

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛОВ ОГНЕСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СО ВСПУЧИВАЮЩИМИСЯ ОГНЕЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

**А.Д. Голиков, кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
Е.Ю. Черкасов, кандидат технических наук.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Рассмотрен вопрос оценки толщины тонкослойного огнезащитного вспучивающегося покрытия для достижения фактических пределов огнестойкости стальной конструкции требуемого

предела. Оценка проводится по методике Nord Test FIRE 021. В рамках данной методики производится определение среднего коэффициента теплопроводности покрытия по результатам 12 испытаний на огнестойкость при разных толщинах огнезащитного покрытия и приведённых толщинах стали. С целью уменьшения количества испытаний разработана методика, учитывающая стадии вспучивания и выгорания покрытия.

Ключевые слова: металлические строительные конструкции, огнезащитные покрытия, огнезащитные вспучивающиеся покрытия, тонкослойные вспучивающиеся покрытия, огнестойкость

Огнезащитные вспучивающиеся покрытия (ОВП) очень привлекательны для защиты металлических строительных конструкций от пожара из-за небольшого расхода материала на единицу защищаемой поверхности и малой толщины. Для достижения конструкцией требуемого предела огнестойкости необходимо проведение оценки толщины ОВП. Проведение испытаний конструкций под нагрузкой в соответствии с ГОСТ [1, 2] затруднено из-за недостатка испытательных стендов. В пособии к ФЗ № 123 «Пособие по определению пределов огнестойкости строительных конструкций, параметров пожарной опасности материалов. Порядок проектирования огнезащиты» [3] данный вопрос не рассматривается. В работе [4] приведена методика расчёта, максимально полно учитывающая работу ОВП при нагреве. Но для её применения для нового материала требуется предварительное определение микроаналитическими методами величины эмпирических констант, входящих в уравнения свойств вспучивающихся веществ. Возможность проведения такого анализа в испытательных пожарных центрах отсутствует.

В большинстве европейских стран испытания на огнестойкость стальных конструкций регламентируются NORDTEST METHOD NT FIRE 021 [5]. Для оценки пределов огнестойкости конструкций с ОВП разработан проект усовершенствования NT 021 [6]. Количество экспериментов, необходимых для получения результатов по пределам огнестойкости конструкции любого сечения, принято равным 12. Для каждого эксперимента производится определение величин средних коэффициентов теплопроводности слоя ОВП, линейная аппроксимация по толщине покрытия и приведённой толщине стальной конструкции и математические преобразования, приводящие уравнение теплопроводности к линейному.

Скорость нагрева стальной конструкции оценивается, при пренебрежении теплоёмкостью огнезащитного покрытия, зависимостью теплофизических свойств покрытия от координаты и в приближении усредненного по толщине покрытия градиента температур следующим уравнением:

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\lambda \cdot (T - T_s)}{d \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot \delta_{np}}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности покрытия, Вт/(м·К); d – толщина покрытия в исходном состоянии, м; ρ_s – плотность стали, кг/м³; c_s – средняя удельная теплоёмкость стали, Дж/(кг·К); T – температура в печи, К; T_s – температура конструкции, К; t – время, с; δ_{np} – приведенная толщина металла, м:

Приведенная толщина металла определяется по формуле:

$$\delta_{np} = \frac{F}{\Pi},$$

где F – площадь поперечного сечения стержня, м²; Π – обогреваемый периметр сечения стержня, м.

Если суммарная теплоёмкость покрытия сопоставима с теплоёмкостью конструкции, то к теплоёмкости стали добавляется поправка:

$$\Delta c_s = \frac{c_{II} \cdot \rho_{II} \cdot m_{II}}{m_s}.$$

Величина λ может зависеть от температуры, толщины d и приведенной толщины конструкции δ_{np} . Зависимость λ от времени определяются из термограмм по формуле:

$$\lambda(t) = \frac{d \cdot \rho \cdot c}{(T - T_s)} \delta_{np} \cdot \frac{dT_s}{dt}.$$

Далее определяются средние значения коэффициентов теплопроводности λ^* на участке 400–700⁰С для всех экспериментов и коэффициенты интерполяции зависимости λ^* от d , представленной в виде:

$$\lambda^* = k_1 + k_2 \cdot d. \quad (2)$$

Если внутри интервала интерполяции значение функции (2) меняется больше, чем на 10 %, толщина плёнки модифицируется следующим образом:

$$d^* = d + \Lambda^* / \lambda^*,$$

где Λ^* – среднее значение λ^* по d .

