

Андронов В.А., д-р техн. наук, проф., нач. факультета,  
Пушкаренко А.С., канд. техн. наук, доц., доц. каф.,  
Е.А. Рыбка, адъюнкт

Национальный университет гражданской защиты Украины (Украина, г. Харьков)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ИСПЫТАНИЙ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВСПУЧИВАЮЩИХСЯ ПОКРЫТИЙ ПО МЕТАЛЛУ НА УМЕНЬШЕННЫХ ОБРАЗЦАХ

*Представлен усовершенствованный экспериментально-расчетный метод испытаний и идентификация теплофизических свойств вспучивающихся покрытий по металлу за счет использования уменьшенных образцов и решения обратной осесимметричной задачи теплопроводности.*

**Постановка проблемы.** Одним из перспективных способов обеспечения огнестойкости металлических строительных конструкций является покрытие их вспучивающимися огнезащитными покрытиями, которые не увеличивая вес конструкции, позволяют повысить огнестойкость до 90 минут.

Для обеспечения требуемой огнестойкости металлических конструкций существуют методы определения толщины огнезащитного покрытия в зависимости от приведенной толщины металла. Эти методы можно разделить на три группы: экспериментальные, экспериментально-расчетные и расчетные. Расчетные методы являются ограниченными в связи с отсутствием достоверных данных относительно теплофизических характеристик покрытий. Экспериментальные методы подразумевают проведения крупномасштабных огневых испытаний защищенных покрытиями металлоконструкций. В условиях тотального повышения цен на энергоносители возникает необходимость в усовершенствовании методов, которые не имеют перечисленных недостатков и дают возможность максимально удешевить испытания и повысить их достоверность. Такими являются экспериментально-расчетные (контрольные) методы, в которых по ограниченному данным испытаний сначала с помощью решения обратных задач теплопроводности определяются теплофизические характеристики (ТФХ), а потом с помощью решения прямых задач - огнезащитная способность покрытия.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Экспериментально-расчетные методы испытаний используются при контроле огнезащитной способности покрытий при их производстве, поставках больших партий, разработке новых, улучшении существующих и при детальном исследовании свойств покрытий,

которое нуждается в значительном количестве испытаний. Суть данных методов заключается в фиксации времени с момента начала прогрева уменьшенных образцов [1-3] до момента достижения ими предельной температуры 500°C. Однако в данных методах возникают трудности с интерпретацией результатов при сопоставлении их с реальными конструкциями.

В экспериментально-расчетной части Европейского стандарта [4] в своей расчетной части использует упрощенную математическую модель, в которой теплоемкость огнезащитного материала принята постоянной, не зависящей от температуры. Большим упрощением также является замена радиационно-конвективного теплообмена между нагреваемой поверхностью огнезащитного покрытия и горячими газами в огневой печи на теплообмен с граничными условиями первого рода, в соответствии с которым температура нагреваемой поверхности равна температуре горячих газов в огневой печи. Такие упрощения дифференциальной модели процесса теплопроводности позволяют получить достаточно простое численно-аналитическое решение дифференциального уравнения для решения прямых задач, но является потенциально не точным при решении обратных задач по определению теплофизических характеристик огнезащитных материалов. В тоже время существует методы определения теплофизических характеристик огнезащитных материалов, основанные на полной дифференциальной модели и алгоритме решения обратных задач [5-6], которые лишены рассмотренных выше недостатков.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является усовершенствование экспериментально-расчетного метода определения толщины огнезащитных покрытий для различных приведенных толщин металлических конструкций и пределов

огнестойкости, за счет использования нового уменьшенного образца и уточнения обратной задачи теплопроводности.

Для обоснования конструктивных особенностей, размеров и материалов для уменьшенных образцов необходимо выполнение условия их теплового и геометрического подобия [7].

