

Инструкция

Определение пределов огнестойкости стальных строительных конструкций с огнезащитным покрытием.

Колмаков Д.В.

Содержание

- 1 Область применения документа.
- 2 Термины и определения
- 3 Описание расчетно-аналитического метода.
- 4 Определение критической температуры.
- 5 Определение фактического предела огнестойкости.
- 6 Определение толщины огнезащитного покрытия для обеспечения заданного предела огнестойкости.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Метод определения времени нагрева образцов элементарных стальных стержневых конструкций с огнезащитным покрытием .

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Метод определения предела огнестойкости элементарной стержневой конструкции с огнезащитным покрытием расчетом по уравнению теплопроводности.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Метод определения предела огнестойкости элементарной стержневой конструкции с огнезащитным покрытием расчетом по уравнению регрессии.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Требования к элементарной стержневой конструкции.

1 Область применения документа.

Инструкция предназначена для определения пределов огнестойкости стальных строительных конструкций с огнезащитным покрытием по признаку R расчетно-аналитическим методом.

Результаты расчетов могут быть использованы при проектировании огнезащиты стальных строительных конструкций.

2 Термины и определения.

В настоящей инструкции применяются следующие термины с соответствующими определениями.

Критическая температура - температура нагрева сечения конструкции (θ_{cr} , °C) при которой ожидается наступление предельного состояния по признаку R за счет снижения прочностных характеристик стали до уровня напряжений, возникающих в конструкции под действием приложенных нагрузок.

3 Описание расчетно-аналитического метода.

Для определения предела огнестойкости стальной строительной конструкции с огнезащитным покрытием расчетно-аналитическим методом необходимо:

- аналитически разложить стальную строительную конструкцию на составляющие ее элементарные стержневые конструкции. Требования к элементарной стержневой конструкции - приложение 4;
- по разделу 4 настоящей инструкции определить критическую температуру прогрева каждой элементарной стержневой конструкций без огнезащитного покрытия;
- по разделу 5 настоящей инструкции определить фактический предел огнестойкости каждой элементарной стержневой конструкции;
- по разделу 6 настоящей инструкции определить толщину огнезащитного покрытия, обеспечивающую заданный предел огнестойкости каждой элементарной стержневой конструкции.

4 Определение критической температуры.

Определить критическую температуру θ_{cr} ($^{\circ}\text{C}$) нагруженной элементарной стержневой конструкции без огнезащитного покрытия по формуле (1).

$$\theta_{cr} = \theta_{cr(i)} + \frac{(\theta_{cr(i+1)} - \theta_{cr(i)})}{(\gamma_{tem(i+1)} - \gamma_{tem(i)})} * (\gamma_{tem} - \gamma_{tem(i)}) \quad , \quad (1)$$

где

θ_{cr} - критическая температура определяемая снижением условного предела текучести стали с допуском 0,2 % на величину пластической деформации, $^{\circ}\text{C}$;

γ_{tem} - коэффициент снижения при температуре условного предела текучести стали с допуском 0,2 % на величину пластической деформации.

$\theta_{cr(i)}$, $\theta_{cr(i+1)}$, $\gamma_{tem(i)}$, $\gamma_{tem(i+1)}$ – значения из таблицы 1 при соблюдении условия $\gamma_{tem(i)} \leq \gamma_{tem} \leq \gamma_{tem(i+1)}$

Таблица 1.

i	$\theta_{cr}, ^{\circ}\text{C}$	γ_{tem}	β_{tem}
1	20	1,00	1,00
2	100	0,99	0,96
3	150	0,93	0,95
4	200	0,85	0,94
5	250	0,81	0,92
6	300	0,77	0,90
7	350	0,74	0,88
8	400	0,70	0,86
9	450	0,65	0,84
10	500	0,58	0,80
11	550	0,45	0,77
12	600	0,34	0,72
13	650	0,22	0,68
14	700	0,11	0,59

γ_{tem} в зависимости от вида нагружения элементарной стержневой конструкции определить по формулам (2-19).

При невозможности или нецелесообразности определения критической температуры для элементарной стержневой конструкции, принять значение критической температуры равным 350 °С.

Общий случай при снижении сопротивления стали по пределу текучести.

$$\gamma_{tem} = \frac{\sigma * \gamma_m}{R_{yn}} , (2)$$

где:

σ - напряжение от действия нагрузки, Па;

R_{yn} - нормативное сопротивление стали по пределу текучести при температуре 20 °С по справочным данным или таблице 2, Па;

γ_m - коэффициент надежности стали.

Таблица 2.

