

УДК 614.841.332

А.В. ШИРКО, канд. физ.-мат. наукстарший преподаватель кафедры механики материалов и конструкций¹**А.Н. КАМЛЮК**, канд. физ.-мат. наук, доцентзаместитель начальника института²**А.В. СПИГЛАЗОВ**, канд. техн. наук, доцентзаведующий кафедрой механики материалов и конструкций¹**А.С. ДРОБЫШ**старший инженер научно-исследовательского отдела²

E-mail: aantox@mail.ru

¹Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Республика Беларусь²ГУО «Командно-инженерный институт» МЧС Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь

Статья поступила 03.03.2015.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Проведены экспериментальные исследования для определения показателей физико-механических свойств композитной арматуры. Испытания на растяжение арматуры проводились как при нормальных температурных условиях, так и при локальном тепловом воздействии. Изучено поведение композитной арматуры, учитывающее температурное влияние на ее механические и упругие характеристики. Получены базы данных, содержащие температурные коэффициенты влияния для арматур с различными видами армирующего наполнителя.

Ключевые слова: композитная арматура, роулинг, разрушение, модуль упругости, предел прочности, температура

Введение. В настоящее время на рынке строительных материалов все большую популярность приобретает композитная арматура. Благодаря своим физико-механическим характеристикам и техническим преимуществам композитная арматура является альтернативой арматуре из металла для определенного класса бетонных конструкций, так как обладает высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью. 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 арматуры практически отсутствует площадка текучести, и разрушение при растяжении носит хрупкий характер. Кроме того, полимерное связующее в арматуре не стойко к нагреву до температуры выше 250–300 °С, что является очень важным фактором в условиях пожара. Из [1] известно, что композитные материалы на основе полиэфирных смол можно эксплуатировать до 60...150 °С, эпоксидных до 80...200 °С, фенолоформальдегидных до 150...250 °С, полиимидов до 200...400 °С. В настоящее время применение конструкций из стеклопластика ограничено ввиду быстрой потери своих физико-механических свойств при нагреве. Большинство испытаний композитных материалов при воздействии высоких температур проводят с композитной арматурой. Экспериментальные данные [2] свидетельствуют, что при интен-

сивном разогреве рабочей арматуры до 100 °С происходит активное выделение пара из смежных со стержнем микротрещин бетона. При этом мгновенно повышается давление на поверхности арматуры, что приводит к разрушению волокна.

В последние годы экспериментальные и аналитические исследования композитной арматуры проводились во Всероссийском научно-исследовательском институте противопожарной обороны МЧС России. Так, например, в работе [3] были приведены результаты исследований изгибаемых бетонных конструкций, каркасы которых выполнены из арматуры различных типов. Было рассмотрено поведение сплошной бетонной плиты, армированной композитными (базальтопластиковыми) материалами, при условии теплового воздействия по стандартному температурному режиму. На основании проведенных экспериментов и расчетов установлено, что конструкция плиты, арматурные сетки которой изготовлены из композитных (базальтопластиковых) материалов, имеет существенно более низкие показатели по несущей способности в сравнении с показателями плиты, армированной стальными сетками. При этом в работе [3] не были проведены экспериментальные исследования механических свойств одной композитной арматуры при воздействии высоких температур.

Получение таких данных позволит прогнозировать поведение конструкций, в том числе из бетона,

в состав которых входит композитная арматура, не прибегая к дорогостоящим экспериментам. Для адекватного математического описания поведения композитной арматуры необходимо построить модель материала, которая базируется на экспериментально полученных [4–5] и теоретически подтвержденных механических характеристиках.

Экспериментальное определение механических свойств композитной арматуры. В лаборатории Белорусского государственного технологического университета были проведены испытания композитной арматуры на растяжение по ГОСТ 6943.10–79. Для испытания применяли образцы в виде отрезков, закрепленных в рамке. Образцы нагружали до разрушения на испытательной машине. Значение приложенных усилий измеряли по шкале силоизмерителя, а для регистрации удлинения использовали соответствующую шкалу на испытательной машине или непосредственно измеряли удлинение пучков. Аналогичные испытания были проведены с образцами при локальном тепловом воздействии. В качестве источника тепла был использован строительный фен. Для предотвращения потери тепла испытания образцов проводились в специальной камере из минеральной ваты.

