

УДК 614.841.332

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЖАРА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ

Камлюк А.Н., к. ф.-м. наук, доцент, Ширко А.В., к. ф.-м. наук\*,  
Спиглазов А.В., к.т.н., доцент\*, Дробыш А.С.

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь  
\*Белорусский государственный технологический университет

e-mail: kan@kii.gov.by

*Экспериментально исследованы механические и упругие характеристики композитной арматуры, как при нормальных температурных условиях, так и при воздействии повышенных температур. Построена модель поведения композитной арматуры, учитывающая температурное влияние на ее механические и упругие характеристики. Разработаны базы данных, содержащие температурные коэффициенты предела прочности и модуля упругости для арматур с различными видами армирующего наполнителя.*

*Experimentally investigated the mechanical and elastic properties of composite reinforcement, as under normal temperature conditions and when exposed to elevated temperatures. A model of the behavior of composite reinforcement, taking into account the temperature influence on its mechanical and elastic properties. Developed a database containing the influence of temperature coefficients for valves with different types of reinforcing filler.*

(Поступила в редакцию 27 апреля 2015 г.)

**Введение.** Композитная арматура – неметаллические стержни из стеклянных, базальтовых, углеродных или арамидных волокон, пропитанных термореактивным или термопластичным полимерным связующим. Основой композитной арматуры как изделия является ровинг, т. е. материал, который формируют из непрерывного волокна и связующего материала. Арматуру, изготовленную из стеклянных волокон, принято называть стеклопластиковой (АСП), из базальтовых волокон – базальтопластиковой (АБП), из углеродных волокон – углепластиковой. Для сцепления с бетоном на поверхности композитной арматуры в процессе производства формируются специальные ребра (рисунок 1) или наносится покрытие из песка.



Рисунок 1 – Композитная арматура

С каждым годом на рынке появляются новые предприятия, занимающиеся изготовлением композитной арматуры. Это связано с наличием у композитной арматуры перед стальной ряда преимуществ: прочнее, легче, экономичнее, не подвержена коррозии и гниению и др.

Благодаря своим физико-механическим характеристикам и техническим преимуществам композитная арматура может являться альтернативой арматуре из металла, как обладающую сочетанием высокой прочности и коррозионной стойкости. Однако у композитной арматуры есть недостаток – низкий модуль упругости – примерно в 3-4 раза ниже, чем у стальной (для базальтопластиковой и стеклопластиковой арматуры). У композитной арма-

туры практически отсутствует площадка текучести, и разрушение при растяжении носит хрупкий характер. Кроме того, композитная арматура значительно снижает свои прочностные свойства при нагреве, что является очень важным фактором в условиях пожара. Для построения адекватных математических моделей поведения композитной арматуры необходимо построить модель поведения материала, которая базируется на экспериментально полученных и теоретически подтвержденных механических характеристиках.

**Экспериментальная часть.** Испытания композитной арматуры на растяжение проводились в лаборатории Белорусского государственного технологического университета. В качестве образцов для испытания, была выбрана арматура со стекловолокнистым наполнителем и матрицей из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) диаметром 8 и 10 мм. Для крепления арматуры в разрывной машине применялись специально изготовленные крепежные элементы (рисунок 2).

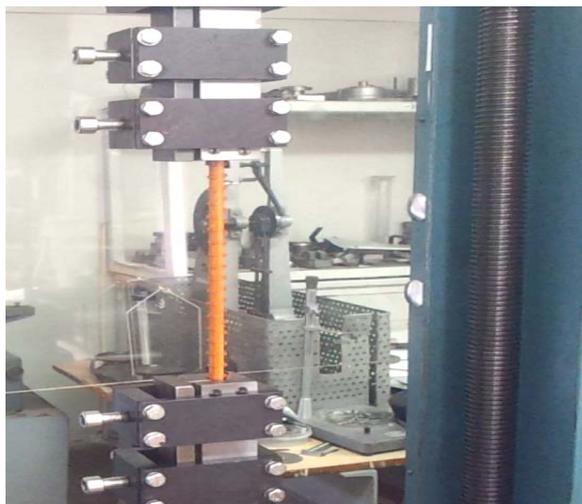


Рисунок 2 – Крепление арматуры

Деформации образца определялись с помощью индикатора часового типа, имеющего цену деления 0,005 мм. Экспериментальные данные по растяжению арматуры представлены на рисунке 3, где показана зависимость усилия сопротивления арматуры от показания индикатора.