Марка	Толщина проката, мм	R _{yn} , МПа
С235	до 20	235
	св. 20 до 40	225
	св 40 до 100	215
	св 100	195
С245	до 20	245
	св. 20	235
С255	до 10	255
	св. 10 до 20	245
	св. 20	235
С275	до 10	275
	св. 10	265
С285	до 4	285
	св. 4 до 10	275
	св. 10	265
С345	до 10	345
	св. 10 до 20	325
	св. 20 до 40	305
	св. 40 до 60	285

Марка	Толщина проката, мм	R _{yn} , МПа
	св. 60 до 80	275
	св. 80	265
C375	до 10	375
	св. 10 до 20	355
	св. 20	335
C390		390
C440	до 30	440
	св. 30	410
C590		540

Изгибаемый стержень в одной из главных плоскостей.

Принять γ_{tem} равным наибольшей величине определенной по формулам 3 и 4.

$$\gamma_{temM} = \frac{\left(\frac{M}{W}\right) * \gamma_m}{R_{yn}}, \quad (3)$$

$$\gamma_{temQ} = \frac{\left(\frac{S' * Q}{I * t_{min}}\right) * \gamma_m}{0.58 * R_{yn}}, \quad (4)$$

где

γ_{temM} - коэффициент, учитывающий уровень нагружения элементарной стержневой конструкции, по пределу текучести при максимальном изгибающем моменте M ;

γ_{temQ} - коэффициент, учитывающий уровень нагружения элементарной стержневой конструкции, по пределу текучести при максимальной поперечной силе Q ;

M - максимальный изгибающий момент от действия нагрузок вдоль оси изгиба, Н*м;

W - упругий момент сопротивления сечения стержня $W_{x(y)}$ относительно оси изгиба или пластический момент сопротивления сечения стержня $W_{plx(y)}$ относительно оси изгиба по формуле (5) или формуле (6), м³.

$$W_{plx(y)} = 2 * S'_{x(y)}, \quad (5)$$

$$W_{plx(y)} = c_{x(y)} * W_{x(y)}, \quad (6)$$

Q - максимальная поперечная сила, Н;

I - момент инерции сечения стержня относительно оси изгиба, м⁴;

S' - статический момент полусечения стержня относительно оси изгиб, м³;

t_{min} - минимальная толщина сечения по оси изгиба, м;

$c_{x(y)}$ - коэффициенты для расчета с учетом развития пластических деформаций по таблице Е.1 СП 16.13330.2011;

Изгибаемый стержень в двух главных плоскостях.

$$\gamma_{tem} = \frac{\gamma_m}{R_{yn}} * \left(\frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \right) \quad , \quad (7)$$

где

M_x, M_y - максимальные изгибающие моменты от действия нагрузок вдоль главных осей X, Y соответственно, Н*м;

W_x, W_y - упругие моменты сопротивления сечения стержня относительно главных осей X, Y или пластические моменты сопротивления сечения стержня W_{plx}, W_{ply} относительно главных осей X, Y по формуле (5) или формуле (6), м³.

Сжатый стержень.

γ_{tem} определить итерацией с шагом 0,001 по формуле (8).

$$1 - \frac{\gamma_m * N}{\gamma_{tem} * R_{yn}} * \left(\frac{e_0}{W_{min}} + \frac{I}{\varphi * A} \right) \leq 0.01 \quad , \quad (8)$$

где

N - усилие от действия нагрузки, Н;

A - площадь поперечного сечения, м²;

φ - коэффициент устойчивости при центральном сжатии по формуле (9).

$$\varphi = \frac{0,5 * (\delta - \sqrt{(\delta^2 - 39,48 * \bar{\lambda}^2)})}{\bar{\lambda}^2} \quad , \quad (9)$$

$$\delta = 9,87 * (1 - \alpha + \beta * \bar{\lambda}) * \bar{\lambda}^2 \quad , \quad (10)$$

где

$\bar{\lambda}$ - условная гибкость стержня по формуле (10) при температуре θ_{cr} .

α, β - коэффициенты, по таблице 7 СП 16.13330.2011 для сечений типа С.

$$\bar{\lambda} = \lambda * \sqrt{\frac{\gamma_{tem} * R_{yn}}{\gamma_m * \beta_{tem} * E}}, \quad (11)$$

где

λ - гибкость стержня по формуле (12);

β_{tem} - коэффициент снижения модуля упругости стали при температуре θ_{cr} по таблице 2;

E - модуль упругости стали при температуре 20 °С, Па. $E = 206000 * 10^6$ Па.

$$\lambda = \frac{L}{i_{min}}, \quad (12)$$

где

L - расчетная длина стержня, в зависимости от вида опирания и длины стержня L_0 , м;

i_{min} - минимальный радиус инерции по формуле (13), м.

$$i_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}}, \quad (13)$$

где

I_{min} - минимальный момент инерции сечения стержня, м⁴.

e_0 - эксцентриситет приложения нагрузки N , м.