В качестве образцов для испытаний была выбрана арматура со стекловолокнистым наполнителем и матрицей из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) диаметром 8 мм и 10 мм. Для крепления арматуры в разрывной машине применялись специально изготовленные крепежные элементы. Деформации арматуры определялись на базе 50 мм с помощью индикатора часового типа, имеющего цену деления 0,005 мм. Экспериментальные данные по растяжению арматуры представлены на рисунке 1, где показана зависимость усилия сопротивления арматуры F от показания индикатора l_b .

Индикатор выставлялся на нулевую отметку при предварительно нагруженной арматуре, поэтому линии на рисунке 1 выходят не из нуля. Диаграмма имеет ярко выраженную линейную зависимость на всем диапазоне нагружения. В связи с этим, определение модуля продольной упругости возможно по упрощен-

ной схеме, используя закон Гука. Модуль продольной упругости арматуры определяется тангенсом угла наклона экспериментальных прямых. Его численное значение для арматуры диаметром 8 мм и 10 мм равно соответственно

$$E_{(8)} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\Delta F_8 / A_8}{\Delta l_b / B} = \frac{(15351 - 2788) / 50,24}{(0,6 - 0,1) / 50} = 25006 \text{ МПа} \approx 25 \text{ МПа};$$

$$E_{(10)} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\Delta F_{10} / A_{10}}{\Delta l_b / B} = \frac{(24656 - 9390) / 78,5}{(0,4 - 0,1) / 50} = 32411 \text{ МПа} \approx 32 \text{ МПа},$$

где ΔF_8 и ΔF_{10} — приращение усилия между выбранными точками 1 и 2 (для арматуры диаметром 8 и 10 мм соответственно (см. рисунок 1); A_8 и A_{10} — площадь арматуры диаметром 8 и 10 мм соответственно; Δl_b — приращение удлинения в пределах базы индикатора; $B = 50$ мм — база индикатора.

Как видно из полученных результатов, модуль упругости для арматуры разного диаметра различен. Это связано с разным объемным содержанием стекловолокна в арматуре диаметром 8 и 10 мм. Сравнивая модули упругости стали (около 200 ГПа) и композита, можно отметить, 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.

Композитная арматура при растяжении не имеет площадки текучести и разрушается хрупким образом. Такое поведение композита, в первую очередь, обусловлено свойствами стекловолокна, которое является хрупким материалом. Кроме того, линейный характер диаграммы растяжения композитной арматуры (см. рисунок 1) сохраняется вплоть до разрыва арматуры. Типичная картина разрушения композитной арматуры при растяжении показана на рисунке 2.

Экспериментальные значения усилий, при которых происходит разрушение композита, состав-

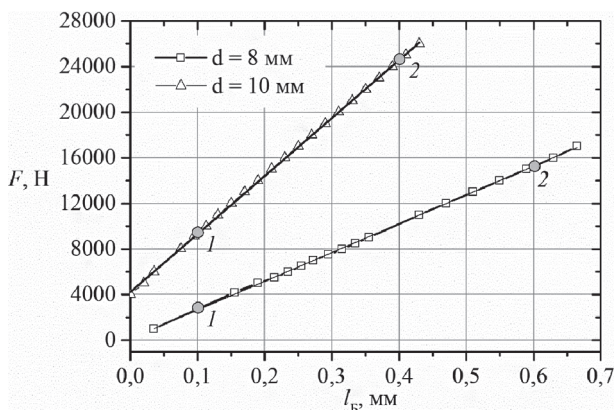


Рисунок 1 — Экспериментальные данные по растяжению композитной арматуры



Рисунок 2 — Разрушение композитной арматуры

ляют для образцов диаметром 8 и 10 мм соответственно $F_{\max}(8) = 20$ кН, $F_{\max}(10) = 34$ кН.

Пределы прочности для арматуры будут соответственно

$$\sigma_{B(8)} = \frac{F_{\max(8)}}{A_8} = \frac{20000}{50,24} = 398 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{B(10)} = \frac{F_{\max(10)}}{A_{10}} = \frac{34000}{78,5} = 433 \text{ МПа}.$$

Разница между пределами прочности арматуры, диаметром 8 и 10 мм, объясняется разным объемным содержанием стекловолокна и будет показана в теоретической части. Отметим, что практически все производители указывают прочность композитной арматуры около 1000 МПа, так как при расчете теоретической прочности в основном используют показатели свойств элементарных волокон, без учета неравномерности их натяжения и влияния масштабного фактора в ровинге (т. е. материал, который формируют из непрерывного волокна и связующего материала). Прочность ровинга в 3–4 раза ниже прочности элементарного волокна и зависит от технологии его изготовления. Как показывают экспериментальные данные, прочность композитной арматуры сопоставима с пределом текучести стали и 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 следующим образом:

$$\varepsilon_{np(8)} = \frac{\sigma_{B(8)}}{E_8} = \frac{398}{25006} = 0,016;$$

$$\varepsilon_{np(10)} = \frac{\sigma_{B(10)}}{E_{10}} = \frac{433}{32411} = 0,013.$$

Линейность деформаций на всем интервале нагружения и уровень их предельной величины говорит о хрупком характере разрушения композитной арматуры.

