УДК 691

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-3-54-63

© Н. В. Бегунова, старший преподаватель
(Ижевский государственный технический
университет им. М. Т. Калашникова,
Ижевск, Россия)

E-mail: tysiakia@gmail.com

© В. Н. Возмищев, заместитель ген. директора
(ООО «КомАР», Ижевск, Россия)

E-mail: vozmishev60@mail.ru

© N. V. Begunova, senior lecturer
(Kalashnikov Izhevsk State
Technical University,
Izhevsk, Russia)

E-mail: tysiakia@gmail.com

© V. N. Vozmishchev, deputy CEO
(ООО «KomAR», Izhevsk, Russia)

E-mail: vozmishev60@mail.ru

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВАНИИ ИСПЫТАНИЙ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ В БЕТОННЫХ БАЛКАХ, АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОКОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРОЙ

TEMPERATURE DISTRIBUTION BASED ON FIRE RESISTANCE TESTS IN FIBERGLASS REINFORCED CONCRETE BEAMS

Приводятся исследования по распределению температуры в бетонных балках, армированных стеклокомпозитной арматурой производства ООО «КомАР» по ТУ 2296-001-24488682–2014, на основании испытаний на огнестойкость, проведенных в испытательной лаборатории научно-испытательного центра пожарной безопасности ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Приведено определение значения коэффициента условий работы композитной арматуры γ_{st} по аналогии с СП 27.13330.2017 «Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур» в зависимости от температуры.

Ключевые слова: стеклокомпозитная арматура, бетонная балка, огнестойкость, коэффициент условий работы композитной арматуры.

The article presents the results of the study on the temperature distribution in fiberglass reinforced concrete beams produced by the KomAR in accordance with TU 2296-001-24488682–2014, on the basis of fire tests conducted in the test laboratory and test center for fire safety at the FGBU VNIIPPO of EMERCOM of Russia. The value of the coefficient of working conditions of fiberglass rebar γ_{st} is determined by analogy with SP 27.13330.2017 «Concrete and reinforced concrete structures designed to work in conditions of exposure to elevated and high temperatures», depending on the temperature.

Keywords: fiberglass rebar, concrete beam, fire resistance, coefficient of working conditions of fiberglass rebar.

Результаты сравнительных испытаний на огнестойкость бетонных балок, армированных стеклокомпозитной арматурой производства ООО «КомАР» по ТУ 2296-001-24488682–2014¹ и металлической арматурой А500С, приведены в статье [1]. Балки были изготовлены из тяжелого бетона на гранитном заполнителе класса по прочности на сжатие В20 на заводе ООО

¹ ТУ 2296-001-24488682–2014. Арматура стеклокомпозитная «КомАР». Технические условия.

«Завод железобетонных изделий» (Ижевск, Новосмирновская ул., 22). По результатам испытаний класс бетона определен как В25. Опытные образцы балки марки БКП-20 были армированы стеклокомпозитной арматурой (АСК) по ТУ 2296-001-24488682–2014 с величиной защитного слоя бетона до низа продольной рабочей арматуры 20 мм (схема армирования представлена на рис. 1), образцы балки марки БК-30 (АСК) —

Рис. 1. Схема армирования балки марки БКП-20

Рис. 2. Схема армирования балки марки БК-30

с величиной защитного слоя бетона до низа продольной рабочей арматуры 30 мм (рис. 2).

Испытания на огнестойкость опытных образцов конструкций бетонных балок, армированных стеклокомпозитной арматурой, проводились под действием статической нагрузки, приложенной к двум точкам рабочего пролета балок. Условия проведения испытаний: температура окружающей среды 14 °С, относительная влажность воздуха 50 %, скорость движения воздуха не более 0,5 м/с.

Величина нагрузки определена по результатам испытаний балок, проведенных в КазГАСУ. Материалы испытаний приведены в статье [2]. Схема приложения нагрузки представлена на рис. 3. Величина нагрузки при испытаниях балок БКП-20 и БК-30 — 18,1 кН (1850 кгс на каждую точку рабочего пролета балок), общая нагрузка — 36,2 кН (3700 кгс).