Если внутри интервала интерполяции значение λ^* меняется меньше, чем на 10 %, то $\lambda^* = \lambda$, если больше, то определяются коэффициенты интерполяции зависимости модифицированного на первом этапе коэффициента теплопроводности λ^* от δ_{np} :

$$\lambda^* = g_1 + g_2 / \delta_{np}. \quad (3)$$

Если внутри интервала интерполяции значение функции (3) меняется больше, чем на 10 %, модифицируется коэффициент теплопроводности и приведенная толщина конструкции:

$$\lambda^{**} = \frac{\lambda^* \cdot \Lambda^{**}}{g_1 + g_2 / \delta_{np}},$$

$$1 / \delta_{np} = 1 / \delta_{np} \cdot \frac{g_1 + g_2 / \delta_{np}}{\Lambda^{**}},$$

где Λ^{**} – среднее значение λ^* по δ_{np} .

Модифицированные значения λ , d , c_s подставляются в уравнение (1), в результате чего уравнение теплопроводности становится линейным. Достоинством данного метода является то, что он базируется на стандартных испытаниях в огневых печах.

В испытательных центрах России накапливается и хранится информация о проведённых испытаниях, в том числе, на пределы огнестойкости конструкций. В отчётах по испытаниям содержатся описание условий проведения испытаний и термограммы. Поэтому представляется возможным предварительная оценка огнезащитных свойств вспучивающихся покрытий на модернизированной по аналогии с Nord Test FIRE 021 [5] инструкцией по расчёту огнестойкости стальных конструкций [3]. При этой модернизации,

поскольку в настоящее время программные средства для решения тепловых задач с нелинейными теплофизическими свойствами общедоступны, необходимость линеаризации задачи отпадает, и за счёт введения нелинейности коэффициента теплопроводности может уменьшиться количество требуемых экспериментов.

На рис. 1 приведена характерная зависимость от времени температуры стальной конструкции, защищённой слоем ОВП, на которой видны две точки перегиба, соответствующие началу вспучивания покрытия и его выгорания. Температурная зависимость разбивается на три участка: нагрев конструкции через невспученное покрытие ($0 < t < t_1$), полностью вспученное ($t_1 < t < t_2$) и выгорающее ($t_2 < t$). Очевидно, что использование среднего коэффициента теплопроводности не позволяет учесть отсутствие защитного слоя до вспучивания покрытия и изменение скорости нагрева конструкции после начала выгорания покрытия.