W_{min} - минимальный упругий момент сопротивления сечения или минимальный пластический момент сопротивления сечения стержня W_{plmin} по формуле (5) или (6), м³.

Для сквозных колонн при условии $I_{min} = I_y$ в формуле (11) вместо значения гибкости λ использовать значение приведенной гибкости λ_{np} по формуле (14).

$$\lambda_{np} = \mu_{np} * \lambda, \quad (14)$$

где

μ_{np} - коэффициент приведения составного стержня по формуле (15) при соединении ветвей сквозной колонны планками или по формуле (16) при соединении ветвей сквозной колонны решеткой.

$$\mu_{np} = \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_e}{\lambda_y}\right)^2}, \quad (15) \quad \mu_{np} = \sqrt{1 + \frac{27 * A}{\lambda_y^2 * A_p}}, \quad (16)$$

где

A_p - площадь сечения двух раскосов решеток, м².

λ_y гибкость стержня относительно свободной оси Y .

$$\lambda_y = \frac{L}{i_y}, \quad (17)$$

где

i_y - радиус инерции сечения относительно свободной оси Y ;

λ_s - гибкость ветви относительно собственной оси Y между планками.

$$\lambda_s = \frac{L_{pl}}{i_{ey}} \quad , \quad (18)$$

где

L_{pl} - расстояние между планками;

i_{ey} - радиус инерции ветви относительно собственной оси Y .

Растянутый стержень.

γ_{tem} определить по формуле (8) при $\varphi=1$.

Сжато-изгибаемый и растянуто изгибаемых стержень в одной или двух главных плоскостях

γ_{tem} для сжато-изгибаемого стержня определить итерацией с шагом 0,001 по формуле (19).

$$1 - \frac{N * \gamma_m}{A * R_{yn} * \gamma_{tem} * \varphi} - \frac{M_x * \gamma_m}{W_x * R_{yn} * \gamma_{tem}} - \frac{M_y * \gamma_m}{W_y * R_{yn} * \gamma_{tem}} \leq 0,01 \quad , \quad (19)$$

γ_{tem} для растянуто-изгибаемого стержня определить по формуле (19) при $\varphi=1$.

5 Определение фактического предела огнестойкости.

Определить фактический предел огнестойкости элементарной стержневой конструкции без огнезащитного покрытия (R_0 , мин) по формуле (20) итерацией.

$$R_0 = \frac{i}{60} \quad , \quad (20) \quad \text{при} \quad (Tk_{(i)} \leq (\theta_{cr} + 273) \leq Tk_{(i+1)}) \quad ,$$

где

i - счетчик итерации $i=i+1$. Значение счетчика итерации равно значению времени, с.

$Tk_{(i+1)}$, $Tk_{(i)}$ - температура стали элементарной стержневой конструкции по формуле (21), К.

$$Tk_{(i+1)} = Tk_{(i)} + \frac{\Phi * k_f * \alpha_{(i)} * (T\theta_{(i)} - Tk_{(i)})}{\rho s * tred * C_{tem}} \quad , \quad (21)$$

где

Φ - угловой коэффициент облученности, по таблице 3;

k_f - поправочный коэффициент для учета влияния теневого эффекта, по таблице 3;

$\alpha_{(i)}$ - коэффициент теплообмена по формуле (22), Вт/(м²*К);

$T_{в(i)}$ - температура нагревающей среды, К; по таблице 3;

t_{red} - приведенная толщина по формуле (23), м;

C_{tem} - удельная теплоемкость стали, Дж/(кг К), по таблице 3;

ρ_{cm} - плотность стали, $\rho_{cm}=7850$ кг/м³.

$$\alpha_{(i)} = \alpha_c + \sigma * \varepsilon_{red} * \frac{(T_{в(i)}^4 - T_{к(i)}^4)}{T_{в(i)} - T_{к(i)}}, \quad (22)$$

где

α_c - коэффициент теплопередачи конвекцией, Вт/(м² *К), по таблице 3.

σ - постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м² К⁴), $\sigma=5,67*10^{-8}$;

ε_{red} - приведенная степень черноты системы «нагревающая среда-поверхность конструкции» по формуле (24), (25).

$$t_{red} = \frac{A}{U}, \quad (23)$$

где

U - обогреваемый периметр стержневой элементарной конструкции (м);

A - площадь поперечного сечения элементарной конструкции, м²;

$$\varepsilon_{red} = \frac{I}{\left(\frac{I}{\varepsilon} + \frac{I}{\varepsilon_0} - I\right)}, \quad (24) \quad \text{при } (\varepsilon < 1),$$

$$\varepsilon_{red} = \varepsilon * \varepsilon_0, \quad (25) \quad \text{при } (\varepsilon = 1),$$

где

ε - степень черноты пламени, по таблице 4;

ε_0 - степень черноты обогреваемой поверхности стальной конструкции, по таблице

3.

