

ПРОЦЕССЫ В КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЯХ ПРИ ОБЪЕМНОМ ПОГЛОЩЕНИИ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.А. Дуреев

(представил д.т.н., проф. И.М. Приходько)

Рассматривается воздействие непрерывного лазерного излучения на композиционное теплозащитное покрытие: объемное поглощение излучения, модель теплового источника, температурные поля в нестационарном и в стационарном режимах нагрева, механизм лазерного разрушения композиционного теплозащитного покрытия.

Согласно имеющимся данным, современные лазеры непрерывного действия обеспечивают плотность теплового потока I_0 порядка 10^8 (Вт/м²) [1] и позволяют в течение короткого времени прожигать различные материалы на достаточно близком расстоянии. В настоящее время нет строгих аналитических зависимостей, описывающих тепловое состояние и градиенты температур как в активных композиционных теплозащитных покрытиях (КТЗП), так и в материале защищаемой конструкции. Это затрудняет выбор активного теплозащитного покрытия и определение его потребной толщины.

В видимом и инфракрасном диапазоне частот все лазерное излучение (ЛИ), которое не отражается, поглощается материалом в skin-слое. Его толщина d сильно зависит от степени прозрачности материала и для КТЗП лежит в пределах $10^{-5} \div 10^{-3}$ (м). Это позволяет упростить описание воздействия ЛИ на КТЗП и рассматривать лишь два процесса: отражение и поглощение, пренебрегая распространением ЛИ в материале [1].

Наиболее важными свойствами любой поверхности являются ее неоднородности [4]: физические, химические и индуцированные. Поэтому любой макроскопический участок поверхности твердого тела характеризуется некоторым средним значением поглощательной способности A . Она сильно зависит как от длины волны λ (с увеличением λ уменьшается A [1]) и вида материала, так и от состояния поверхности и ее температуры [2]. При увеличении температуры, загрязнении поверхности, наличии или образовании при нагревании поверхности ЛИ окислов, толщина слоев которых при непрерывном ЛИ может достигать десятков микрометров, поглощательная способность A увеличивается в 2 раза в каждом отдельном случае. На основании этих факторов принимаем максимальное значение $A = 1$; $d = 10^{-3}$ (м). Коэффициент поглощения $\alpha = 10^3$ (м⁻¹), где $\alpha = 1/d$. (1)

Расчет времени начала и скорости волны испарения будем проводить

при следующих допущениях: теплофизические характеристики КТЗП остаются постоянными [1]; интенсивность ЛИ равномерно распределена по всему сечению луча; нагрев КТЗП без разрушения происходит до начала испарения материала.

Сравнительные оценки [3] показали, что учет затрат энергии ЛИ на химические превращения и плавление КТЗП не дает серьезных погрешностей (занижая временные и завышая скоростные характеристики волны испарения), но значительно усложняет расчеты.

Поглощение ЛИ твердым телом эквивалентно появлению источника тепла внутри или на поверхности тела [2, 4]. В качестве модели источника тепла примем распределенный поверхностный источник [1, 4]. Учитывая, что радиус r_0 лазерного пучка значительно превышает размер прогретой зоны в случае отсутствия взаимодействия ЛИ с парами описание процесса нагрева упрощается [5]. Так как КТЗП частично прозрачно для ЛИ, то выполняется условие $d \gg \sqrt{a\tau}$, где $\sqrt{a\tau}$ – глубина проникновения тепла за время τ [1, 2]. В этом случае роль теплопроводности незначительна и распределение температуры в КТЗП во времени определяется непосредственным проникновением света в материал и описывается уравнением [1]:

$$T(z, \tau) = T_0 + \frac{AI_0\alpha\tau}{\rho c} \exp(-\alpha z), \quad (2)$$

а температура на поверхности материала равна

$$T(0, \tau) = T_0 + AI_0\alpha\tau / (\rho c), \quad (3)$$

где T_0 – начальная температура материала; τ – время воздействия ЛП на материал; z – координата; ρ – массовая плотность; c – теплоемкость.

Из (3) определим время τ_s , при котором температура поверхности достигнет температуры испарения T_s :

$$\tau_s = (T_s - T_0)\rho c / (AI_0\alpha). \quad (4)$$

В дальнейшем при $\tau > \tau_s$ начинается испарение материала и вглубь тела распространяется волна испарения, скорость V_s которой можно найти из уравнения теплового баланса при испарении [1, 2]:

$$\rho dz [(T_s - T_0) + Q_s] = AI_0 d\tau; \quad (5)$$

$$V_s = \frac{AI_0}{\rho [c(T_s - T_0) + Q_s]}, \quad (6)$$

где Q_s – удельная теплота испарения материала.

ЛИ большой интенсивности, поглощаемое в начальный момент в тонком поверхностном слое, является источником тепловой волны, распространяющейся вглубь тела со скоростью V_T [2]:

$$V_T = \sqrt{a/4\tau}, \quad (7)$$

где a – коэффициент температуропроводности.