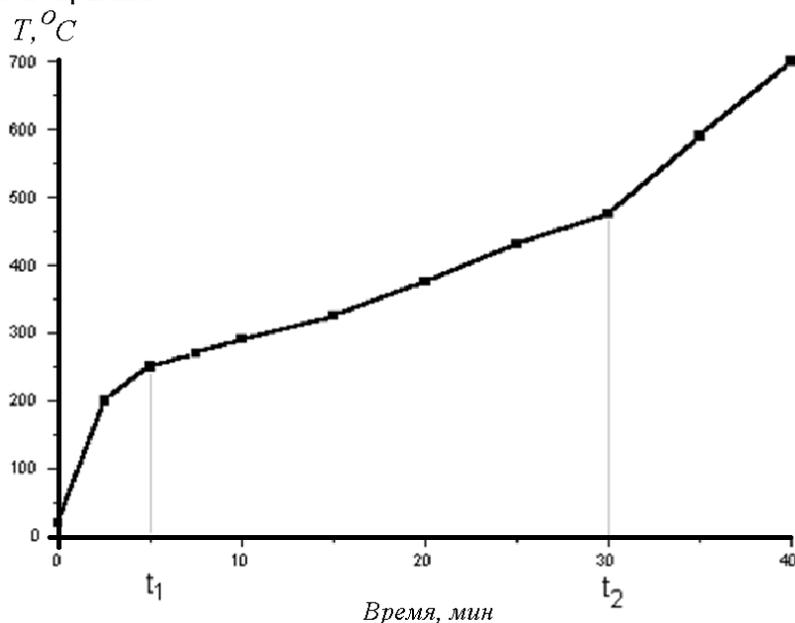


Рис. 1. Характерная зависимость от времени температуры стальной конструкции, защищённой слоем ОВП

NULLFIRE System S607 является довольно типичным ОВП. На основании результатов экспериментов с этим покрытием, проведённых в СПбФ ВНИИПО МВД России и в Германии, Исследовательской лаборатории строительных материалов при институте строительных материалов, крупноблочного строительства и пожарной охраны, были проведены работы по модернизации методики Nord Testa [7]. Использованы также материалы заключения исследовательской лаборатории 3270/2332 и отчёта по испытаниям СПбФ ВНИИПО МВД России № 010-02.96. Данные о массивности конструкций и толщинах защитного слоя приведены в табл. 1, температурные зависимости – на рис. 2. Определение значений коэффициентов теплопроводности слоя ОВП производилось по уравнению (1).

Таблица 1. Проведённые эксперименты с NULLFIRE System S607

Эксперимент	Толщина покрытия, мкм	Массивность	Марка профиля
1А, Герм	577	291	ИРЕ140
1В, Герм	585	291	ИРЕ140
1С, Герм	251	200	И180
1D, Герм	490	200	И180
1К, Герм	487	291	ИРЕ140
1L, Герм	787	291	ИРЕ140
СПбФ ВНИИПО	540	142	Спец. двутавр

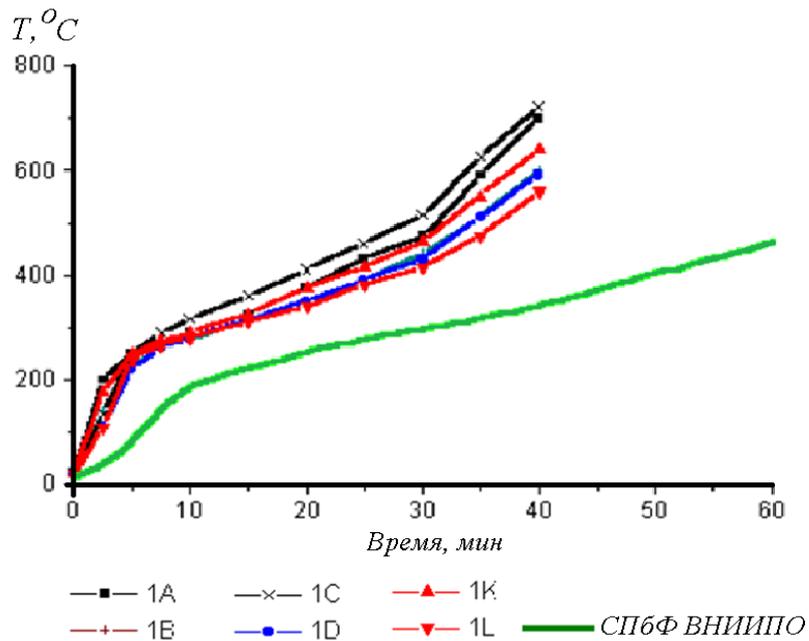


Рис. 2. Экспериментальные зависимости температуры конструкций от времени

Зависимости коэффициентов теплопроводности слоёв ОВП от времени приведены на рис. 3. На основании зависимостей температуры конструкции от времени и коэффициентов теплопроводности слоёв ОВП от времени, на рис. 4 построены зависимости коэффициента теплопроводности λ ОВП от температуры конструкции. Как и на рис. 1, зависимость λ ОВП разбивается на три участка: неvspученное покрытие ($0 < T_s < 250$), полностью вспученное ($250 < T_s < 450$) и выгорающее ($450 < T_s$). Величина λ в диапазоне температур конструкции 250–450 °C постоянна и не зависит от толщины защитного слоя и приведённой толщины конструкции.