Таблица 3.

Показатель	По данным СССР	По EN 1991-1-2, EN 1993-1-2
C_{tem} – удельная теплоемкость стали, Дж/(кг К)	$C_{tem} = 440 + 0.48 * (T_{к(i)} - 273)$	при $(T_{к(i)} - 273) \leq 600$. $C_{tem} = 425 + 0.773 * (T_{к(i)} - 273) + 0.00169 * (T_{к(i)} - 273)^2 + 0.00000222 * (T_{к(i)} - 273)$

Показатель	По данным СССР	По EN 1991-1-2, EN 1993-1-2
		<p>при $600 < (T_{k(i)} - 273) \leq 735$</p> $C_{tem} = 666 + \frac{13002}{738 - (T_{k(i)} - 273)}$ <p>при $735 < (T_{k(i)} - 273) \leq 900$</p> $C_{tem} = 545 + \frac{17820}{(T_{k(i)} - 273) - 731}$ <p>при $(T_{k(i)} - 273) > 900$</p> $C_{tem} = 650$
α_c - коэффициент теплопередачи конвекцией, Вт/(м² *К)	<u>Стандартный температурный режим</u> $\alpha_c = 29$	<u>Стандартный температурный режим</u> $\alpha_c = 25$ <p><u>Температурный режим наружного пожара</u> $\alpha_c = 25$</p> <p><u>Температурный режим пожара углеводородов</u> $\alpha_c = 50$</p>
ε - степень черноты пламени	0,85	1
ε_0 - степень черноты обогреваемой поверхности стальной конструкции	0,74	0,8
Φ - угловой коэффициент облученности		1
k_f - поправочный коэффициент для учета		1

Показатель	По данным СССР	По EN 1991-1-2, EN 1993-1-2
влияния теневого эффекта		
$T_{в(i)}$ - температура нагревающей среды, К	<p><u>Стандартный температурный режим</u></p> $T_{в(i)} = 345 * \log(0.133 * i + 1) + 293$	<p><u>Стандартный температурный режим</u></p> $T_{в(i)} = 345 * \log(0.133 * i + 1) + 293$ <p><u>Температурный режим наружного пожара</u></p> $T_{в(i)} = 660 * (1 - 0.687 * e^{\frac{-0.32 * i}{60}} - 0.313 * e^{\frac{-3.8 * i}{60}}) + 293$ <p><u>Температурный режим пожара углеводородов</u></p> $T_{в(i)} = 1080 * (1 - 0.325 * e^{\frac{-0.167 * i}{60}} - 0.625 * e^{\frac{-2.5 * i}{60}}) + 293$

Результат расчета R_0 сравнить с требуемым пределом огнестойкости конструкции R .

При выполнении условия ($R_0 \geq R$) повышение предела огнестойкости конструкции применением огнезащитного покрытия не требуется.

6 Определение толщины огнезащитного покрытия для обеспечения заданного предела огнестойкости.

Определить толщину огнезащитного покрытия (d , мм) по формуле (26)

$$d = d_{(i)} + \frac{(d_{(i+1)} - d_{(i)})}{(tred_{(i+1)} - tred_{(i)})} * (tred - tred_{(i)}) \quad , (26)$$

где

- $d_{(i+1)}$, $d_{(i)}$, $tred_{(i+1)}$, $tred_{(i)}$ – значения результатов расчетов пределов огнестойкости элементарных стержневых конструкций с огнезащитным покрытием по приложению 2 или приложению 3 настоящей инструкции в форме табличных представлений для требуемого предела огнестойкости R и нормированной критической температуры (θ_{crn} , °C), при выполнении условий:

- $tred_{(i)} \leq tred \leq tred_{(i+1)}$,

- $(\theta_{crn} - \theta_{cr}) \leq 0$,

- $|\theta_{crn} - \theta_{cr}|$ - минимальная величина из нормированных значений критических температур.

**Метод определения времени нагрева образцов элементарных стальных
стержневых конструкций с огнезащитным покрытием.**

1 Сущность метода заключается в определении времени от начала теплового воздействия на стандартные образцы с огнезащитным покрытием планируемой толщины, до достижения образцами заданной температуры при стандартном температурном режиме по формуле (1.1) в стандартных условиях испытанием.

$$\theta = 345 * \lg(8\tau + 1) + \theta_n, \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ (1.1)}$$

где

τ – время теплового воздействия, мин;

θ – температура нагревающей среды, $^\circ\text{C}$;

θ_n – начальная температура нагревающей среды, $^\circ\text{C}$.

