

В.А. Дуреев, к.т.н., доцент, НУГЗУ

МОДЕЛЬ СТАЦИОНАРНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОРИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ

(представлено д-ром техн. наук Андроновым В.А.)

Проведена оценка влияния пористости на прогрев КТЗП. Предложен способ выбора параметров пористости материала с учетом геометрического размера пор.

Ключевые слова: композиционное теплозащитное покрытие, пористость, стационарное разрушение композиционного теплозащитного покрытия.

Постановка проблемы. Наряду с условиями теплового воздействия, прогрев композиционного теплозащитного покрытия (КТЗП) зависит от структуры материала. Наличие пористости, при известной величине тепловых потоков (ТП), изменяет механизм передачи тепла в глубину покрытия, меняя картину разрушения активного КТЗП. Следовательно, разработка модели стационарного разрушения пористого КТЗП связана с учетом влияния пористости покрытия.

Таким образом, существует проблема выбора модели теплового стационарного разрушения КТЗП с учетом показателя пористости покрытия.

Анализ последних исследований и публикаций. Основные этапы теплового разрушения КТЗП представлены в [1]. Рассмотренный процесс теплового разрушения ТЗП показан на рис. 1.

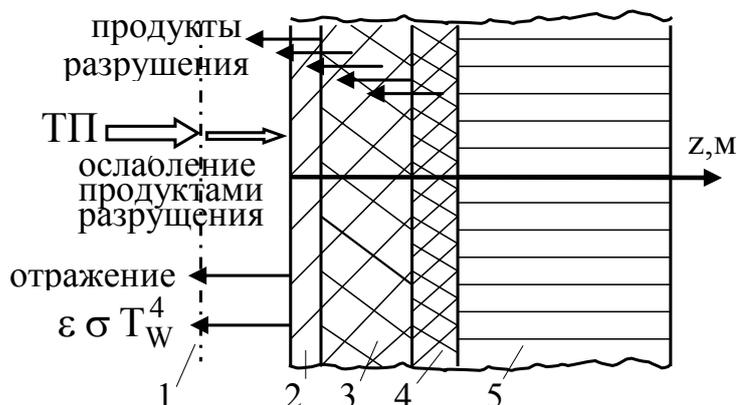


Рис. 1. Модель разрушения КТЗП: 1 – облако продуктов разрушения; 2 – пленка расплава; 3 – прококсованный слой; 4 – зона деструкции; 5 – однородный материал

В представленной модели, поступающий на поверхность КТЗП тепловой поток расходуется на разрушение материала, излучение с нагретой поверхности и частично блокируется тепловым эффектом вдува, связанным с отводом тепла набегающим потоком газов и поглощением в парах испаряющегося материала. Процесс разрушения КТЗП считается установившимся [2].

Для оценки наличия пор, в [3] представлена модель пористого тела, в которой плоские слои твердого и газообразного веществ чередуются между собой и расположены параллельно передаче ТП. Пористая ячейка имеет форму параллелепипеда высотой h . При высоких температурах, стенки пор воспринимают энергию излучения и одновременно испускают её, внося необходимость учета радиационной составляющей теплопроводности. Теплопроводность КТЗП

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_S(1 - \Pi) + \lambda_g \Pi + \lambda_R, \quad (1)$$

где λ_{Σ} – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/мК; λ_S – коэффициенты теплопроводности твердой фазы, Вт/мК; λ_g – коэффициенты теплопроводности газообразной фазы, Вт/мК; Π – пористость материала.

В [4] указывается, что при одинаковом Π , λ_R зависит от размера и формы пор. При однократном отражении с поверхности пор, коэффициент радиационной теплопроводности имеет вид

$$\lambda_R = (4\varepsilon^2 \sigma T^3 h) \quad (2)$$

где ε – степень черноты; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м²К⁴; T – температура стенки поры, К; h – высота поры, м.

Постановка задачи и ее решение. Для снижения негативного вклада радиационной составляющей коэффициента теплопроводности, необходимо при известной величине тепловых потоков, выбрать показатель пористости и подобрать размеры пористых ячеек, что обеспечит снижение прогрева покрытия. Используем модель теплового разрушения КТЗП на стационарном участке разрушения [5] с учетом пористости (1, 2). Уравнение сохранения энергии внутри ТЗП имеет вид

$$\lambda_{\Sigma} \frac{d^2 T(\xi)}{d\xi^2} + (\rho c) V_S \frac{dT(\xi)}{d\xi} - c_g G_g \frac{dT(\xi)}{d\xi} - Q^* = 0; \quad (3)$$

$$(\rho c)_{\Sigma} = (1 - \Pi_M)(\rho c)_S + \Pi_M(\rho c)_g; \quad \Pi_M = \varphi_{CM} h_g, \quad (4)$$

где T – текущая температура, К; ζ – координата в подвижной системе координат, м; V_S – линейная скорость уноса поверхности ТЗП, м/с; G_g – расход газообразных продуктов разрушения, кг/м²с; Q^* – объемный сток тепла, обусловленный тепловым эффектом физико-химических превращений, Вт/м³; Π_M – массовая пористость; $(\rho c)_g$ – плотность кг/м³ и теплоемкость Дж/кгК газообразной фазы; $(\rho c)_s$ – плотность кг/м³ и теплоемкость Дж/кгК твердой фазы; φ_{CM} – массовая доля смолы; h_g – массовая доля газообразных продуктов реакции.