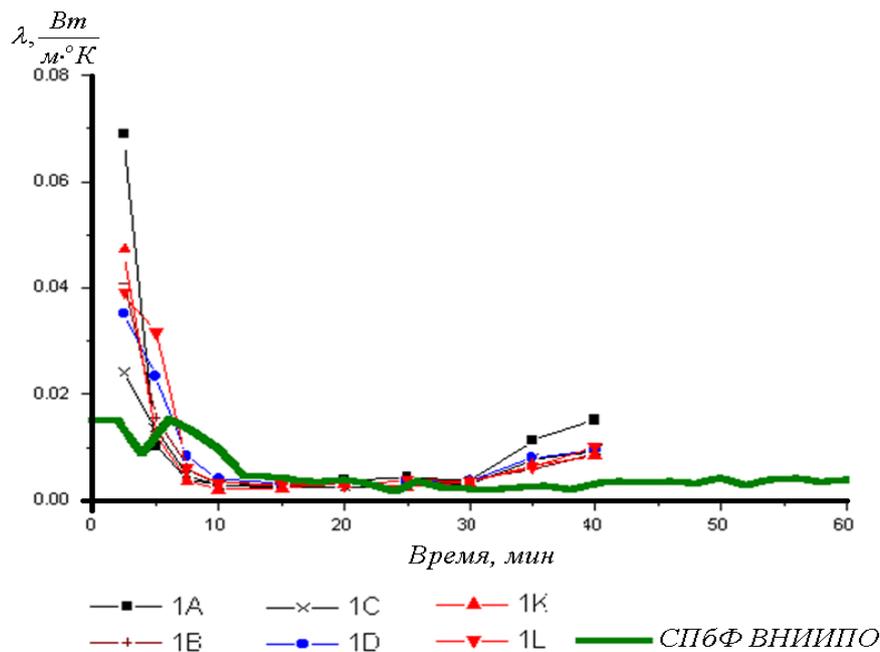


Рис. 3. Зависимость коэффициентов теплопроводности NULLFIRE System S607 от времени при воздействии стандартного температурного режима пожара

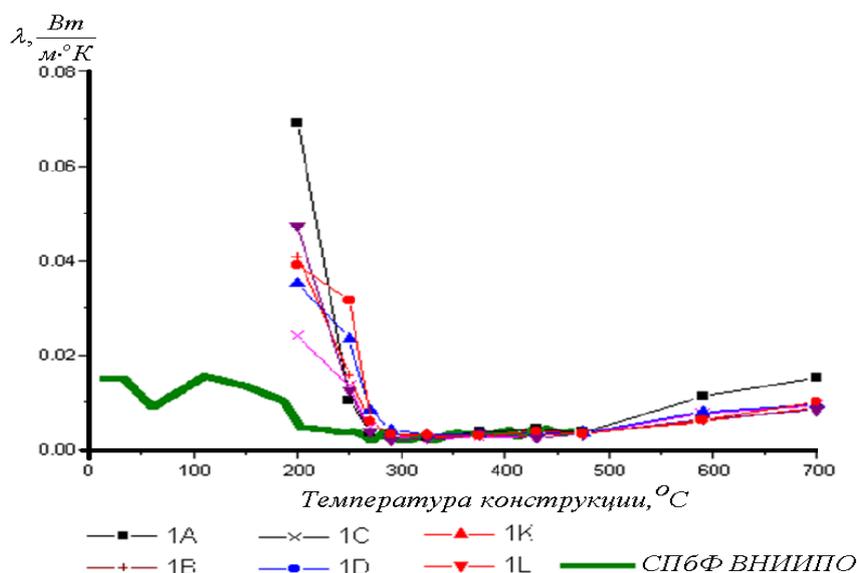


Рис. 4. Зависимость коэффициентов теплопроводности NULLFIRE System S607 от температуры конструкции