Теоретическое определение механических характеристик композитной арматуры. Известные теоретические модели прогнозирования механических свойств композитных материалов основаны на сопоставлении показателей соответствующих свойств их компонентов. Как уже было сказано, композитная арматура состоит из продольно ориентированного ровинга и связующего полимера в определенном объемном соотношении [6].

Свойства элементарных волокон в значительной степени определяют свойства стеклоровинга, 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 и неравномерность их натяжения.

Предприятие «Полоцк-Стекловолокно» выпускает волокна типа Е-стекла и S-сетка и ровинги с модулем упругости и разрушающим напряжением при растяжении, определяемыми по ГОСТ 6943.10–79.

Основные физико-механические характеристики волокон, ПЭТФ и ровингов приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Подчеркнем, что прочность ровинга всегда ниже прочности волокон, из которых он собран. Предел прочности ровинга можно определить только по экспериментально полученному значению разрывной нагрузки (см. таблицу 2).

Для производства арматуры используется ровинг марки РБТ 13-2400, для которого производитель указывает разрывную нагрузку не менее 630 Н (см. таблицу 2). Нами были проведены испытания согласно ГОСТ 6943.10–79, в которых разрывная нагрузка ровинга принимала значения 900–1100 Н. В дальнейших расчетах примем среднее значение разрывной нагрузки в 1000 Н.

Таблица 1 — Основные механические и физические характеристики стеклянных волокон и ПЭТФ

Свойство	Тип волокна		ПЭТФ
	Е	S	
Температура размягчения, С	830–860	1056	160–180
Плотность, г/см ³	2,54	2,40–2,58	1,38–1,4
Коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ С ⁻¹	5	2,5	0,8–1,3
Прочность элементарного волокна, МПа	3500	4600–4900	—
Модуль упругости, ГПа	73	82–93	2,5–3
Удлинение до разрыва, %	4,8	5,4	2–4
Теплоемкость Дж/(кг · К)	800	740	990–1290
Теплопроводность Вт/(м · К)	0,86–0,92	—	0,14–0,2

Таблица 2 — Основные характеристики ровингов на основе Е-стекла

Марка ровинга	Диаметр элементарной нити, мкм	Номинальная линейная плотность, текс	Количество комплексных нитей	Разрывная нагрузка, Н не менее	Тип замаслевателя
РБТ 13-1600	13	1600	4	400	крахмал
РБТ 13-2400	13	2400	6	630	силановый
РБО 13-300	13	300	1	170	силановый
РБН 16-4800	16	4800	8	2160	силановый
РБН 16-800	16	800	1	50	силановый

Определим значение предела прочности ровинга при растяжении [7].

$$\sigma_{Ba} = \frac{F_p}{A},$$

где $F_p = 1000$ Н — разрывная нагрузка ровинга;
 $A = \frac{T}{\rho} \cdot 10^{-3}$ — общая площадь нагружаемых волокон, мм² (T — номинальная линейная плотность, текс; ρ — плотность стекловолокна, г/см³):

$$A = \frac{2400}{2,54} \cdot 10^{-3} = 0,944 \text{ мм}^2;$$

$$\sigma_{Ba} = \frac{1000}{0,944} = 1059 \text{ МПа}.$$

Как видно, 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), так как упругие характеристики пучка зависят только от упругости нитей его составляющих.

Модуль упругости и предел прочности композитной арматуры рассчитывается по формулам [7]

$$E = E_a p_a + E_c p_c; \sigma_B = \sigma_{Ba} p_a + \sigma_{Bc} p_c, \quad (1)$$

где E_a , σ_{Ba} — модуль упругости и предел прочности армирующего стекловолоконного ровинга; E_c , σ_{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 (1), необходимо определить объемные доли стекловолокна и связующего в композите.