Опытные образцы подвергались трехстороннему тепловому воздействию по стандартному температурному режиму согласно ГОСТ 30247.0–94². Верхняя (необогреваемая) поверх-

ность изолировалась плитами из минеральной ваты толщиной 100 мм.

Кривые изменения температур и прогибов опытных образцов конструкций бетонных балок БКП-20 и БК-30 представлены на рис. 4 и 5 соответственно. Средние температуры в огневой камере не превышали допустимых отклонений по ГОСТ 30247.0–94.

Для сопоставления данных, полученных по итогам огневых испытаний, с расчетными данными определим значения температур в поперечном сечении балки³. Распределение температур в балке при трехстороннем огневом воз-

³ Рекомендации по расчету пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1986. 40 с.

Рис. 3. Схема приложения нагрузки

² ГОСТ 30247.0–94 (ИСО 834–75). Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.

Рис. 4. Кривые изменения температур и прогибов опытных образцов конструкций бетонных балок БКП-20

Рис. 5. Кривые изменения температур и прогибов опытных образцов конструкций бетонных балок БК-30

действию определяем по формуле (20) указанных Рекомендаций³:

$$t = 1220 - 1200 \left[1 - (1 - r_1)^2 - (1 - r_2)^2 \right] \times \left[1 - (1 - r_3)^2 \right],$$

где r — относительные расстояния от обогреваемой поверхности до рассматриваемой точки:

$$r_i = \frac{x_i^*}{L} \leq 1,$$

где L — толщина, м, начавшего прогреться слоя бетона:

$$L = (12a_{red}\tau)^{\frac{1}{2}},$$

где τ — время обогрева конструкции, ч; a_{red} — осредненный коэффициент теплопроводности, м²/ч.

В формуле (20) Рекомендаций³ вместо числа 1220 принимаем 1214, так как начальная температура при испытаниях была +14 °С.

Распределение температуры в балке в местах расположения арматуры (толщина защитного слоя 26 мм и 36 мм) при времени огневого воздействия $\tau = 38$ мин и $\tau = 44$ мин, рассчитанное по Рекомендациям³, приведено на рис. 6.

Кроме того, расчет значений температуры внутри балки был проведен по методике А. И. Яковлева [3] при обогреве с трех сторон по формулам (1.28), (1.19), (1.15) [3]:

$$t_{xy} = t_b - \frac{(t_b - t_x)(t_b - t_y)}{t_b - t_n},$$

где t_b — температура по стандартному температурному режиму (внутри камеры испытаний); t_n — начальная температура балки; t_x, t_y — температуры одномерных полей; t_{xy} — температура двухмерного поля.

$$t_x = 1523 - (1523 - t_n) \left(\operatorname{erf} \frac{\varepsilon}{2\sqrt{F_0}} + \operatorname{erf} \frac{2 - \varepsilon}{2\sqrt{F_0}} - 1 \right),$$

$$\text{где } \varepsilon = 1 - \frac{x}{(0,5\delta + 60k\sqrt{a_{пр}})},$$

где x — расстояние от центра до расчетной точки по толщине балки; δ — толщина балки, $a_{пр}$ — приведенный коэффициент теплопроводности; k — коэффициент, зависящий от плотности сухого бетона, принимаемый по табл. 1.3 [3].

$$t_y = 1523 - (1523 - t_n) \operatorname{erf} X,$$

Распределение температур °С
при огневом воздействии
в балке $\tau = 38$ мин = 0,63 ч

Распределение температур °С
при огневом воздействии
в балке $\tau = 44$ мин = 0,73 ч

Рис. 6. Распределение температуры в балке в местах расположения арматуры

Распределение температур °С
при огневом воздействии
в балке $\tau = 38$ мин = 0,63 ч

Распределение температур °С
при огневом воздействии
в балке $\tau = 44$ мин = 0,73 ч

Рис. 7. Распределение температуры в балке в местах расположения арматуры

где $\operatorname{erf} X$ — функция ошибок Гаусса;

$$X = \frac{60k + \frac{y + k_1 d}{2\sqrt{\tau}}}{\sqrt{a_{\text{пр}}}},$$

где k_1 — коэффициент, зависящий от плотности сухого бетона, принимаемый по табл. 1.5 [3]; y — расстояние от центра до расчетной точки по высоте балки; d — диаметр арматуры.