Для учёта перечисленных эффектов была принята следующая математическая модель:

$$\begin{aligned} \text{при } 0 < T_s < 250 & \quad \frac{dT_s}{dt} = \frac{\alpha \cdot (T - T_s) \cdot (F/A)}{\rho \cdot c} + \frac{\sigma \cdot \varepsilon_{np} \cdot (T^4 - T_s^4) \cdot (F/A)}{\rho \cdot c}, \\ \text{при } 250 < T_s < 450 & \quad \frac{dT_s}{dt} = \frac{\lambda_1 \cdot (T - T_s) \cdot (F/A)}{d \cdot \rho \cdot c}, \\ \text{при } 450 < T_s & \quad \frac{dT_s}{dt} = \frac{\lambda_2 \cdot (T - T_s) \cdot (F/A)}{d \cdot \rho \cdot c}, \end{aligned}$$

где $\alpha = 29$ – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/м²К; $\varepsilon_{np} = 0.59$ – приведенная степень черноты; $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·град⁴).

По указанной модели определены значения λ_{1i} и λ_{2i} для каждого эксперимента, их средние значения и проведены расчёты нагрева конструкций. Максимальные температуры нагрева конструкций, полученные экспериментальным и расчётным способами, также приведены в табл. 2. Из сравнения экспериментальных и расчётных результатов можно сделать вывод, что предлагаемый метод позволяет с удовлетворительной точностью оценивать предел огнестойкости металлических конструкций с ОВП.

Таблица 2. Эффективные коэффициенты теплопередачи, сравнение экспериментальных и расчётных результатов

Эксперимент	$\lambda_1 \cdot 1000$	$\lambda_2 \cdot 1000$	$T_{\max_{\text{эксп}}}$	$T_{\max_{\text{расч}}}$
1А, Герм	2,47	14,18	700	631
1В, Герм	3,09	7,04	600	628
1С, Герм	1,97	10,17	720	730
1D, Герм	3,83	7,85	590	583
1К, Герм	2,57	7,98	640	670
1L, Герм	4,15	6,51	560	563
Среднее	3,01	8,96	–	–
СПб ВНИИПО	2,84	–	464	504

Для оценки границ применимости разработанного способа было проведено сравнение результатов, полученных на основе проведённого в СПбФ ВНИИПО сертификационного испытания [8] и диаграмм от производителя ОВП Uniterm 38091 фирмы Permatex GmbH [9]. На рис. 5 приведены зависимости температур двутавров № 20, защищённых ОВП Uniterm 38091, полученные в СПбФ ВНИИПО.

- 1 – образец № 1, толщина сухого защитного слоя 2 970 мкм;
- 2 – образец № 2, толщина сухого защитного слоя 3 030 мкм.

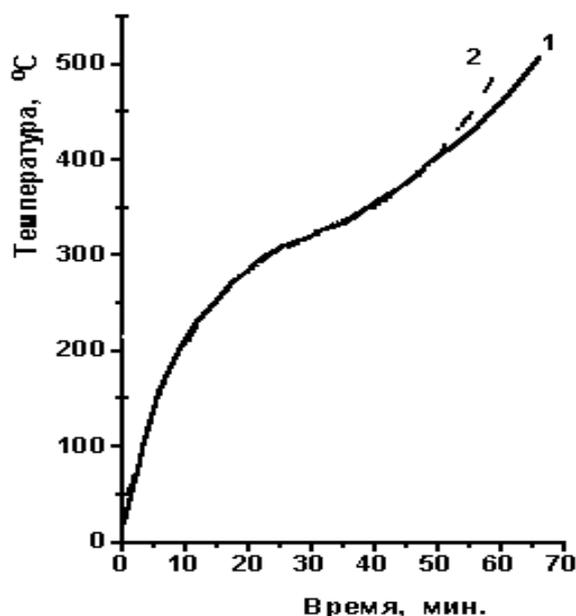


Рис. 5. Изменение средних температур стальных двутавров № 20 с защитным слоем ОВП Uniterm 38091

