

К оценке разупрочнения аблирующих теплозащитных покрытий

Г. В. Исаханов^а, Б. А. Ляшенко^б, Е. Г. Кузовков^б, В. В. Пасичный^в

^а Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина

^б Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^в Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина

Рассмотрен метод аналитической оценки разупрочнения аблирующих теплозащитных покрытий. Разупрочнение оценивается коэффициентом, который описывает влияние изменения модуля упругости материала с повышением температуры на процесс разупрочнения, а также учитывает форму температурного поля, определяемую характером температурной зависимости коэффициента температуропроводности. Показано приемлемое совпадение расчетных и экспериментальных результатов в условиях квазистационарного режима абляции.

Ключевые слова: абляция теплозащитного покрытия, унос массы, фронт коксования, температурная зависимость модуля упругости, температурная зависимость коэффициента температуропроводности, коэффициент разупрочнения, несущая способность.

Постановка задачи. Разработка тепловой защиты с использованием аблирующих покрытий остается актуальной для разных отраслей техники [1]. В основном работы, выполненные в этой области, посвящены исследованию уноса массы – основному критерию качества аблирующих покрытий [2, 3]. Вместе с тем не менее важным критерием таких покрытий следует считать скорость и характер их разупрочнения, а также снижение несущей способности. Очевидно, что эти критерии в принципе непосредственно связаны с процессом и характером уноса массы.

Механические испытания по оценке разупрочнения и несущей способности аблирующих покрытий более трудоемки по сравнению с экспериментами по определению скорости абляции [4–6].

В работе [6] предпринята попытка аналитической оценки разупрочнения аблирующего покрытия по линейной скорости уноса массы, что перспективно по следующим причинам:

скорость абляции как характеристика разупрочнения аблирующего покрытия не связана с толщиной образца, поэтому ее влияние на процесс уноса массы исключается;

эксперимент по определению скорости абляции сравнительно прост и дает сопоставимые результаты на образцах различной толщины.

Описанный ранее [6] аналитический метод позволил оценить разупрочнение теплозащитных аблирующих покрытий без проведения механических испытаний на разупрочнение. В [6] использовалась зависимость разупрочнения от скорости коксования, которая в условиях установившегося процесса абляции совпадает со скоростью абляции.

Однако сравнение расчетных результатов разупрочнения с данными контрольных механических испытаний показывает, что расчетные значения несколько завышены. По мнению авторов, использование зависимости коэффициента температуропроводности от температуры позволит приблизить расчетные результаты к экспериментальным.

Метод аналитической оценки. С использованием приведенных ранее [6] обозначений определим численное значение разупрочняющего коэффициента K_T с учетом зависимости коэффициента температуропроводности a от температуры. При этом воспользуемся степенными полиномами для модуля упругости E и величины a :

$$E = E_0 \left(1 - \sum_1^n \beta_n \theta^n \right); \quad (1)$$

$$a = a_0 \left(1 + \sum_1^n A_n \theta^n \right), \quad (2)$$

где E_0 и a_0 – исходные значения модуля упругости и коэффициента температуропроводности; θ – безразмерная температура.

Поскольку точность экспериментальных зависимостей E и a от температуры невысока, для определения параметров β_n и A_n используется метод выбранных точек [7]. Системы уравнений в матричной форме имеют вид

$$[c] = [\theta][\beta]; \quad (3)$$

$$[b] = [\theta][A], \quad (4)$$

причем матрицы $[c]$ и $[b]$ составлены из элементов $c_i = 1 - \bar{E}_i$ и $b_i = \bar{a}_i - 1$.

При квазистационарном режиме нагружения профиль температуры с учетом зависимости $a = a(T)$ можно определить с помощью дифференциального уравнения

$$a \frac{d^2 \theta}{d\xi^2} + v l_m \frac{d\theta}{d\xi} = 0, \quad (5)$$

где v – скорость перемещения фронта коксования при граничных условиях $\theta(0) = 1$; l_m – масштаб длины.