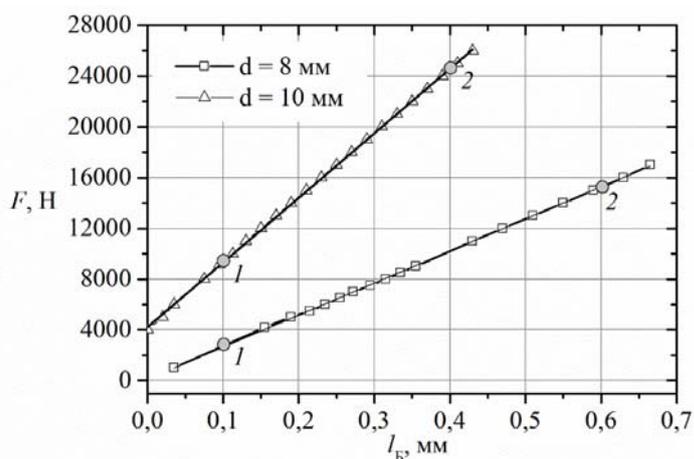


Рисунок 3 – Экспериментальные данные по растяжению композитной арматуры

Модуль продольной упругости арматуры определяется тангенсом угла наклона экспериментальных прямых. Индикатор выставлялся на нулевую отметку при предварительно нагруженной арматуре, поэтому линии на рисунке 3 выходят не из нуля. Его численное значение для арматуры диаметром 8 и 10 мм определяются как

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\Delta F / A}{\Delta l / B}, \quad (1)$$

где  $\Delta F$  – приращение усилия между выбранными точками 1 и 2 (рисунок 3) для арматуры,  $A$  – площадь арматуры,  $\Delta l$  – приращение удлинения в пределах базы индикатора,  $B = 50$  мм – база индикатора. Для диаметра арматуры 8 мм по (1) получим  $E = 25$  ГПа, а для диаметра арматуры 10 мм –  $E = 32$  ГПа.

Модуль упругости для образцов разного диаметра различен, т. к. разное объемное содержание стекловолокна в арматуре. Сравнивая модули упругости стали и композита видно, что различие составляет 6-8 раз, а, следовательно, и деформации при прочих равных условиях для композитной арматуры будут в 6-8 раз превышать деформации стальной арматуры.

Экспериментальные значения усилий при которых происходит разрушение композита составляют для образцов диаметром 8 и 10 мм соответственно  $F_{max(8)} = 20$  кН;  $F_{max(10)} = 34$  кН.

Пределы прочности для арматуры определяются как:

$$\sigma_B = \frac{F_{max}}{A}. \quad (2)$$

Пределы прочности по (2) равны для образцов диаметром 8 и 10 мм соответственно  $\sigma_{B(8)} = 398$  МПа,  $\sigma_{B(10)} = 433$  МПа.

Разница между пределами прочности арматуры, отличающейся диаметром, также объясняется разным объемным содержанием стекловолокна и будет показана в теоретической части. Прочность ровинга в 3–4 раза ниже прочности элементарного волокна и зависит от технологии изготовления. Как показывают экспериментальные данные, прочность композитной арматуры сопоставима с пределом текучести стали, но примерно в два раза ниже ее предела прочности.

Предельные деформации арматуры важны при оценке потери ее несущей способности. Так как до разрушения композитная арматура проявляет линейные свойства, то предельные деформации разрушения можно рассчитать как

$$\varepsilon_{np} = \frac{\sigma_B}{E}. \quad (3)$$

Рассчитывая по (3) предельные деформации разрушения равны для образцов диаметром 8 и 10 мм соответственно  $\varepsilon_{np(8)} = 0,016$ ,  $\varepsilon_{np(10)} = 0,013$ .