Объемная доля армирующего стекловолокна в композите определяется по формуле [7]

$$p_a = \frac{C_a \rho_c}{C_a \rho_c + C_c \rho_a}, \quad (2)$$

где C_a , C_c — массовые доли стекловолокна и связующего в композите соответственно; ρ_a , ρ_c — плотность стекловолокна и связующего в композите соответственно.

Для определения массовой доли стекловолокна был проведен отжиг образцов, т. е. выпарено связующее. В итоге отношение массы исходного образца

к массе выпаренного образца для арматуры диаметром 8 и 10 мм имеет значения: $C_{a(8)} = 0,475 = 47,5 \%$, $C_{a(10)} = 0,524 = 52,4 \%$. Соответственно массовая доля связующего составляет $C_{c(8)} = 52,5 \%$, $C_{c(10)} = 47,6 \%$.

Тогда, используя формулу (2), объемное содержание стекловолокна в арматуре будет

$$p_{a(8)} = \frac{47,5 \cdot 1,38}{47,5 \cdot 1,38 + 52,5 \cdot 2,5} = 33\%;$$

$$p_{a(10)} = \frac{52,4 \cdot 1,38}{52,4 \cdot 1,38 + 47,6 \cdot 2,5} = 38\%.$$

Соответственно на долю связующего приходится $p_{c(8)} = 67 \%$, $p_{c(10)} = 62 \%$.

Согласно формуле (1), модули упругости будут иметь значения

$$E_{(8)} = 73 \cdot 0,33 + 2,8 \cdot 0,67 = 24 + 1,8 \approx 26 \text{ ГПа};$$

$$E_{(10)} = 73 \cdot 0,38 + 2,8 \cdot 0,62 = 27,8 + 1,7 \approx 30 \text{ ГПа}.$$

Сравнивая результаты, полученные по формуле (1), 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 равен соответственно:

$$\sigma_{B(8)} = 1059 \cdot 0,33 + 50 \cdot 0,67 = 350 + 33 = 383 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{B(10)} = 1059 \cdot 0,38 + 50 \cdot 0,62 = 402 + 31 = 433 \text{ МПа}.$$

Имеет место хорошее соответствие экспериментальным данным (отклонение не более 5 %). 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 [7–9]

$$\alpha = \frac{E_a \alpha_a p_a + E_c \alpha_c p_c}{E_a p_a + E_c p_c}, \quad (3)$$

где α_a и α_c — температурные коэффициенты линейного расширения армирующего стекловолокна и связующего соответственно:

$$\alpha_{(8)} = \frac{73 \cdot 5 \cdot 0,33 + 2,8 \cdot 1,1 \cdot 0,67}{73 \cdot 0,33 + 2,8 \cdot 0,67} \cdot 10^{-6} = 4,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1};$$

$$\alpha_{(10)} = \frac{73 \cdot 5 \cdot 0,38 + 2,8 \cdot 1,1 \cdot 0,62}{73 \cdot 0,38 + 2,8 \cdot 0,62} \cdot 10^{-6} = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Влияние температуры на механические характеристики композитной арматуры. Коэффициенты влияния. Модуль упругости композитной арматуры определяется модулем упругости стекловолокна и практически не изменяется до температуры, соответствующей температуре размягчения стекла (см. таблицу 1).

Предел прочности композитной арматуры существенным образом зависит от температуры. Так, на рисунке 3 показана зависимость [9], отражающая уменьшение предела прочности стекловолокна и базальтового волокна с ростом температуры.

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

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

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 3) арматура диаметром 10 мм будет иметь предел прочности

$$\sigma_{B(10)} = 1059 \cdot 0,38 \cdot 0,8 + 50 \cdot 0 = 322 \text{ МПа}.$$

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

$$\sigma_{B(10)} = \frac{F_{\max(10)}}{A_{l_0}} = \frac{27000}{78,5} = 344 \text{ МПа}.$$

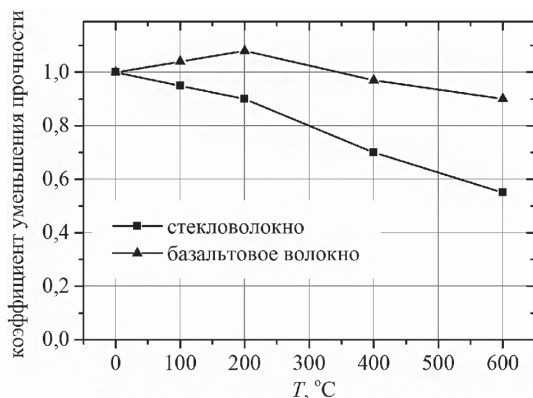


Рисунок 3 — Зависимость уменьшения прочности волокон с ростом температуры

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

На основе экспериментальных данных (таблица 3) построим модель поведения композитной арматуры под нагрузкой с учетом действующей температуры.