2 Образцы для испытаний.

В качестве образцов для испытаний использовать стальные колонны двутаврового сечения длиной 1,0 – 1,7 метра с приведенной толщиной t_{red} и средней толщиной покрытия d .

Приведенную толщину образцов определить перед нанесением огнезащитного материала обмером.

Нанести огнезащитный материал в соответствии с технической документацией.

Выдержать образцы перед испытанием в соответствии с технической документацией.

Определить среднюю толщину огнезащитного покрытия d на образце в соответствии ГОСТ Р 53295 перед испытанием образца. Требование по отклонению толщины огнезащитного покрытия на образце в соответствии с ГОСТ Р 53295.

3 Оборудование для испытаний в соответствии с П. 5.2 ГОСТ Р 53295.

4 Подготовка и проведение к испытаний образца в соответствии с П. 5.4 ГОСТ Р 53295.

Дополнительные требования:

- испытание проводить до достижения показаний всех термопар установленных на образце заданной температуры;
- регистрировать результаты измерений температур при испытании с периодичностью не более 30 секунд.

5 Задokumentировать результаты испытаний.

Документ по результатам испытаний образца должен содержать следующую информацию:

- идентификацию образца на марке огнезащитного материала;
- техническое описание огнезащитного покрытия ;
- данные по определению приведенной толщины образца;
- среднюю толщину огнезащитного покрытия;
- результаты измерений температуры нагревающей среды всеми термопарами с периодичностью не более 30 секунд от начала испытания до достижения показаний всеми термопарами установленных на образце заданной температуры;
- результаты измерений температуры образца всеми термопарами, установленными на образце с периодичностью не более 30 секунд от начала испытания до достижения заданной температуры;
- результаты расчета средних значений результатов измерений температуры нагревающей среды ($\theta(\tau)$, °C) и температуры образца ($\theta_{обр}(\tau)$, °C) с периодичностью 30 секунд от начала испытаний до достижения показаний всеми термопарами, установленными на образце заданной температуры.

Метод определения предела огнестойкости элементарной стержневой конструкции с огнезащитным покрытием расчетом по уравнению теплопроводности.

1 Сущность метода заключается в определении времени достижения (τ , мин) критической температуры (θ_{cr} , °C) при тепловом воздействии на элементарную стальную стержневую конструкцию с огнезащитным покрытием толщиной d (мм) при стандартном температурном режиме численным решением уравнения теплопроводности.

2 Для определения использовать результаты испытаний образцов с огнезащитным покрытием, по приложению 1 настоящей инструкции.

3 Скорректировать значение температуры стали ($\theta_{обр(t)}$, °C) для каждого испытанного образца при времени (t , с) по формуле (2.1).

$$\theta_s = \gamma_n * \theta_{обр}(t) \quad , (2.1)$$

где

γ_n – коэффициент устойчивости к разрушению огнезащитного покрытия. $\gamma_n = 1,00 \div 1,10$;

$\theta_{обр}(t)$ – среднее значение температуры стали образца при времени t (с), определенное по приложению 1 настоящей инструкции.

4 Рассчитать коэффициент фиктивной теплопроводности (λ , Вт/(м*С)) по формуле (2.2) для каждого испытанного образца при времени t (с).

$$\lambda = d * \left(\frac{\Delta \theta_s}{\Delta t}(i) + (e^{\mu/10} - 1) * \frac{\Delta \theta}{\Delta t}(i) \right) * t * red_0 * \rho_s * C_{tem} * \frac{(1 + \mu/3)}{(\theta - \theta_s)} \quad , (2.2)$$

где

d – средняя толщина огнезащитного покрытия (м);

θ_s – температура стали (°C) образца при времени t (с) по формуле (2.1);

θ – среднее значение результата измерения температуры нагревающей среды (°C), при времени t (с);

$\frac{\Delta \theta_s}{\Delta t}(i)$ – изменение температуры стали образца при времени t (с) по формуле (2.3)

$$\frac{\Delta \theta_s}{\Delta t}(i) = \frac{\theta_s(i+1) - \theta_s(i)}{t(i+1) - t(i)} ; \quad (2.3)$$

$\frac{\Delta \theta}{\Delta t}(i)$ - изменение температуры нагревающей среды по формуле (2.4) ;

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta t}(i) = \frac{\theta(i+1) - \theta(i)}{t(i+1) - t(i)} ; \quad (2.4)$$

i - номер единичного результата испытаний образца при времени t (с);

μ -коэффициент, учитывающий теплоемкости огнезащитного покрытия и стали по формуле (2.5).

$$\mu = \frac{C_p * \rho_p}{C_{tem} * \rho_s} * d * \frac{1}{tred_0} , \quad (2.5)$$