Тепловое подобие подразумевает пропорциональность друг другу всех величин, которые характеризуют тепловые явления: температур, тепловых потоков, теплоемкостей, коэффициентов теплопроводности:

$$\frac{T_f'}{T_f''} = \frac{\alpha'}{\alpha''} = \frac{\rho'}{\rho''} = \frac{c'}{c''} = \frac{\lambda'}{\lambda''} = c_1,$$

где  $T_f$  – температура пожарной среды, °С,  $\alpha$  – интенсивность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – теплоемкость, Дж/кг·°С;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/м·°С; одним и двумя штрихами обозначены соответственно первое и второе подобные явления;  $c_1$  – константа теплового подобия.

В нашем случае тепловое подобие выполняется, так как для изготовления образца и его огнезащиты используются такие же материалы как и для реальных конструкций – конструкционная сталь Ст3 и исследуемое реактивное покрытие соответственно. Условием эксперимента являются обеспечения стандартного температурного режима и равномерности теплового потока в печи.

Конструкция экспериментального образца должна обеспечивать равномерность падающего теплового потока за счет отсутствия углов и

равноудаленности образца от нагревательных элементов печи. Размеры образца должны быть соизмеримыми с толщиной реактивного покрытия во вспученном состоянии для обеспечения отсутствия предельных напряжений и растрескивания слоя образованного пеннококса, что может исказить результаты эксперимента. Поэтому за основу создания образца принимаем стальной цилиндр диаметром 70 мм и высотой 210 мм.

Эффективность огнезащитных покрытий для металлоконструкций характеризуется группой огнезащитной эффективности. Качество огнезащитных составов для металлоконструкций обуславливается толщиной покрытия, при которой обеспечивается необходимая граница огнестойкости и затратой огнезащитного средства. Для сравнения огнезащитных свойств покрытий для металлоконструкций, проводят испытания на образцах двутаврового сечения с приведенной толщиной металла преимущественно 3,4 и 4,1 мм.

Для обеспечения необходимого значения приведенной толщины металла экспериментальный образец предложено выполнить полым (Рис. 1).

При увеличении радиуса полости образца соответственно уменьшается площадь поперечного сечения и показатель приведенной толщины металла:

$$\delta = \frac{S_2 - S_1}{P}, \quad (2)$$

где  $\delta$  – приведенная толщина металла, м;  $S_1$  – площадь поперечного сечения полости образца, м<sup>2</sup>;  $S_2$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>;  $P$  – внешняя часть периметра образца подвергаемый огневому влиянию, м.

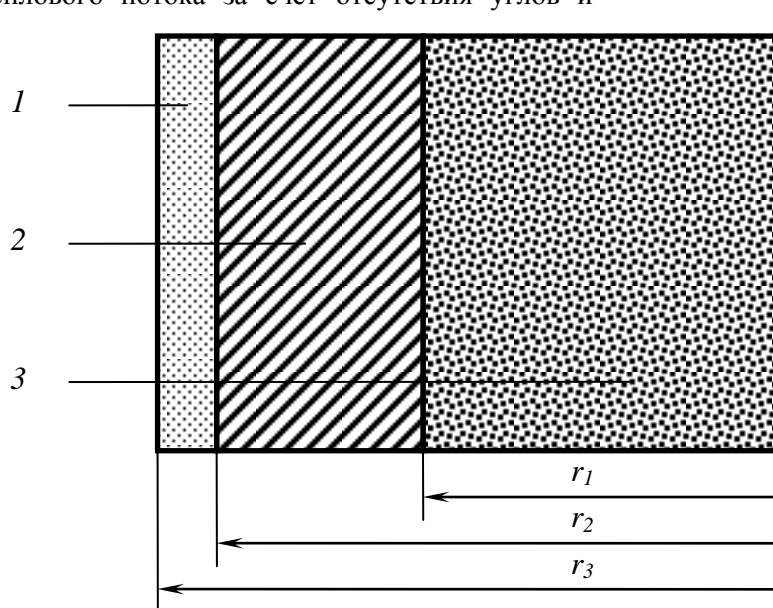


Рис. 1. Схема трехслойной тепловой системы экспериментального образца: 1 - реактивное покрытие, которое испытывается, 2 - стальной цилиндрический образец, 3 - теплоизоляция;  $r_1$  - радиус внешней поверхности теплоизоляции полости образца, м;  $r_2$  - радиус внешней поверхности стального цилиндра, м;  $r_3$  - радиус внешней поверхности защитного покрытия, принятый начальному радиусу защитного покрытия до нагревания, м

Радиус полости экспериментального образца определяется по формуле:

$$r_1 = \sqrt{r_2(r_2 - 2\delta)}, \quad (3)$$

где  $r_1$  – радиус внешней части образца, м;  $r_2$  – радиус полости образца, м;  $\delta$  – приведенная толщина металла, м.