Граничные условия имеют вид

$$\begin{cases} -\lambda_{\Sigma} \frac{dT(\xi)}{d\xi} \Big|_{\xi=0} = AI_0\kappa_{\Xi} - (V_S \rho + G_g) \Gamma H - \varepsilon \sigma T_S^4 - q_{ВД}; \\ T(\xi) \Big|_{\xi=\infty} = T_0; \end{cases} \quad (5)$$

где A – поглощательная способность поверхности; I_0 – плотность ТП, Вт/м²; κ_{Ξ} – коэффициент поглощения ТП в парах; Γ – параметр газификации; H – скрытая теплота разрушения ТЗП, Дж/кг; $q_{ВД}$ – тепловой эффект вдува образовавшихся газов, Вт/м²; T_0 – начальная температура ТЗП, К.

На рис. 2 показано графическое изображение решения задачи (3 ÷ 5): КТЗП – рефразил, $I_0 = 10^8$, Вт/м², $T_0 = 273$, К.

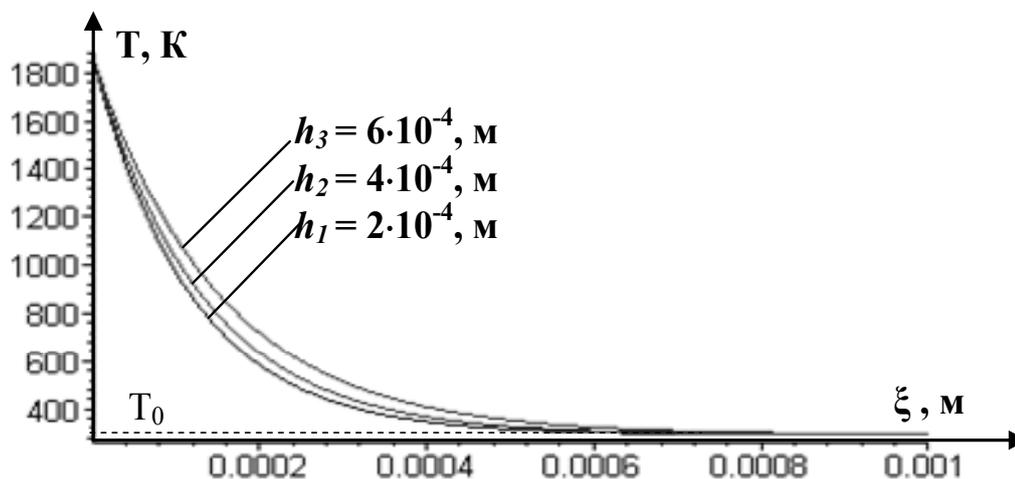


Рис. 2. Температурное поле стационарного разрушения пористого КТЗП

Анализ температурных полей на рис.2 показывает, что увеличение теплопроводности и прогрева КТЗП происходит с увеличением заданных размеров пор. Причиной этого является увеличение доли тепла, перенесенного излучением внутри пор. Стенки пор яв-

ляются экранами, воспринимающими энергию излучения и одновременно испускающими ее. Уменьшение размеров пор приводит к снижению вклада излучения в общий перенос тепла.

Выводы. Предложена модель стационарного разрушения композиционного покрытия с учетом пористости. Проведена оценка влияния размеров пор на прогрев КТЗП. Показан выбор геометрических размеров пор для снижения прогрева КТЗП при заданных величинах тепловых потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полежаев Ю.В. Закономерность установления квазистационарного режима разрушения при одностороннем нагреве материала // Ю.В. Полежаев, Г.А. Фролов / ИФЖ, 1989. – № 4. – С.533–539.
2. Дуреев В. А. Модель разрушения теплозащитных покрытий при воздействии высокоинтенсивных тепловых потоков // В.А. Дуреев, М.Н. Мурин, А.А. Савченко / Проблемы пожежної безпеки. Зб. наук пр. УЦЗ України. – Вип. 21. – Харків: УЦЗУ, 2007. – С. 88-92.
3. Полежаев Ю. В. Тепловая защита / Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юревич. Под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергия, 1976. – 392 с
4. Алифанов О. М. Определение коэффициента внутреннего теплообмена и эффективной теплопроводности пористого тела по данным нестационарного эксперимента // О.М. Алифанов, А.П. Тренин / Инженерно-физический журнал. – 1985. – Т. 48. – № 3. – С. 472 – 483.
5. Дуреев В.А. Оценка скорости уноса и прогрева теплозащитного покрытия с учетом принятой модели теплового разрушения // В.А. Дуреев, А.Н. Литвяк / Проблемы пожежної безпеки. Зб. наук пр. УЦЗ України. – Вип. 23. – Харків: УЦЗУ. – 2008. – С. 69-73.

В.О. Дуреев

Модель стаціонарного руйнування композиційного пористого покриття

Проведена оцінка впливу пористості на прогрів КТЗП. Запропоновано спосіб вибору параметрів пористості матеріалу з урахуванням геометричного розміру пор.

Ключові слова: композиційне теплозахисне покриття, пористість, стаціонарне руйнування композиційного теплозахисного покриття.

V.O. Dureiev

Model of stationary destruction of the porous composite coating

It is assessed the influence of porosity on the heating of the coating. The method of selection of the porosity of the material is offered taking into account the geometrical pore size.

Keywords: composite thermal insulation coating, porosity, stationary destruction of composite thermal barrier coatings.