где

C_p теплоемкость огнезащитного покрытия (Дж/(кг*С)), $C_p=1000$ кДж/(кг*С);

C_{tem} - теплоемкость стали (Дж/(кг*С)), определяемая по формуле (2.6);

$$C_{tem} = 440 + 0.48 * \theta_s , \quad (2.6);$$

ρ_s -плотность стали (кг/м³), $\rho_s=7850$ кг/м³;

ρ_p -плотность огнезащитного покрытия (кг/м³);

$tred_0$ - приведенная толщина образца с огнезащитным покрытием, для двутаврового сечения определить по формуле (2.7), м.

$$tred_0 = \frac{A}{(2 * (b + 2d) + 2 * (b - t_w) + 2 * (h + 2d))} , \quad (2.7)$$

где b -ширина полки (м), h -высота (м), t_w – толщина стенки (м), A - площадь поперечного сечения (м²).

5 Определить температуру покрытия (θ_p , °С) для каждого значения фиктивной теплопроводности λ для каждого образца по формуле (2.8).

$$\theta_p = \frac{(\theta_s + \theta)}{2} \quad (2.8)$$

6 Привести рассчитанные значения фиктивной теплопроводности λ при времени t к значениям фиктивной теплопроводности λ при температуре покрытия θ_p в диапазоне температур 50-950 °С с шагом по температуре 10 °С для каждого образца интерполяцией.

7 Рассчитать для каждого образца среднее арифметические значения фиктивной теплопроводности λ_m по значению фиктивной теплопроводности $\lambda(\theta_p)$ в диапазоне температур 50-950 °С с интервалом 50 °С.

8 Рассчитать по всем образцам среднее арифметическое значения фиктивной теплопроводности λ_{ave} и стандартное отклонения $\lambda_{ско}$ по значениям фиктивной теплопроводности λm в температурном диапазоне 250-950 °С с интервалом 50 °С.

9 Рассчитать температуру стальной конструкции с огнезащитным покрытием θ_s численным интегрированием с постоянным шагом по времени ht дифференциального уравнения (2.9) для каждого образца.

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{\lambda_{ave}}{d} * \frac{1}{tred_0} * \frac{1}{\rho s * Ctem} * \frac{1}{(1 + \frac{\mu}{3})} * (\theta - \theta_s) - (e^{\frac{\mu}{10}} - 1) * \frac{d\theta}{dt}, \quad (2.9)$$

где

θ – температура нагревающей среды °С) определяется по формуле (2.10),

$$\theta = 345 * \log(0.133 * t + 1) + 20 \quad (2.10)$$

$\frac{d\theta}{dt}$ - производная по температуре нагревающей среды, определяемая по формуле (2.11).

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{345 * 0.133}{(0.133 * t + 1) * \ln(10)} \quad (2.11)$$

θ_s в момент времени $(t + ht, c)$ рассчитать по формулам (2.12-2.16).

$$\theta_s(t + ht) := \theta_s(t) + \frac{(K1 + 2 * K2 + 2 * K3 + K4)}{6} \quad (2.12)$$

$$K1 := ht * \frac{d\theta_s}{dt}(t, \theta_s) \quad (2.13)$$

$$K2 := ht * \frac{d\theta_s}{dt}(t + \frac{ht}{2}, \theta_s + \frac{K1}{2}) \quad (2.14)$$

$$K3 := ht * \frac{d\theta_s}{dt}(t + \frac{ht}{2}, \theta_s + \frac{K2}{2}) \quad (2.15)$$

$$K4 := ht * \frac{d\theta_s}{dt}(t + ht, \theta_s + K3) \quad (2.16)$$

$tred_0, \theta p, \mu, Ctem$ рассчитывать по формулам (2.5-2.7) при θ_s и θ равной аргументам $K1, K2, K3, K4$ соответственно.

$\lambda_{ave}(\theta p)$ рассчитывать интерполяцией результатов расчета по П.8 приложения 2 настоящей инструкции.

$ht = 1 c$.

10 Сравнить результаты расчета температур ($\theta_s, ^\circ C$) всех образцов с огнезащитным покрытием толщиной d с результатами испытаний образцов с огнезащитным

покрытием толщиной d по времени достижения температур 350°C , 400°C , 450°C , 500°C , 550°C , 600°C , 650°C и 700°C .

Определить разницу между результатами испытаний и расчетными значениями по времени достижения каждой заданной температуры для каждого образца, сумму значений разниц по времени достижения заданной температуры, количество положительных значений разниц по времени достижения заданной температуры.

Результаты расчета считать приемлемыми при выполнении условий:

- положительная разница по времени достижения для каждой заданной температуры каждого образца не должен превышать результат испытаний более чем на 30 %;
- сумма значений разниц по времени достижения всех заданных температур для всех образцов должна быть меньше нуля;
- количество положительных значений разниц для всех заданных температур всех образцов не должна превышать 20 % от всего количества значений.

