале при стационарном режиме испарения, механизм лазерного разрушения композиционного теплозащитного покрытия.

Воздействие лазерного излучения (ЛИ) на композиционное теплозащитное покрытие (КТЗП) характеризуется целым рядом особенностей, основные из которых рассмотрены в [3,4]. В [4] рассматривалось воздействие ЛИ высокой интенсивности на КТЗП, когда выполнялось условие  $\alpha^{-1} \gg \sqrt{a\tau}$ , т.е., когда излучение проникает на значительную глубину, где  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\tau$  – время воздействия. Тогда роль теплопроводности оказывалась несущественной, а основным фактором, определяющим тепловое состояние материала, являлась глубина проникновения излучения в материал.

Для материалов с большим показателем поглощения и для которых выполняется условие  $\alpha^{-1} \ll \sqrt{a\tau}$ , тепловой источник можно считать поверхностным [3]. В этом случае распределение тепла в материале по координате и во времени определяется теплопроводностью. Так как при воздействии ЛИ на КТЗП выполняется условие  $r_0 \gg \alpha$ , где  $r_0$  – радиус лазерного пятна [3], то рассматриваемая задача является одномерной. Математическая формулировка такой задачи имеет вид [2]:

$$\frac{dT(x, \tau)}{d\tau} = a \frac{d^2T(x, \tau)}{dx^2}(\tau); \quad 0 < x < \infty; \quad (1)$$

$$\lambda_T \frac{dT(0, \tau)}{dx} + q_0 = 0; \quad \frac{dT(\infty, \tau)}{dx} = 0; \quad (2)$$

$$T(\infty, \tau) = T_0; \quad T(x, 0) = T_0 = \text{const},$$

где  $q_0 = A I_0$  – тепловой поток (ТП) к поверхности;  $A$  – поглощательная способность материала;  $I_0$  – плотность ТП;  $\tau$  – время воздействия ТП на материал;  $x$  – координата;  $T$  – текущая температура;  $T_0$  – начальная температура

материала;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности.

Решение задачи (1 - 2) имеет вид [4]:

$$T(z, \tau) = T_0 + \frac{2q_0}{\lambda_T} \sqrt{a\tau} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}. \quad (3)$$

Решение (3) описывает распределение температуры по координате и времени для модели распределенного поверхностного источника до достижения температуры поверхности материала температуры испарения  $T_s$ , т.е.  $T(0, \tau) = T_s$ . Температура на поверхности материала

$$T(0, \tau) = T_0 + \frac{2q_0}{\lambda_T} \sqrt{\frac{a\tau}{\pi}}. \quad (4)$$

Из (4) определим время  $\tau_s$ , при котором температура поверхности достигнет  $T_s$ :

$$\tau_s = \frac{(T_s - T_0)^2 \lambda_T^2 \pi}{4q_0^2 a}. \quad (5)$$

В дальнейшем при  $\tau > \tau_s$  начинается движение волны испарения вглубь материала. Скорость  $V_s$  волны испарения можно найти из уравнения теплового баланса при испарении [4]:

$$\rho dz [c(T_s - T_0) + Q_s] = A I_0 d\tau; \quad (6)$$

$$V_s = \frac{A I_0}{\rho [c(T_s - T_0) + Q_s]}, \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность материала;  $c$  – теплоемкость материала;  $Q_s$  – скрытая теплота испарения.

ЛИ, поглощаемое в начальный момент в тонком поверхностном слое, является источником тепловой волны, распространяющейся вглубь тела со скоростью  $V_T$  [1]:

$$V_T = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{a}{\tau}}. \quad (8)$$

Из условия равенства скоростей тепловой волны и волны испарения ( $V_T = V_s$ ), находим  $\tau^*$ :

$$\tau^* = \frac{a}{4V_s^2}. \quad (9)$$

При  $\tau > \tau^*$  наступает режим форсированного испарения (ФИ) [3,4]. В этом режиме затраты энергии излучения связаны, в основном, с продвижением вглубь тела волны испарения, а потери энергии на теплопроводность невелики [1,3,4]. Энергия, поглощаемая при испарении равна разности тепловых потоков [5]:

$$V_s \rho Q_s = q_1 - q_2, \quad (10)$$

где  $V_s$  – линейная скорость абляции;  $q_1$  – поток, подведенный к поверхности;  $q_2$  – поток, отведенный вглубь материала теплопроводностью.

При этом не учитывается поглощение тепла во внутренних слоях покрытия при реакциях разложения, стимулируемых повышением температуры.