В таблице 3 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

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

где γ_{ct} — коэффициент снижения предела прочности композита; β_{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 рисунку 3.

Например, рассчитаем значение коэффициента γ_{ct} и β_{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 (1)), и прочность композитной арматуры будет определяться только прочностью стекловолокна при действующей температуре. Тогда значение коэффициента снижения предела прочности композитной арматуры можно определить как

$$\gamma_{ct} = \frac{\sigma_B(300 \text{ } ^\circ\text{C})}{\sigma_B^0} = \frac{1059 \cdot 0,38 \cdot 0,8 + 50 \cdot 0}{433} = 0,74.$$

Значение коэффициента снижения модуля упругости

$$\beta_{ct} = \frac{E_c(300 \text{ } ^\circ\text{C})}{E_c^0} = \frac{73 \cdot 0,38 + 2,8 \cdot 0}{30} = 0,92.$$

Таблица 3 — Значения физико-механических характеристик арматуры с диаметром 10 мм

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

Таблица 4 — Значения коэффициентов влияния γ_{ct} и β_{ct} для композитной арматуры

Наполнитель	Коэф.	Значение коэффициентов γ_{ct} , β_{ct} при нагреве арматуры до температуры, °C							
		20	200	300	400	500	600	700	800
Стекловолокно	γ_{ct}	1,0	0,95	0,74	0,65	0,59	0,51	0,46	0,42
	β_{ct}	1,0	1,0	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92

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

Расчеты показали, что значения коэффициентов влияния практически не зависят от диаметра арматуры. Для интересующего интервала температур величины коэффициентов влияния представлены в таблице 4.

Модель упругопластического поведения композитной арматуры. Для последующего проведения расчетов бетонных конструкций, армированных композитной арматурой, необходимо построить модель поведения арматуры с учетом влияния температуры. Поведение арматуры под нагрузкой может быть представлена двухлинейной диаграммой деформирования. Первый участок будет описывать поведение арматуры до разрушения, второй участок будет соответствовать разрушенной арматуре.

Для любой температуры двухлинейную диаграмму деформирования композитной арматуры можно построить, используя модуль упругости, предел прочности при нормальных условиях и коэффициенты влияния из таблицы 4

$$\sigma_b(T) = \gamma_{ct} \sigma_b^0; E_c(T) = \beta_{ct} E_c^0.$$

В итоге получим упругопластическую температурно-зависимую модель деформирования композитной арматуры, представленную на рисунке 4.

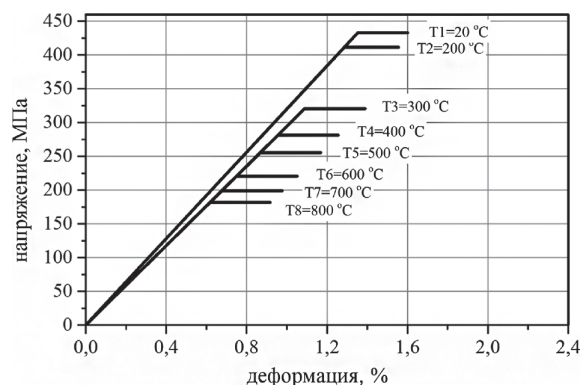


Рисунок 4 — Модель упругопластического температурно-зависимого деформирования композитной арматуры

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

Построение всех диаграмм автоматизировано и параметризовано в программной среде ANSYS. Созданы базы данных, включающие в себя коэффициенты влияния и коэффициенты теплового расширения для композитной арматуры со стекловолокном и базальтовым наполнителем. Т. е. для того, чтобы задать модель упругопластического поведения материала арматуры, необходимо задать прочностные и упругие характеристики этого материала при нормальной температуре (см. рисунок 3), выбрать число температурных зависимостей и сослаться на базу коэффициентов влияния, соответствующий типу выбранного наполнителя.

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 локальном тепловом воздействии. 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 могут использоваться для теплотехнического и прочностного расчета бетонных плит, армированных композитной арматурой.