Термограммы образцов 1 и 2 на рис. 5 до температуры 400 °С совпадают. На участках от 300–400 °С и выше 400 °С они представляют собой практически линейные зависимости. При температуре 300 и 400 °С зависимость имеет точки перегиба. Первая соответствует завершению вспучивания покрытия, вторая – началу его выгорания. Выделены промежутки: 20–300 °С – покрытие не защищает конструкцию или защищает не в полной мере, 300 – 400 °С – покрытие полностью вспучилось, более 400 °С – поверхностные слои покрытия начали выгорать. Обработка результатов испытаний СПбФ ВНИИПО дала следующие значения приведённых свойств ОВП:

$$\begin{aligned} \lambda &= 0.00386 \text{ Вт/(м·К)} \quad \text{при } 300 < t < 400; \\ \lambda &= 0.01651 \text{ Вт/(м·К)} \quad \text{при } t > 400. \end{aligned} \quad (4)$$

Эти данные получены по результатам испытаний с применением колонн двутаврового сечения № 20, то есть с приведённой толщиной 3,4 мм и массивностью 294 м⁻¹. По диаграммам фирмы-производителя [8] для 30, 60, 90 и 120 мин. определены температуры для массивностей 73 и 115 м⁻¹ при толщинах ОВП 1500, 1750 и 2000 мкм. Проведён для расчёт температур стальных конструкций с указанными параметрами при определённом в (4) коэффициенте теплопроводности. В табл. 3 представлены табличные и расчётные результаты, которые, как можно увидеть, сходятся с удовлетворительной точностью.

Таблица 3. Сравнение расчётных и табличных результатов при температуре вспучивания ОВП 300 °С

Массивность, м ⁻¹	73			115		
	Т табл.	Т расч.	Погр., %	Т табл.	Т расч.	Погр., %
Толщина слоя 1500 мкм						
0	20	20	0	20	20	0
30	285	321,6	11,3	307	337,2	8,9
60	428	405,2	5,3	466	460,3	1,2
90	619	557,8	9,8	696	660,6	5,0
120	750	683,2	8,9	804	803,1	0,1
Толщина слоя 1750 мкм						
0	20	20	0	20	20	0
30	255	318,6	19,9	280	332	15,6
60	379	391,4	3,2	411	440,2	6,6
90	552	528,1	4,3	624	624,3	0,04
120	696	644,8	7,3	764	762,7	0,2
Толщина слоя 2000 мкм						
0	20	20	0	20	20	0
30	246	316,3	22,2	263	328,1	19,8
60	358	380,7	5,9	379	424,6	10,7
90	507	504,5	0,5	557	594,3	6,2
120	643	613	4,6	695	727,5	4,4

Литература

- ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования. М.: МНТКС, 1995. 11 с.
- ГОСТ 30247.1–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции. М.: МНТКС, 1995. 11 с.
- Пособие по определению пределов огнестойкости строительных конструкций, параметров пожарной опасности материалов. Порядок проектирования огнезащиты. Справочный материал. М.: ОАО «НИЦ СТРОИТЕЛЬСТВО», 2013. 47 с.
- Тепломассообмен в тепло- и огнезащите с учётом процессов термического разложения, испарения-конденсации, уноса массы и вспучивания-усадки / В.Л. Страхов [и др.] // Математическое моделирование. 2000. Т. 12. № 5.
- NORDTEST METHOD NT FIRE 021. Insulation of Steel Structures: Fire Protection, 1985.
- Andersen N.E. Guidance to the use of Nordtest Method NT FIRE 021 for Fire Testing Interpolation of Structural Steel protected with Intumescent Paint // NORDTEST projekt № 611-86. NT TECHN REPORT 122. DANTEST. 1989.
- Филиал ВНИИПО МВД РФ в Санкт-Петербурге. Независимый испытательный центр пожарной безопасности. Отчёт по испытаниям № 085-04.98 «С».
- Технологическая инструкция по нанесению огнезащитного материала Uniterm 38091 на стальные конструкции. Permatex GmbH, Rieter Tal, 71665 Vaihingen/Enz.