Кроме процессов испарения при воздействии ЛИ на поверхности материала протекают и другие процессы: пиролиз, химические реакции разложения и др., т. е. протекает процесс абляции. Процесс абляции протекает непосредственно на поверхности раздела фаз в слое, толщиной которого при изучении распределения температуры в покрытии можно пренебречь. При ФИ и постоянном тепловом потоке  $V_s = \text{const}$ . Введем подвижную систему координат, перемещающуюся вглубь покрытия со скоростью абляции  $V_s$ . Связь ее с неподвижной системой координат определится зависимостями [5]:

$$\xi = x - V_s \tau; \quad \frac{d\xi}{dx} = 1; \quad \frac{d\xi}{d\tau} = -V_s, \quad (11)$$

где  $\xi$  – координата подвижной системы координат.

При этом уравнение температурного поля перед фронтом абляции имеет вид [5]:

$$T = T_0 + (T_s - T_0) e^{-\frac{\xi}{\delta_T}}, \quad (12)$$

$$\text{где} \quad \xi = \frac{\lambda_T}{\rho V_s c}. \quad (13)$$

Толщина  $h_s$  унесенного слоя покрытия определяется по формуле

$$h_s = (\tau_{\text{возд}} - \tau_s) V_s. \quad (14)$$

где  $\tau_{\text{возд}}$  – время воздействия ЛИ на материал.

Минимально необходимая толщина  $h$  аблирующего покрытия, определяется как сумма унесенного слоя  $h_s$  и остаточного слоя  $h_{\text{ост}}$ , при котором температура  $T_{\text{пред}}$  на границе с защищаемой конструкцией становится предельно допустимой

$$h = h_s + h_{\text{ост}}, \quad (15)$$

$$\text{где} \quad h_{\text{ост}} = \frac{a}{V_s} \ln \left( \frac{T_s - T_0}{T_{\text{пред}} - T_0} \right). \quad (16)$$

Принимая  $T_{\text{пред}} = T_0 + 200$ , определяем толщину прогретого слоя.

Пример расчета. Рассмотрим воздействие ЛИ с  $I_0 = 10^8$  (Вт/м<sup>2</sup>) в течении  $\tau_{\text{возд}} = 3$  (с) на КТЗП характеристики которого:  $\lambda_T = 0.8$  (Вт/мК),  $a = 2 \cdot 10^{-7}$  (м<sup>2</sup>/с),  $c = 2667$  (Дж/кгК),  $T_s = 1870$  (К),  $Q_s = 3.2 \cdot 10^6$  (Дж/кг),

$h = 5 \cdot 10^{-2}$  (м),  $\rho = 1500$  (кг/м<sup>3</sup>),  $A = 1$ ,  $\alpha = 10^5$  (1/м),  $T_0 = 292$  (К),  $T_{\text{ПРЕД}} = 492$  (К).

Используя приведенную методику, получим требуемую суммарную толщину теплозащитного покрытия  $h = 2.41 \cdot 10^{-2}$  (м).

Следует отметить, что расчеты по формулам (7), (14), (15), (16) дают несколько завышенный результат. Отклонения идут в запас прочности.

Таким образом, поверхностное испарение является основным фактором, определяющим требуемую толщину теплозащитного материала. Однако, поверхностным испарением не исчерпываются возможные механизмы разрушения КТЗП, подвергающегося действию ЛИ. Например, причиной разрушения могут стать термические напряжения, движение расплава под действием градиента давления паров и др. В статье решена задача о воздействии ЛИ на композиционное теплозащитное покрытие при поверхностном поглощении и излучении в материале. Определены время начала испарения материала, скорость волны испарения и температурное поле при стационарной абляции. Показано, что испарение играет основополагающую роль в разрушении КТЗП при воздействии лазерного излучения. Даны рекомендации по оценке требуемой толщины теплозащитного покрытия, обеспечивающего тепловую защиту конструкции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гавриков В.К. Взаимодействие лазерного излучения с материалами: Конспект лекций. – Харьков: ХВУ, 1999. – 134 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
3. Приходько И. М., Дуреев В. А., Винник Л. А. О воздействии непрерывного лазерного излучения на композиционное теплозащитное покрытие // Системи обробки інформації. – ХФВ “Транспорт України”. – 2000. – Вип. 4 (10). – С. 3 - 5.
4. Приходько И. М., Дуреев В. А., Винник Л. А. О воздействии непрерывного лазерного излучения на композиционное теплозащитное покрытие с объемным поглощением энергии // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2001. – № 3. – С. 39 - 45.
5. Орлов Б.В., Мазинг Г.Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе. – М.: Машиностроение, 1968. – 536 с.

*Поступила в редколлегию 21.03.2001*