В уравнении (5) коэффициент температуропроводности a определяется по выражению (2). Разделив уравнение (5) на a_0 , получим

$$\left(1 + \sum_1^n A_n \theta^n \right) \frac{d^2 \theta}{d\xi^2} + v \frac{d\theta}{d\xi} = 0, \quad (6)$$

где v – безразмерная скорость перемещения фронта коксования, $v = \frac{v}{v_m}$;

$$v_m = \frac{a_0}{l_m}.$$

Нелинейное уравнение (6) решаем методом последовательных приближений, т.е. по i -му приближению определяем $i + 1$ приближение с помощью уравнения

$$\frac{d^2\theta_{i+1}}{d\xi^2} + v \frac{d\theta_{i+1}}{d\xi} = - \sum_1^n A_n \theta_i^n \frac{d^2\theta_i}{d\xi^2}. \quad (7)$$

Если в качестве нулевого приближения принять решение, полученное при постоянном значении a , т.е. $\theta = e^{-v\xi}$, то в качестве первого приближения получим

$$\theta = \left(1 + \sum_1^n \frac{A_n}{n+1} \right) e^{-v\xi} - \sum_1^n \frac{A_n}{n+1} e^{-(n+1)v\xi}. \quad (8)$$

Как видно, уже первое приближение является достаточно громоздким. В случае, когда параметры уравнения известны лишь с ограниченной точностью, построение высших приближений может дать лишь иллюзию точности. Поэтому остановимся только на первом приближении. Подставив (8) в (1), запишем

$$E = E_0 \left[1 - \sum_1^n \beta_n \left[\left(1 + \sum_1^k \frac{A_k}{k+1} \right) e^{-v\xi} - \sum_1^k \frac{A_k}{k+1} e^{-(k+1)v\xi} \right]^n \right]. \quad (9)$$

Выражение (9) описывает изменение упругих свойств по толщине аблирующего покрытия в зависимости от линейной скорости уноса массы и температурной зависимости коэффициента температуропроводности a .

Осуществив выкладки, аналогичные приведенным ранее [6], получим, что потеря размера несущего сечения Δh определяется выражением

$$\Delta h = \frac{K_T a_0}{v}. \quad (10)$$

Величина Δh , определенная в [6], имеет следующий вид:

$$\Delta h = \frac{Ka}{v}. \quad (11)$$

Из сравнения формул (10) и (11) следует, что температурная зависимость коэффициента a оказывает влияние лишь на разупрочняющий коэффициент K_T . Опуская выкладки, аналогичные приведенным ранее [6], получаем

$$K_T = \sum_1^n \beta_n A_n. \quad (12)$$

Параметры β_n находятся из уравнения (3). Величины параметров A_n определяются характером зависимости коэффициента температуропроводности a от температуры. Таким образом, K_T учитывает сразу две стороны влияния процесса абляции на разупрочнение:

изменение упругих свойств материала, обусловленное повышением температуры, а также форму температурного поля, которая, в свою очередь, определяется характером зависимости коэффициента температуропроводности a от температуры.

Можно полагать, что коэффициент K_T отражает влияние формы кривых $\bar{E} = \bar{E}(\theta)$ и $\bar{a} = \bar{a}(\theta)$ на разупрочнение аблирующего покрытия.

Результаты эксперимента. Корректность расчетной методики проверялась при проведении прямого эксперимента по определению несущей способности покрытий. Исследовалось разупрочнение теплозащитных покрытий на основе асботкани (материал 1) и асбокварцевой ткани (материал 2). Экспериментальные температурные зависимости модуля упругости и коэффициента температуропроводности в условиях однородного температурного поля представлены на рис. 1. Для указанных зависимостей по приведенной методике расчета были найдены их аналитические выражения.

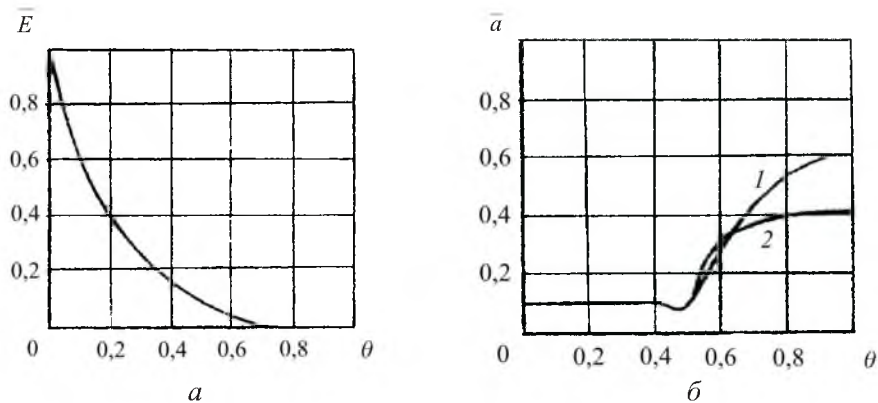


Рис. 1. Экспериментальные температурные зависимости модуля упругости (а) и коэффициента температуропроводности (б) при однородном температурном поле: 1, 2 – соответственно материал 1 и 2.