Из условия равенства скоростей тепловой волны и волны испарения

($V_T = V_S$), находим τ^* :

$$\tau^* = a/4V_S^2. \quad (8)$$

При $\tau > \tau^*$ наступает режим форсированного испарения (ФИ) [1, 2] и затраты энергии излучения связаны, в основном, с продвижением вглубь тела волны испарения, а потери энергии на теплопроводность невелики.

Пары вещества в режиме ФИ остаются прозрачны для ЛИ. Температура паров равна температуре поверхностного слоя тела и пропорциональна I_0 . Температурное поле при ФИ может быть определено из решения задачи о движении границы испарения тела толщиной δ в одномерной постановке:

$$a \frac{d^2 T}{dz^2} + V_s \frac{dT}{dz} = - \frac{AI_0 \alpha}{\rho c} \exp(-\alpha z) \quad ; \quad (9)$$

$$\lambda_T \frac{dT(0)}{dz} = Q_s V_s \rho; \quad T(\delta) = T_0, \quad (10)$$

где λ_T - коэффициент теплопроводности.

Учитывая, что источник теплоты в материале является объемным (правая часть уравнения (9)) и на поверхности испарения действует тепловой сток $Q_s V_0 \rho$, соответствующий затратам теплоты на фазовый переход при испарении, решение сформулированной задачи имеет вид

$$T(z) = T_0 + \frac{AI_0}{\lambda_T(\beta - \alpha)} \exp(-\alpha z) + \left[T_s - T_0 - \frac{AI_0}{\lambda_T \beta} \right] \exp(-\beta z) + \left[T_0 + \frac{AI_0}{\lambda_T \beta} - T_s \right] \exp(-\beta \delta); \quad \beta = \frac{V_s}{a}. \quad (11)$$

При совместном действии объемного источника теплоты в материале и поверхностного стока, максимальная температура достигается на некотором расстоянии z_0 от поверхности испарения

$$z_0 = \frac{1}{\beta - \alpha} \ln \left[\frac{(\beta - \alpha)(T_0 Q_s \beta - T_s Q_s \beta + AI_0)}{AI_0 \alpha} \right]. \quad (12)$$

Таким образом, в условиях, когда материал частично прозрачен для падающего излучения, возможен значительный внутренний перегрев, т.е. энергия поглощается внутри образца впереди фронта испарения, вызывая внутреннее кипение вещества, наблюдаемое в виде микровзрывов [1, 3].

Зная скорость волны испарения и время воздействия $\tau_{\text{ВОЗД}}$ ЛИ, можно определить толщину h_s унесенного слоя по формуле

$$h_s = (\tau_{\text{ВОЗД}} - \tau_s) V_s. \quad (13)$$

Потребная суммарная толщина h покрытия, обеспечивающая тепловую защиту конструкции, равна

$$h = h_s + h_{\text{ОСТ}}. \quad (14)$$

Величина $h_{\text{ОСТ}}$ определяется из формулы (11), принимая

$$T(z = \delta) = T_0 + 200. \quad (16)$$

Пример расчета. Рассмотрим воздействие ЛИ с $I_0 = 10^8$ (Вт/ м²) в течение $\tau_{\text{возд}} = 3$ (с) на КТЗП, характеристики которого: $\lambda_T = 0.8$ (Вт/ мК), $a = 2 \cdot 10^{-7}$ (м²/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/м³), $A = 1$, $\alpha = 10^5$ (1/ м), $T_0 = 292$ (К), $T_{\text{ПРЕД}} = 492$ (К).

Используя приведенную методику, получим: $h_s = 2.65 \cdot 10^{-2}$ (м), $h_{\text{ОСТ}} = 0.005$ (м), $h = 0.0315$ (м).

Следует отметить, что расчеты по формулам (2), (6), (11), (15) дают несколько завышенный результат, т.е. 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 рассмотрена задача о воздействии ЛИ на КТЗП при объемном поглощении излучения 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 ЛИ. Даны рекомендации по оценке потребной толщины теплозащитного покрытия, обеспечивающего тепловую защиту конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. 59 - 63.
2. Гавриков В.К. Взаимодействие лазерного излучения с материалами: Конспект лекций. – Харьков: ХВУ, 1999. – 134 с.
3. Григорянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная обработка неметаллических материалов. – М.: Высшая школа, 1988. – 191 с.
4. Приходько И.М., Дуреев В.А., Винник Л.А. О воздействии непрерывного лазерного излучения на композиционное теплозащитное покрытие с поверхностным поглощением энергии // Системи обробки інформації. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2001. – Вип. 3 (13). – С. 167 - 170.
5. Делоне Н. Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. – М.: Наука, 1989. – 280 с.

Поступила в редколлегию 01.10.2001