Значение предельных деформаций в 1,5 % говорит о хрупком характере разрушения композитной арматуры.

**Теоретическая часть.** Для теоретического определения прочностных и упругих свойств композита необходимо знать свойства его компонентов. Как уже было сказано, композитная арматура состоит из армирующего наполнителя – ровинга – стекловолокна и связующего (ПЭТФ – продукт переработки пластиковых бутылок).

Свойства элементарных стекловолокон в значительной степени определяют свойства ровинга, причем эти свойства зависят от способа и характера текстильной переработки, которой подвергаются элементарные волокна. Поэтому механические свойства однонаправленных ровингов всегда хуже механических свойств элементарных волокон. Значительный вклад в это различие вносит также статистическое распределение прочности элементарных волокон в ровинге.

Основными механическими характеристиками армирующих ровингов являются модуль упругости и разрушающее напряжение при растяжении, определение которых проводят по ГОСТ 6943.10–79.

Для испытания применяют образцы в виде отрезков, закрепленных в рамке. Образцы нагружают до разрушения на испытательной машине. Значение приложенных усилий измеряют по шкале силоизмерителя, а для регистрации удлинения используют соответствующую шкалу на испытательной машине или непосредственно измеряют удлинение пучков.

Теоретические расчеты механических характеристик проведем по значениям волокон и ровингов, выпускаемых предприятием «Полоцк Стекловолокно». Для производства арматуры используется ровинг марки РБТ 13-2400, для которого производитель указывает разрывную нагрузку не менее 630 Н. Нами были проведены испытания согласно ГОСТ 6943.10-79. В испытаниях разрывная нагрузка ровинга принимала значения 900–1100 Н. В дальнейших расчетах примем среднее значение разрывной нагрузки в 1000 Н.

Определим значение предела прочности ровинга при растяжении [1].

$$\sigma_{Ba} = \frac{F_p}{A}, \quad (4)$$

где  $F_p = 1000$  Н – разрывная нагрузка ровинга;  $A = \frac{T}{\rho} \cdot 10^{-3} = 0,944_{\text{мм}^2}$  – общая площадь нагружаемых волокон, мм<sup>2</sup> (здесь  $T$  – номинальная линейная плотность, текс;  $\rho$  – плотность стекловолокна, г/см<sup>3</sup>). Как видно, из (4)  $\sigma_{Ba} = 1059$  МПа. Таким образом, прочность ровинга более чем в 3 раза меньше прочности элементарного волокна. Модуль упругости ровинга будет таким же, как и модуль упругость элементарных волокон – 73 ГПа. Модуль упругости и предел прочности композитной арматуры рассчитывается по формуле [1]:

$$E = E_a p_a + E_c p_c, \sigma_B = \sigma_{Ba} p_a + \sigma_{Bc} p_c, \quad (5)$$

где  $E_a$ ,  $\sigma_{Ba}$  – модуль упругости и предел прочности армирующего стекловолоконного ровинга,  $E_c$ ,  $\sigma_{Bc}$  – модуль упругости и предел прочности связующего (ПЭТФ),  $p_a$  – объемная доля стекловолокна в композите,  $p_c$  – объемная доля связующего в композите.

Для того чтобы воспользоваться формулой (5), необходимо определить объемные доли стекловолокна и связующего в композите. Объемная доля армирующего стекловолокна в композите определяется по формуле [1]

$$p_a = \frac{C_a \rho_c}{C_a \rho_c + C_c \rho_a}, \quad (6)$$

где  $C_a$ ,  $C_c$  – массовые доли стекловолокна и связующего в композите соответственно,  $\rho_a$ ,  $\rho_c$  – плотность стекловолокна и связующего в композите соответственно.

Для определения массовой доли стекловолокна, необходимо произвести отжиг образцов, т. е. выпарить связующее (рисунок 4).