Видно, что зависимость $\bar{E} = f(\theta)$ одинакова для обоих материалов:

$$\bar{E} = 1 - 3,25\theta + 3,35\theta^2 - 1,1\theta^3,$$

в то время как зависимость коэффициента температуропроводности для материала 1 имеет вид

$$\bar{a} = 1 - 5\theta + 10\theta^2, \quad (13)$$

для материала 2 –

$$\bar{a} = 1 - 3\theta + 6\theta^2. \quad (14)$$

На основании зависимостей (12) и (13) для материала 1 получаем $K_T = 2,9$, по зависимостям (12) и (14) для материала 2 – $K_T = 2,45$.

Результаты экспериментального определения несущей способности и потери несущего размера в зависимости от скорости уноса массы при фокусированном лучистом нагреве [6] представлены на рис. 2.

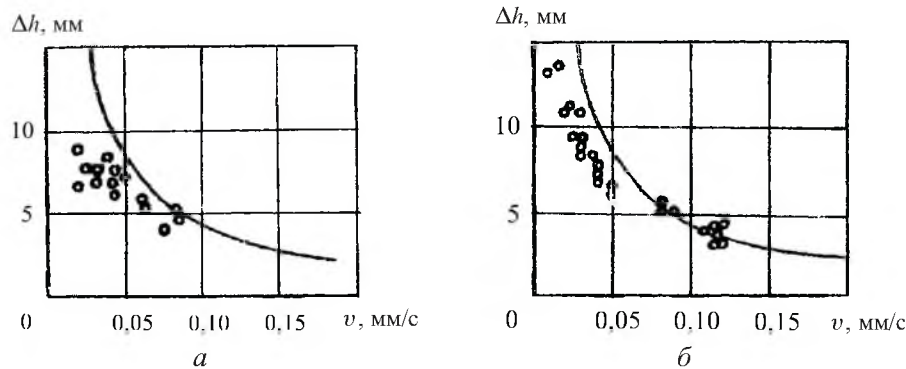


Рис. 2. Зависимость потери несущего размера материалов 1 (а) и 2 (б) от скорости уноса массы. (Точки – экспериментальные результаты при фокусированном лучистом нагреве.)

Как видно, расхождение между экспериментальными данными и расчетными по выражению (10) в области малых скоростей перемещения фронта коксования v объясняется тем, что размеры сечения образца и длительность прогрева при этих скоростях недостаточны для установления квазистационарного режима. В зоне скоростей уноса массы, где установлен квазистационарный режим, расчетные зависимости достаточно хорошо совпадают с экспериментальными.

Заключение. Показана целесообразность оценки разупрочнения аблирующего покрытия по скорости продвижения фронта коксования. Критерий разупрочнения в виде потери несущего размера Δh рассчитан по паспортным характеристикам материала K_T и a , определяемым в условиях однородного температурного поля, и по скорости абляции v . Учет температурной зависимости повышает точность критерия, однако при этом увеличивается объем расчетных работ.

Резюме

Розглянуто метод аналітичної оцінки знеміцнення абліруючих теплозахисних покриттів. Знеміцнення оцінюється коефіцієнтом, який описує вплив зміни модуля пружності матеріалу з підвищенням температури на процес знеміцнення, а також враховує форму температурного поля, що визначається характером температурної залежності коефіцієнта температуропровідності. Показано прийнятний збіг розрахункових і експериментальних даних в умовах квазістаціонарного режиму абляції.

1. *Полежаев Ю. В.* Современные проблемы тепловой защиты // Инж.-физ. журн. – 2001. – **74**, № 6. – С. 8 – 16.
2. *Patton R. D., Pittman C. U., Wang L., et al.* Ablation, mechanical and thermal conductivity properties of vapor grown carbon fiber/phenolic matrix composites // Compos. A. – 2002. – **33**, No. 2. – P. 243 – 251.
3. *Полежаев Ю. В., Михатулин Д. С.* Эрозия: проблемы моделирования и отработки конструкций // Сб. докл. I Междунар. симп. “Передовые технологии и материалы”. – М., 1997. – С. 179 –181.
4. *Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Т. 3. Экспериментальные исследования / Под ред. Ю. В. Полежаева, С. В. Резника.* – М.: Изд-во МВТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 264 с.
5. *Nelson D. S. and Prince A. S.* An experimental method for evaluation the char tenacity of fiber-reinforced insulation materials // AIAA Pap. – 1994. – **3184**. – P. 1 – 6.
6. *Кузовков Е. Г., Дверняков В. С., Ляшенко Б. А. и др.* К оценке разупрочнения пластиков при одностороннем нагреве // Пробл. прочности. – 1971. – № 11. – С. 84 – 89.
7. *Демидович Б. П., Марон И. А.* Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 1966. – 300 с.

Поступила 04. 03. 2004