11 При невыполнении одного или нескольких условий П. 10 приложения 2 настоящей инструкции корректировать значения λ_{ave} по формуле (2.17) до выполнения условий.

$$\lambda_{char} = \lambda_{ave} + K * \lambda_{ско}, \quad (2.17)$$

где

λ_{ave} - коэффициент фиктивной теплопроводности по П.8 приложения 2 настоящей инструкции;

K – наименьший коэффициент коррекции, определяется подбором;

$\lambda_{ско}$ - стандартное отклонение по П.8 приложения 2 настоящей инструкции.

Результат коррекции проверять по П.9 и П.10 приложения 2 настоящей инструкции при $\lambda_{ave} = \lambda_{char}$.

12 Значения λ_{char} при которых выполняются условия П. 10 приложения 2 настоящей инструкции использовать для расчета толщины огнезащитного покрытия d для обеспечения заданного предела огнестойкости R элементарной стержневой конструкции с приведенной толщиной t_{red} при критической температуре θ_{crn} .

Ограничительные условия при расчете по толщине $((d_{min} - 0.2 * d_{min}) \leq d \leq (d_{max} + 0.2 * d_{max}))$, по приведенной толщине от $(t_{red_{min}} - 0.2 * t_{red_{min}})$ до $(t_{red_{max}} + 0.5 * t_{red_{max}})$, где:

d_{min} - минимальная толщина огнезащитного покрытия из испытанных стандартных образцов, по приложению 1 настоящей инструкции;

d_{max} - максимальная толщина огнезащитного покрытия из испытанных стандартных образцов, по приложению 1 настоящей инструкции ;

$tred_{min}$ – минимальная приведенная толщина из испытанных стандартных образцов по приложению 1 настоящей инструкции;

$tred_{max}$ – максимальная приведенная толщина из испытанных стандартных образцов по приложению 1 настоящей инструкции.

13 Расчет провести для нормированных критических температур прогрева θ_{crit} 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 650 °C, 700 °C и пределов огнестойкости R15, R30, R45, R60, R90, R120, R150, R180, R240.

Результаты расчета для каждого предела огнестойкости R_x представить в табличной форме. Форма таблицы – таблица 2.1.

Таблица 2.1 Толщина огнезащитного покрытия для обеспечения предела огнестойкости R_x несущей стальной конструкции.

i	Приведенная толщина, $tred$ (мм)	$\theta_{crit}, ^\circ C/d, \text{ мм}$							
		350	400	450	500	550	600	650	700
1									

где:

R_x - предел огнестойкости стальной строительной конструкции с огнезащитным покрытием равный 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180 или 240.

Метод определения предела огнестойкости элементарной стержневой конструкции с огнезащитным покрытием расчетом по уравнению регрессии.

1 Сущность метода заключается в определении времени достижения (τ , мин) критической температуры (θ_{cr} , °C) при тепловом воздействии на элементарную стальную стержневую конструкцию с огнезащитным покрытием толщиной d (мм) по уравнению регрессии (3.1).

$$\tau = A00 + A10 * d + A20 * d * tred + A30 * \theta_{cr} + A40 * d * \theta_{cr} + A50 * d * \theta_{cr} * tred + A60 * \theta_{cr} * tred + A70 * tred, \quad (3.1)$$

2 Для расчета коэффициентов регрессии использовать результаты испытаний образцов с огнезащитным покрытием по приложению 1 настоящей инструкции.

Скорректировать значение температуры стали ($\theta_{обр(\tau)}$, °C) для каждого испытанного образца при времени (τ , мин) по формуле (3.2).

$$\theta_s = \gamma_n * \theta_{обр}(\tau), \quad (3.2)$$

где

γ_n – коэффициент устойчивости к разрушению огнезащитного покрытия. $\gamma_n = 1,00 \div 1,10$.

$\theta_{обр}(\tau)$ – среднее значение температуры стали образца при времени (τ , мин), определенное по приложению 1 настоящей инструкции.

Определить времена достижения (τ_i , мин) температур (θ_{crn}) равных 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 650 °C, 700 °C для каждого испытанного образца с огнезащитным покрытием толщиной d и приведенной толщиной $tred$.

Определить коэффициенты регрессии $A00, A10, A20, A30, A40, A50, A60, A70$ любым приемлемым способом при $\theta_{cr} = \theta_{crn}$, времени (τ_i , мин), d и $tred$.

3 Рассчитать время достижения (τ_c , мин) температуры (θ_{crn} , °C) 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 650 °C, 700 °C с приведенной толщиной $tred$ с огнезащитным покрытием толщиной d (мм) по формуле (3.1).