Рисунок 4 – Отжиг образцов

Сравнивая результаты, полученные по формуле (5), с результатами эксперимента, получаем хорошее согласование (отклонение составляет не более 8 %). Как видно, на величину модуля упругости композита подавляющее значение оказывает модуль упругости стекловолокна.

Предел прочности по (5) равен соответственно  $\sigma_{B(8)} = 383$  МПа,  $\sigma_{B(10)} = 433$  МПа.

Заметим, что на прочность композитной арматуры весомый вклад оказывает прочность полимерного связующего, в отличие от модуля упругости композита, которая в основном определяется упругостью стекловолокна.

Коэффициент линейного расширения можно рассчитать по формуле [1, 2]

$$\alpha = \frac{E_a \alpha_a p_a + E_c \alpha_c p_c}{E_a p_a + E_c p_c}, \quad (7)$$

где  $\alpha_a$  и  $\alpha_c$  – температурные коэффициенты линейного расширения армирующего стекловолокна и связующего соответственно. Проводя расчеты по (7), получаем  $\alpha_{(8)} = 4,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\alpha_{(10)} = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

**Влияние температуры на механические характеристики материала.** Предел прочности композитной арматуры существенным образом зависит от температуры. Так на рисунке 5 показана зависимость [3], отражающая уменьшение предела прочности стекловолокна и базальтового волокна с ростом температуры.

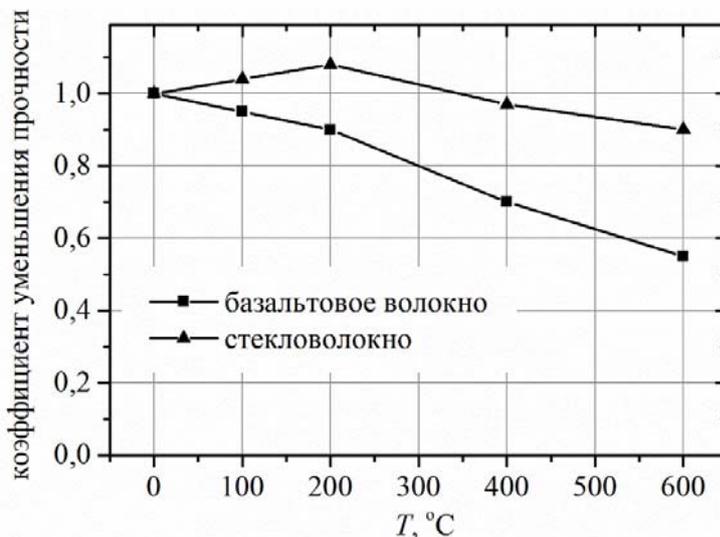


Рисунок 5 – Зависимость уменьшения прочности волокон с ростом температуры

Коэффициент снижения прочности определяется как отношение предела прочности при температуре T к пределу прочности при нормальных условиях

$$\gamma = \frac{\sigma_B(T)}{\sigma_B^0}. \quad (8)$$

Соответственно коэффициент снижения модуля упругости равен

$$\beta_{cl} = \frac{E(T)}{E_c^0}. \quad (9)$$

Так как температура плавления полимерного связующего составляет 250–260 °С, то сверх этих температур он уже не работает, и прочность композитной арматуры будет определяться только прочностью стекловолокна. Например, при 300 °С ( $\gamma = 0,8$  из рисунка 6) арматура диаметром 10 мм будет иметь предел прочности по формуле (4)  $\sigma_{B(10)} = 322$  МПа.

Для подтверждения данного результата был проведен эксперимент по растяжению композитной арматуры диаметром 10 мм при одновременном локальном проплавлении полимерного связующего с помощью технического фена, имеющего рабочую температуру

400 °С. В результате получили усилие разрыва арматуры 27 кН, что на 7 кН ниже чем при испытаниях в нормальных условиях. Предел прочности в этом случае составил по формуле (4)  $\sigma_{B(10)} = 344$  МПа.

Различие в 6 % теоретических и экспериментальных данных объясняется сложностью глубокого равномерного проплавления участка арматуры по всему периметру, поэтому экспериментальный результат оказался несколько выше.