Список литературы

1. Тюкаев, В.Н. Пластики конструкционного назначения / В.Н. Тюкаев. — М.: Стройздат, 1974. — 135 с.
2. Гольденблат, И.И. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов / И.И. Гольденблат, В.А. Копнов. — М.: Машиностроение, 1968. — 191 с.
3. Голованов, В.И. Экспериментальные и аналитические исследования огнестойкости сплошной бетонной плиты со стальной и композитной арматурой / В.И. Голованов, В.В. Павлов, А.В. Пехотников // Пожарная безопасность. — 2013. — № 2. — С. 44–51.
4. Кудряшов, В.А. Результаты экспериментальных исследований огнестойкости полимерных композитных матери-

- алов армированных стекловолокном / В.А. Кудряшов, А.С. Дробыш, А.М. Соловьянчик // Вестн. Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. — 2015. — № 1(21). — С. 17–24.
5. Экспериментальные исследования огнестойкости полимерных композитных конструкций с огнезащитой / В.А. Кудряшов [и др.] // Вестн. Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. — 2015. — № 1(21). — С. 25–29.
6. Willam, K.J. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete / K.J. Willam, E.D. Warnke // Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering. — 1975. — Vol. 19. — Pp. 174.
7. Ставров, В.П. Механика композиционных материалов: учеб. пособие. — Минск: БГТУ, 2008. — 260 с.
8. Тимошенко, С.П. Соппротивление 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.
9. Гутников, С.И. Стекланные волокна: учеб. пособие. — М.: МГУ им. Ломоносова, 2010. — 53 с.

SHIRKO Alex V., Cand. Phys.-Math. Sc.

Senior Lecturer of the Chair for Mechanics of Materials and Constructions¹

KAMLUK Alex N., Cand. Phys.-Math. Sc., Associate Professor

Deputy Chief of the Institute²

SPIGLAZOV Andrew V., Cand. Techn. Sc., Associate Professor

Head of the Chair for Mechanics of Materials and Constructions¹

DROBYSH Anton S.

Senior Engineer of the Sciences and Research Department²

E-mail: aantox@mail.ru

¹Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

²The State Educational Establishment “Institute for Command Engineers” of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 03 March 2015.

COMPOSITE REINFORCEMENT STRENGTH AND STIFFNESS ANALYSIS IN TEMPERATURE VIEW

Composite reinforcement mechanical and elastic characteristics experimental tests were conducted. Mentioned tests were carried out under normal conditions as far as at high temperatures. A model of the composite reinforcement behavior was developed, which takes into account the temperature influence on mechanical and elastic properties. A database containing temperature coefficients for reinforcing with different types of filler was developed.

Keywords: composite reinforcing, roving, destruction, elastic modulus, tensile strength, temperature

References

1. Tjukaev V.N. *Plastiki konstrukcionnogo naznachenija* [Plastics for constructional purposes]. Moscow, Strojzdat Publ., 1974. 135 p.
2. Gol'denblat I.I. *Kriterii prochnosti i plastichnosti konstrukcionnyh materialov* [The criteria strength and plasticity of constructional materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 191 p.
3. Golovanov V.I. *Jeksperimental'nye i analiticheskie issledovanija ognestojkosti sploshnoj betonnoj plity so stal'noj i kompozitnoj armaturoj* [Experimental and analytical research of fire resistance solid concrete slab with steel and composite reinforcement]. *Pozharnaja bezopasnost'* [Fire safety], 2013, no. 2, pp. 44–51.
4. Kudrjashov V.A. *Rezul'taty jeksperimental'nyh issledovanij ognestojkosti polimernyh kompozitnyh materialov armirovannyh steklovoloknom* [Results of experimental researches fire resistance of polymer composite materials reinforced with fiberglass]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'* [Herald of the Institute for Command Engineers of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus], 2015, no. 1(21), pp. 25–29.
5. Kudrjashov V.A. *Jeksperimental'nye issledovanija ognestojkosti polimernyh kompozitnyh konstrukcij s ognезashhitoy* [Experimental researches fire resistance of polymer composite structures with fire protection]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'* [Herald of the Institute for Command Engineers of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus], 2015, no. 1(21), pp. 25–29.
6. Willam K.J., Warnke E.D. *Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete*. *Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering*, 1975. 174 p.
7. Stavrov V.P. *Mehanika kompozicionnyh materialov* [The mechanics of composite materials]. Minsk, 2008. 260 p.
8. Timoshenko S. P. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, 1965. 480 p.
9. Gutnikov S.I. *Stekljannye volokna* [Glass fibers]. Moscow, 2010. 53 p.