4 Сравнить результаты расчета температур всех образцов с огнезащитным покрытием толщиной d с результатами испытаний образцов с огнезащитным

покрытием толщиной d по времени достижения температур 350°C , 400°C , 450°C , 500°C , 550°C , 600°C , 650°C и 700°C .

Определить разницу между расчетными значениями и результатами испытаний по времени достижения каждой заданной температуры для каждого образца, сумму значений разниц по времени достижения заданной температуры, количество положительных значений разниц по времени достижения заданной температуры.

Результаты расчета считать приемлемыми при выполнении условий:

- положительная разница по времени достижения для каждой заданной температуры каждого образца не должен превышать результат испытаний более чем на 30 %;
- сумма значений разниц по времени достижения всех заданных температур для всех образцов должна быть меньше нуля;
- количество положительных значений разниц для всех заданных температур всех образцов не должна превышать 20 % от всего количества значений.

5 При невыполнении одного или нескольких условий П. 4 приложения 3 настоящей инструкции корректировать значения коэффициентов регрессии $A00$, $A10$, $A20$, $A30$, $A40$, $A50$, $A60$, $A70$ умножением на коэффициент коррекции K до выполнения условий.

Результат коррекции проверять по П. 3 и П. 4 приложения 3 настоящей инструкции.

6 Значения коэффициентов регрессии $A00$, $A10$, $A20$, $A30$, $A40$, $A50$, $A60$, $A70$ при которых выполняются условия П. 4 приложения 3 настоящей инструкции использовать для расчета толщины огнезащитного покрытия d для обеспечения заданного предела огнестойкости R элементарной стержневой конструкции с приведенной толщиной $tred$ при критической температуре θ_{crn} по формуле (3.3).

$$d = \frac{(Rx - A00 - A30 * \theta_{crn} - A60 * \theta_{crn} * tred - A70 * tred)}{(A10 + A20 * tred + A40 * \theta_{crn} + A50 * \theta_{crn} * tred)}, \quad (3.3)$$

где

- Rx - предел огнестойкости стальной строительной конструкции с огнезащитным покрытием равный 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180 или 240, мин.

Ограничительные условия при расчете по толщине $((d_{min} - 0.05 * d_{min}) \leq d \leq (d_{max} + 0.05 * d_{max}))$, по приведенной толщине от $(tred_{min} - 0.1 * tred_{min})$ до $(tred_{max} + 0.1 * tred_{max})$, где:

d_{min} - минимальная толщина огнезащитного покрытия из испытанных стандартных образцов, по приложению 1 настоящей инструкции;

d_{max} - максимальная толщина огнезащитного покрытия из испытанных стандартных образцов, по приложению 1 настоящей инструкции ;

$tred_{min}$ – минимальная приведенная толщина из испытанных стандартных образцов по приложению 1 настоящей инструкции;

$tred_{max}$ – максимальная приведенная толщина из испытанных стандартных образцов по приложению 1 настоящей инструкции.

7 Расчет провести для нормированных критических температур прогрева θ_{crn} 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 650 °C, 700 °C и пределов огнестойкости R15, R30, R45, R60, R90, R120, R150, R180, R240.

Результаты расчета для каждого предела огнестойкости R_x представить в табличной форме. Форма таблицы – таблица 3.1.

Таблица 3.1 Толщина огнезащитного покрытия для обеспечения предела огнестойкости R_x несущей стальной конструкции.

	Приведенная толщина, $tred$ (мм)	$\theta_{crn}, ^\circ C/d, \text{ мм}$							
		350	400	450	500	550	600	650	700

где:

R_x - предел огнестойкости стальной строительной конструкции с огнезащитным покрытием равный 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180 или 240.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Требования к элементарной стержневой конструкции.

Элементарная стержневая конструкция должна иметь одно из следующих постоянных сечений:

- двутавр;
- неравнополочный двутавр;
- двутавр с отогнутыми гранями полок;
- швеллер;
- тавр;
- уголок;
- прямоугольная труба;
- круглая труба;
- круглый стержень;
- прямоугольный стержень;
- крестообразное сечение;
- уголок;
- коробчатое сечение;
- крестообразное сечение из тавров;
- коробчатое сечение из двутавров;
- сквозное коробчатое сечение из швеллеров;
- сквозное коробчатое сечение из двутавров;
- сквозное двутавровое сечение из швеллеров;
- крестообразное сечение усиленное уголками;
- крестообразное сечение из двух уголков;
- коробчатое сечение из двутавра и полос по бокам;
- сечение из двух швеллеров и двух горизонтальных листов;
- тавровое сечение из пластины и уголков.

Элементарная стержневая конструкция должна иметь постоянные размеры поперечного сечения по длине.