Степень уменьшения прочности при температуре 300°С составит  $344/433 = 0,79$  что является довольно значительным.

На основе экспериментальных данных построим модель поведения композитной арматуры под нагрузкой с учетом действующей температуры. Как было показано в эксперименте, модуль упругости арматуры диаметром 10 мм составил 32 ГПа, предел ее прочности 433 МПа, предельная деформация при разрыве достигает величины 1,3%. (таблица 1).

Таблица 1 – Физико-механические характеристики композитной арматуры

Показатель	Значение
Предел прочности композитной арматуры $\sigma_B^0$ , МПа	433
Модуль упругости композитной арматуры $E_c^0$ , ГПа	32
Коэффициент Пуассона	0,3
Предельные деформации при разрыве $\varepsilon_{пред}$ , %	1,3

Эти данные необходимо ввести в качестве начальных параметров в программу ANSYS (рисунок 6).

Outline of All Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
10	P25	Ширина опоры Sup, м	0,046875	
11	P26	Диаметр арматуры, м D	0,01	
12	Transient Thermal (B1)			
13	P12	Mesh Element Size	0,023438	m
14	Static Structural (C1)			
15	P13	Mesh Element Size	0,023438	m
16	P35	Предел прочности композитной арматуры, МПа	433	
17	P36	Модуль упругости композитной арматуры, ГПа	32	
18	P37	Коэффициент Пуассона	0,3	
19	P38	Предельная деформация при разрыве композитной арматуры, %	1,3	
20	P39	Количество температурных диаграмм	6	

Рисунок 6 – Начальные упругие и прочностные свойства композитной арматуры

В таблице 1 показаны значения характеристик прочности и модуля упругости при нормальной температуре  $T_0 = 20$  °С. С ростом температуры эти параметры будут уменьшаться и при температуре  $T$  будут иметь значения

$$\sigma_B(T) = \gamma_{ct} \sigma_B^0, \quad E(T) = \beta_{ct} E_c^0, \quad (10)$$

где  $\gamma_{ct}$  – коэффициент снижения предела прочности композита,  $\beta_{ct}$  – коэффициент снижения начального модуля упругости композита. Эти коэффициенты будем называть коэффициентами влияния.

Коэффициенты влияния зависят от температуры и определяются экспериментально. Для рассматриваемой арматуры (наполнитель стекловолокно) предел прочности и модуль упругости с ростом температуры будут уменьшаться в связи с расплавлением связующего (ПЭТФ) и в связи с уменьшением прочности стекловолокна согласно рисунка 6.

Например, рассчитаем значение коэффициента  $\gamma_{ct}$  и  $\beta_{ct}$  при температуре 300 °С. Так как температура плавления полимерного связующего составляет 250–260 °С, то сверх этих температур он уже не работает ( $p_c = 0$  в формуле (5)), и прочность композитной арматуры будет определяться только прочностью стекловолокна. Так, при 300 °С коэффициент уменьшения прочности стекловолокна составит 0,8 (рисунок 5). Тогда значение коэффициента снижения предела прочности композитной арматуры по формуле (8) получаем  $\gamma_{ct} = 0,74$ ,  $\beta_{ct} = 0,92$ .

Температура практически не влияет на модуль упругости стекловолокна, поэтому уменьшение модуля упругости композитной арматуры связана только с расплавлением связующего.