Распределение температуры в балке в местах расположения арматуры (толщина защитного слоя 26 мм и 36 мм) при времени огневого воздействия $\tau = 38$ мин и $\tau = 44$ мин, рассчитанное по методике А. И. Яковлева, приведено на рис. 7.

Моделирование температурных полей по арматуре, распределения напряжений в балке проведено в программе ANSYS. Распределение температуры в поперечном сечении балки при времени огневого воздействия $\tau = 38$ мин приведено на рис. 8, при $\tau = 44$ мин — на рис. 9.

Распределение температуры по арматуре в балке БКП-20 при времени огневого воздействия $\tau = 38$ мин приведено на рис. 10, распределение напряжений в арматуре — на рис. 12. Распределение температуры по арматуре в балке БК-30 при времени огневого воздействия $\tau = 44$ мин приведено на рис. 11, распределение напряжений в арматуре — на рис. 13.

Распределение температуры в арматуре, полученное при моделировании, сопоставимо с данными от датчиков, расположенных на продольном арматурном стержне, полученными в результате огневых испытаний балки БКП-20 (см. рис. 4) и БК-30 (см. рис. 5).

Расчет несущей способности балок при огневом воздействии определяем по существующей методике [3]. При действии огня по ширине сечения балки создается перепад температур (рис. 17 [3]). В соответствии с этим прочность бетона по ширине сечения также изменяется, уменьшаясь в периферийных слоях. Эпюра прочности по ширине сечения представляет собой трапецию с высотой, равной R_b в средней части. С целью упрощения расчета трапецидальную эпюру заменяем на равновеликую прямоугольную. В результате этой замены слой бетона δ_x считается потерявшим полностью свою прочность, на остальной части сечения прочность бетона принимается неизменной и равной R_b .

Рис. 8. Распределение температуры в поперечном сечении балки при времени огневого воздействия $\tau = 38$ мин

Рис. 9. Распределение температуры в поперечном сечении балки при времени огневого воздействия $\tau = 44$ мин

Расчетную ширину сечения определяем по формуле (1.71) [3]:

$$b_t = b - 2\sqrt{a_{\text{пр}}} \left[3,25\sqrt{\tau} \left(1 - \sqrt{\frac{T_{6,p} - t_n}{1523 - t_n}} \right) - 60k \right],$$

где $b_t = 244$ мм — при огневом воздействии $\tau = 38$ мин; $b_t = 240$ мм — при огневом воздействии $\tau = 44$ мин.

При испытании на огнестойкость предельным состоянием для балок, согласно ГОСТ 30247.1-94, является потеря несущей способности R вследствие обрушения конструкции или возникновения предельных деформаций (предельный прогиб в середине пролета для данных

Рис. 10. Распределение температуры по арматуре в балке БКП-20 при времени огневого воздействия $t = 38$ мин

Рис. 11. Распределение температуры по арматуре в балке БК-30 при времени огневого воздействия $t = 44$ мин

балок составляет 145 мм согласно приложению А ГОСТ 30247.0–94).

По результатам испытаний время достижения предельного состояния по потере несущей способности конструкции R бетонных балок, армированных стеклокомпозитной арматурой, составило:

- для опытных образцов балок марки БКП-20 — 37 и 39 мин;

- для опытных образцов балок марки БК-30 — 43 и 45 мин [1].