Геометрическое подобие экспериментального образца и реальной конструкции выражается с помощью инварианта подобия [6], в качестве

$$c\rho_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_1(T) r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), 0 < r < r_1, t > 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial r} = 0, r = 0; \quad (6)$$

$$\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial r}, T_1 = T_2, r = r_1; \quad (7)$$

$$c\rho_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_2(T) r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), r_1 < r < r_2, t > 0; \quad (8)$$

$$\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial r} = \lambda_3(T) \frac{\partial T_3}{\partial r}, T_2 = T_3, r = r_2; \quad (9)$$

$$c\rho_3(T) \frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_3(T) r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right), r_2 < r < r_3, t > 0; \quad (10)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} = \varepsilon \sigma \left[ (T_3 + T^*)^4 - (T_f + T^*)^4 \right] + \alpha(T_3 - T_f), r = r_3; \quad (11)$$

$$T = T_0, t = 0, 0 < r < r_3, \quad (12)$$

неизвестными есть  $c\rho_3(T)$  и  $\lambda_3(T)$ , где  $r_1$  – радиус внешней поверхности теплоизоляции полости образца, м;  $r_2$  – радиус внешней поверхности стального цилиндра, м;  $r_3$  – радиус внешней поверхности защитного покрытия, принятый начальному радиусу защитного покрытия до нагревания, м;  $T_1$  – температура теплоизоляции, °С;  $T_2$  – температура металла, °С;  $T_3$  – температура защитного слоя, °С;  $T_f$  – температуры пожарной среды, °С;  $T^* = 273,15$  °С;  $\alpha$  – интенсивность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>,  $t$  – время, с.

Решение нелинейной нестационарной задачи теплопроводности (5-12) сводится к решению последовательности стационарных нелинейных задач теплопроводности для каждого момента времени на базе общего применения итерационного, вариационного и метода конечных элементов.

**Выводы.** Усовершенствован экспериментально-расчетный метод испытаний

которого принимаем показатель приведенной толщины металла:

$$\frac{S'}{P'} = \frac{S''}{P''} = \delta = inv. \quad (4)$$

На основе [5-6] для данной тепловой системы сформулированная следующая обратная задача теплопроводности:

вспучивающихся покрытий по металлу. Обосновано по теории подобия конструкция, размеры экспериментального образца и сформулирована обратная осесимметричная задача теплопроводности для идентификации ТФХ вспучивающихся покрытий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Круковский П.Г., Цвиркун С.В. Определение теплофизических характеристик вспучивающегося покрытия по данным испытаний на огнестойкость // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2005. – №1(11). – С. 5-13.
2. Определение теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по металлу: Методика. - Г.: ВНИИПО, 1998. - 19 с.
3. Огнезащитные составы для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности: НПБ 236-97. - [Действующий с 1997-06-01, введены в действие приказом ГУГПС МВД РФ вот 29 апреля 1997 г. N 25] -М., 1997. - 8 с.

4. European Prestandart ENV 13381-4:2002 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part 4: Applied protection to steel members.

5. Круковский П.Г. Обратные задачи тепло-массопереноса (общий инженерный подход). Киев, Институт технической теплофизики НАН Украины, 1998, 224 с.

6. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности. В 2-х т. Киев: Научная мысль, Т.1. Методология. 2002. - 408 с, Т. 2. Приложения. 2003. - 392с.

7. Веников В.А. Теория подобия и моделирования.- Г.: Высш. Школа, 1976.- 479 с.