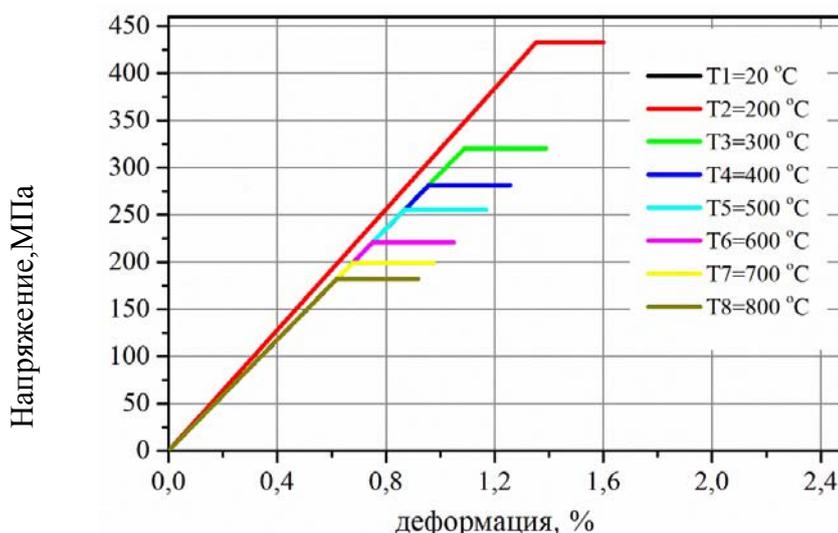
Значения коэффициентов влияния для интересующего интервала температур представлена в таблице 2.

**Таблица 2 – Значения коэффициентов влияния  $\gamma_{ct}$  и  $\beta_c$  для композитной арматуры**

Наполнитель	Коэффициент	Значение коэффициентов $\gamma_{ct}$ , $\beta_c$ при нагреве арматуры до температуры, °С							
		20	200	300	400	500	600	700	800
Стекловолокно	$\gamma_{ct}$	1,0	1,0	0,74	0,65	0,59	0,51	0,46	0,42
	$\beta_c$	1,0	1,0	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92

Для любой температуры двухлинейную диаграмму деформирования композитной арматуры можно построить, используя модуль упругости, предел прочности при нормальных условиях и коэффициенты влияния из таблицы 2.

В итоге получим упругопластическую температурно-зависимую модель деформирования композитной арматуры, представленную на рисунке 7.



**Рисунок 7 – Модель упругопластического температурно-зависимого деформирования композитной арматуры**

Отметим, что выход на горизонтальный участок диаграммы деформирования будет означать разрушение арматуры. Т. е. в модели композитной арматуры появление пластических деформаций соответствует ее разрушению.

Таким образом, построение всех диаграмм автоматизировано и параметризовано. Созданы базы данных, включающие в себя коэффициенты влияния и коэффициенты теплового расширения (КТР) для композитной арматуры со стекловолокном и базальтовым наполнителем. То есть, для того чтобы задать модель упругопластического поведения материала арматуры, необходимо задать прочностные и упругие характеристики этого материала при нормальной температуре (рисунок 5), выбрать число температурных зависимостей и сослаться на базу коэффициентов влияния, соответствующих типу выбранного наполнителя.

КТР композитной арматуры диаметром 10 мм, согласно расчетов в экспериментальной части, имеет значение  $4,8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Примем его значение неизменным для всего интервала действующих температур. Отметим что, КТР композитной арматуры имеет величину гораздо более близкую к КТР бетона ( $6,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), чем КТР стали ( $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

**Заключение.** Проведены экспериментальные исследования для определения механических и упругих характеристик композитной арматуры. Испытания на растяжение арматуры проводились как при нормальных температурных условиях, так и при воздействии высоких температур. Построена модель поведения композитной арматуры, учитывающая температурное влияние на ее механические и упругие характеристики. Разработаны базы данных, содержащие температурные коэффициенты влияния для арматур с различными видами армирующего наполнителя. Полученные данные будут использованы для теплотехнического и прочностного расчета бетонных плит армированных композитной арматуры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ставров, В.П. Механика композиционных материалов: учебн. пособие. – Минск: БГТУ, 2008. – 260 с.
2. Тимошенко, С. П. Сопротивление материалов: в 2 т. / пер. с англ. – М.: Наука, Т. 1: Элементарная теория и задачи, 1965. – 363 с.; Т. 2: Более сложные вопросы теории и задачи, 1965. – 480 с.
3. Гутников, С.И. Стекланные волокна: учебное пособие. – Москва: МГУ им. Ломоносова, 2010. – 53 с.