Разрушение бетонных балок при испытаниях произошло по наклонным сечениям в месте приложения нагрузки. Действующая поперечная сила на балку при испытаниях на огнестойкость равна 20,10 кН (с учетом собственного веса балки).

Расчет балок по полосе между наклонными сечениями проводим по формуле (8.55)

Рис. 12. Распределение напряжений в арматуре в балке БКП-20 при времени огневого воздействия $t = 38$ мин

Рис. 13. Распределение напряжений в арматуре в балке БК-30 при времени огневого воздействия $t = 44$ мин

СП 63.13330.2018⁴ с учетом требований п. 7.18 СП 27.13330.2017⁵:

$$Q < \varphi_{b1} \varphi_{bt} R_b b_t h_0.$$

При $t = 38$ мин для балки БКП-20:

$$Q = 0,3 \times 1 \times 14,5 \times 244 \times 194 = 205,9 \text{ кН} > 20,10 \text{ кН};$$

при $t = 44$ мин для балки БК-30:

$$Q = 0,3 \times 1 \times 14,5 \times 240 \times 184 = 192,1 \text{ кН} > 20,10 \text{ кН}.$$

Расчет прочности балок по наклонным сечениям на действие поперечных сил — по формуле (8.56) СП 63.13330.2018:

$$Q \leq Q_b + Q_{sw},$$

где Q — поперечная сила в наклонном сечении с длиной проекции S на продольную ось элемента, расположенную по одну сторону от рассматриваемого наклонного сечения; Q_b — поперечная сила, воспринимаемая бетоном в наклонном сечении, определяемая по формуле (8.57) СП 63.13330.2018 с учетом поправок п. 7.19 СП 27.13330.2017,

$$Q_b = \frac{\varphi_{b2} \gamma_{tt} R_{bt} b_t h_0^2}{C}, \text{ но должны выполняться условия:}$$

$$\varphi_{b3} (1 + \varphi_n) R_{bt} \gamma_{tt} b_t h_0 \leq Q_b \leq 2,5 \gamma_{tt} R_{bt} b_t h_0;$$

Q_{sw} — поперечная сила, воспринимаемая поперечной арматурой в наклонном сечении, определяемая по формуле (8.58) СП 63.13330.2018:

$$Q_{sw} = \varphi_{sw} q_{sw} C.$$

Коэффициент φ_{b2} принимаем равным 2 в соответствии с п. 7.19 СП 27.13330.2017; γ_{tt} при-

⁴ СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.

⁵ СП 27.13330.2017. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур.

нимаем равным 1 по табл. 5.2 СП 27.13330.2017; γ_{b3} принимаем равным 0,6 в соответствии с п. 7.19 СП 27.13330.2017; φ_n принимаем равным 0,6 в соответствии с п. 7.19 СП 27.13330.2017.

Коэффициент φ_{sw} принимаем равным 0,75 в соответствии с п. 3.2.18 [4];

q_{sw} — усилие в хомутах на единицу длины элемента, определяем по формуле (3.48) [4]:

$$q_{sw} = R_{sw} \frac{A_{sw}}{s_w} = 220 \times 2 \times \frac{74,63}{90} = 364,9 \frac{\text{Н}}{\text{мм}};$$

$$C = \sqrt{\frac{M_b}{\varphi_{sw} q_{sw}}}, \text{ согласно п. 3.2.19 [4];}$$

$$C = \sqrt{\frac{19758900}{0,75 \times 364,9}} = 268,7 \text{ мм};$$

$$h_0 \leq C \leq 2h_0;$$

$M_b = \varphi_{b2} \gamma_{tr} R_{bt} b_t h_0^2$ — определяется по формуле (3.46) [4] с учетом поправок п. 7.19 СП 27.13330.2017.

$$M_b = 2 \times 1 \times 1,05 \times 244 \times 194^2 = 19\,284\,686 \text{ Н} \cdot \text{мм}^2$$

при $\tau = 38$ мин;

$$M_b = 2 \times 1 \times 1,05 \times 240 \times 184^2 = 17\,063\,424 \text{ Н} \cdot \text{мм}^2$$

при $\tau = 44$ мин.

$$Q_b = 2 \times 1 \times 1,05 \times 244 \times 194^2 / 268,9 = 71\,717 \text{ Н} = 71,72 \text{ кН}$$

при $\tau = 38$ мин;

$$Q_b = 2 \times 1 \times 1,05 \times 240 \times 184^2 / 268,9 = 63\,456 \text{ Н} = 63,47 \text{ кН}$$

при $\tau = 44$ мин.

$$2,5 \gamma_{tr} R_{bt} b_t h_0 = 2,5 \times 1 \times 1,05 \times 244 \times 194 = 124,26 \text{ кН}$$

при $\tau = 38$ мин;

$$2,5 \gamma_{tr} R_{bt} b_t h_0 = 2,5 \times 1 \times 1,05 \times 240 \times 184 = 115,92 \text{ кН}$$

при $\tau = 44$ мин.

Поперечная сила, воспринимаемая бетоном в наклонном сечении (минимальное значение): для балки БКП-20 при $\tau = 38$ мин $Q_b = 71,72$ кН, для балки БК-30 при $\tau = 44$ мин $Q_b = 63,47$ кН.

$$63,47 \text{ кН} > 20,10 \text{ кН}.$$

Действующая поперечная сила полностью воспринимается бетоном с учетом огневого воздействия на балку. В связи с этим поперечную силу, воспринимаемую поперечной арматурой в наклонном сечении, не рассматриваем.

Расчет железобетонных элементов по наклонным сечениям на действие моментов проводим по формуле (8.63) СП 63.13330.2018:

$$M < M_s + M_{sw},$$

где M — момент в наклонном сечении с длиной проекции C на продольную ось элемента, определяемый от всех внешних сил, расположенных

по одну сторону от рассматриваемого наклонного сечения, относительно конца наклонного сечения, противоположного концу, у которого располагается проверяемая продольная арматура, испытывающая растяжение от момента в наклонном сечении; M_s — момент, воспринимаемый продольной арматурой, пересекающей наклонное сечение, относительно противоположного конца наклонного сечения, определяем по формуле (8.64) СП 63.13330.2018:

$$M_s = N_s z_s,$$

где z_s — плечо внутренней пары сил, $z_s = 0,9h_0$; N_s — усилие в продольной растянутой арматуре, определяем с учетом п. 7.21 СП 27.13330.2017:

$$N_s = \gamma_{st} R_s A_s,$$

γ_{st} — коэффициент условий работы арматуры в зависимости от температуры, для металлической арматуры его принимают по табл. 5.14 СП 63.13330.2018, для композитной арматуры определяем его значение по результатам испытаний;

$R_s = 800$ МПа — расчетное сопротивление композитной арматуры растяжению, определенное в соответствии с формулой (5.2) СП 295.1325800.2017;

$A_s = 565,2 \text{ мм}^2$ — площадь поперечного сечения продольной арматуры;

M_{sw} — момент, воспринимаемый поперечной арматурой, нормальной к продольной оси балки, определяем по формуле (8.65) СП 295.1325800.2017. Расчетное сопротивление поперечной арматуры R_{sw} также принимают с учетом коэффициента γ_{st} (п. 7.21 СП 27.13330.2017).

$$M_{sw} = 0,5 Q_{sw} C;$$

$$M_{sw} = 0,5 \times 0,75 \times 364,9 \times 268,9 \times 268,9 = 9\,894\,338 \text{ Н} \cdot \text{мм} = 9,89 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$\text{с коэффициентом } \gamma_{st} = 1.$$

Для балки БКП-20 при $\tau = 38$ мин:

$$M_s = \gamma_{st} \times 800 \times 565,2 \times 174,6;$$

$$M_{sw} = \gamma_{st} \times 0,5 \times 0,75 \times 364,9 \times 268,9 \times 268,9.$$

Для балки БК-30 при $\tau = 44$ мин:

$$M_s = \gamma_{st} \times 800 \times 565,2 \times 165,6;$$

$$M_{sw} = \gamma_{st} \times 0,5 \times 0,75 \times 364,9 \times 268,9 \times 268,9.$$

Действующий момент в наклонном сечении балок при испытаниях на огнестойкость равен 18,58 кН · м.

Значения коэффициента условий работы композитной арматуры для балки БКП-20 при $\tau = 38$ мин, при температуре на арматуре 180 °С

$\gamma_{st} = 0,20$. Для балки БК-30 при $\tau = 44$ мин при температуре на арматуре 140°C $\gamma_{st} = 0,22$.

Согласно ранее проведенному анализу [2], значение несущей способности балки БКП-20 на действие момента по наклонным сечениям, определенное по СП 295.1325800.2017, превышает значение несущей способности балки, полученное в результате испытаний, в 1,24 раза.

При внесении изменений в п. 6.1.24 СП 295.1325800.2017 (снижение несущей способности изгибаемых конструкций на действие момента (СП 27.13330.2017) по наклонным сечениям согласно проведенным испытаниям) значения коэффициента γ_{st} должны быть увеличены минимум в 1,24 раза. Предлагаемые значения коэффициентов γ_{st} : при температуре 180°C — 0,25, при температуре 140°C — 0,27.

Выводы

Значения температуры в поперечном сечении балки при огневом воздействии на балку, полученные в результате расчета по методикам Рекомендаций по расчету пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций (см. рис. 6) (М.: Стройиздат, 1986. 40 с.) и А. И. Яковлева [3] (см. рис. 7), превышают значения, полученные в результате испытаний (см. рис. 4, 5). По результатам исследований определено значение коэффициентов условий работы при расчете на огнестойкость конструкций, армированных стеклокомпозитной арматурой. Приведены исследования влияния изменения толщины защитного слоя бетона конструкций на огнестойкость конструкций, армированных стеклокомпозитной арматурой.

Библиографический список

1. Бегунова Н. В., Возмищев В. Н. Сравнительная оценка огнестойкости бетонных балок, армированных

стеклокомпозитной и стальной арматурами // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 2 (67). С. 48–53.

2. Бегунова Н. В., Возмищев В. Н. Сравнительная оценка прочности, жесткости и трещиностойкости бетонных конструкций, армированных полимеркомпозитной и стальной арматурами // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 15, № 4. С. 69–74.

3. Яковлев А. И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1988. 142 с.

4. Расчет железобетонных конструкций без предварительно напряженной арматуры / авт. колл. под руководством Н. Н. Трекина. М.: Минстрой РФ; ФАУ ФЦС, 2015. 283 с.

References

1. Begunova N. V., Vozmishchev V. N. *Sravnitel'naya otsenka ognestoykosti betonnykh balok, armirovannykh steklokompozitnoy i stal'noy armaturami* [Comparative evaluation of fire resistance of concrete structures reinforced with fiberglass and steel rebar]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no. 2 (67), pp. 48–53.

2. Begunova N. V., Vozmishchev V. N. *Sravnitel'naya otsenka prochnosti, zhestkosti i treshchinostoykosti betonnykh konstruktsiy, armirovannykh polimerkompozitnoy i stal'noy armaturami* [Comparative assessment of strength, rigidity and crack resistance of concrete structures reinforced with polymer composite and steel reinforcement]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve – Intelligent systems in production*, 2017, vol. 15, no. 4, pp. 69–74.

3. Yakovlev A. I. *Raschet ognestoykosti stroitel'nykh konstruktsiy* [Calculation of building structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988, 142 p.

4. *Raschet zhelezobetonnykh konstruktsiy bez predvaritel'no napryazhennoy armatury* [Calculation of reinforced concrete structures without prestressed reinforcement]. Authors' team headed by Trekin N. N. Moscow, Minstroy RF; FAU FTsS Publ., 2015, 283 p.