

УДК 620.172.212

**Б.А. Бондарев**, д-р техн. наук, профессор, ЛГТУ (Липецк, Россия) (e-mail: Insp-48@mail.ru)**Н.Н. Черноусов**, канд. техн. наук, доцент, ЛГТУ (Липецк, Россия) (e-mail: nto\_tezis@mail.ru)**Р.Н. Черноусов**, канд. техн. наук, доцент, ЛГТУ (Липецк, Россия) (e-mail: ozzgood@inbox.ru)**В.А. Стурова**, магистрант, ЛГТУ (Липецк, Россия) (e-mail: v-livenceva@mail.ru)

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ВЗАИМОВЛИЯНИЯ СТАЛЬНЫХ ФИБР, РАВНОНАПРАВЛЕННО РАСПОЛОЖЕННЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНО УСИЛИЮ В МЕЛКОЗЕРНИСТОМ ШЛАКОБЕТОНЕ**

*В настоящее время все более актуальным становится использование современных технологий. Это касается и строительства и норм проектирования конструкций. Появляется необходимость более широкого использования компьютерных технологий, что позволит в будущем с помощью нелинейной деформационной модели решать многофакторные задачи с учётом фактического напряжённо-деформированного состояния конструкций на всех стадиях их работы.*

*Целью настоящей работы является исследование характера взаимодействия стальных фибр, равнонаправленно расположенных параллельно усилию в мелкозернистом шлакобетоне, в частности, определение коэффициента, характеризующего изменение величины вклада в работу элемента фибровой арматуры в зависимости от длины заделки соседних фибр в шлакобетоне и качества сцепления между ними, а также построение графической модели работы стальных фибр в матрице шлакобетона, диаграмм деформирования (состояния) бетона, арматуры и фибры, которые являются интегральной характеристикой физико-механических свойств материалов.*

*Проведены испытания на выдёргивание стальных фибр с одиночными отгибами по концам из мелкозернистого шлакобетона. Получены экспериментальные зависимости смещения фибр от приложенной нагрузки. На основе результатов анализа экспериментальных данных предложены формулы для определения значений координат кусочно-линейных диаграмм «нагрузка-смещение», описывающих смещение единичной фибры из мелкозернистого шлакобетона, что позволяет сделать выводы об их взаимодействии на анкерующую способность в мелкозернистом шлакобетоне.*

*Предложены зависимости для определения коэффициента, характеризующего изменение величины вклада в работу элемента фибровой арматуры в зависимости от длины заделки соседних фибр в шлакобетоне и качества сцепления между этими фибрами и шлакобетоном-матрицей.*

*В работе также представлены универсальные зависимости, которые служат для построения аналитических кусочно-линейных диаграмм «нагрузка-смещение» и описывают работу фибры, заделанной в мелкозернистый шлакобетон, при осуществлении расчётов элементов строительных конструкций из сталефиброшлакобетона на ЭВМ по диаграммной методике.*

**Ключевые слова:** мелкозернистый шлакобетон, фибра, сталефиброшлакобетон, прочность шлакобетона на сжатие.

DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-2-72-82

**Ссылка для цитирования:** Экспериментальное исследование характера взаимодействия стальных фибр, равнонаправленно расположенных параллельно усилию в мелкозернистом шлакобетоне / Б.А. Бондарев, Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов, В.А. Стурова // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 2(71). С. 72-82.

\*\*\*

Современный этап развития норм проектирования сталефибробетонных (СФБ) конструкций характеризуется необходимостью более широкого использования компьютерных технологий. Это позволяет с помощью нелинейной деформационной модели решать многофакторные за-

дачи с учётом фактического напряжённо-деформированного состояния конструкций на всех стадиях их работы. Основу этой модели составляют диаграммы деформирования (состояния) бетона, арматуры и фибры, которые являются интегральной характеристикой физико-меха-

нических свойств материалов и могут быть описаны различными математическими выражениями, что предопределяет точность получаемых расчётных данных [1].

Исследование характера поведения стальных фиброволокон в матрице бетона имеет целью построение общей модели поведения сталефибробетона при сложных видах нагружения как в упругой стадии, так и в стадии трещинообразования; причём в последнем случае особое значение приобретают данные о работе единичного фиброволокна при его смещении (выходе) в шлакобетоне-матрице. В настоящее время задачи изучения работы фибр актуализируются расширением применения СФБ конструкций из бетонов, позволяющих использовать для их производства вторичные отходы различных отраслей промышленности и местные заполнители, что способствует экономичному потреблению материальных и энергетических ресурсов, снижению стоимости и трудоёмкости технологических процессов. К таким бетонам, в частности, относится мелкозернистый шлакобетон на основе отсева от дробления литого шлакового щебня [3]. Мелкозернистый шлакобетон нашёл своё применение при проектировании конструкций транспортных сооружений: в устройстве оснований дорожных одежд из сталефиброшлакобетона (СФШБ) классов бетона-матрицы В10, В15 и др.

Теоретические предпосылки расчёта прочности фибробетона как композиционного материала в упругой стадии основываются на законе аддитивности с учётом особенностей работы бетонной матрицы. При этом несущая способность сечения элемента определяется исходя из более низких значений модуля упругости и уровня предельных деформаций матри-

цы по сравнению с этими же параметрами для армирующих волокон. При осевом растяжении в предельной стадии учитывают работу одних только волокон (фибр) [2]. В данном случае уравнение прочности фибробетона со свободной ориентацией фибр в объёме элемента имеет следующий вид:

$$R_{\text{fbt}} = \lambda_{\text{red}} R_f \mu_{\text{fv}},$$

$$\lambda_{\text{red}} = \lambda_p \lambda_{\text{or}} \lambda_{\text{an}},$$

где  $\mu_{\text{fv}}$  - объёмный процент армирования,  $R_f$  - прочность фибры на растяжение;  $\lambda_{\text{red}}$  - коэффициент приведения фибрового армирования к направленному;  $\lambda_p$ ,  $\lambda_{\text{or}}$ ,  $\lambda_{\text{an}}$  - коэффициенты, учитывающие соответственно: вероятность пересечения фибрами расчётной плоскости СФБ элемента, вероятное отклонение направления усилий в фибрах от направления расчётной плоскости, вероятную анкеровку фибр [2].

Такой подход применим в случае, когда прочность бетонов сравнительно высока и степень взаимовлияния фибр в расчётном сечении элемента пренебрежительно мала. В случае ШБ классов В5...В20 такое взаимовлияние существенно, и для его учёта необходимо введение числового коэффициента.

Целью настоящей работы является исследование характера взаимовлияния стальных фибр, равнонаправленно расположенных параллельно усилию в мелкозернистом шлакобетоне, в частности, определение коэффициента, характеризующего изменение величины вклада в работу элемента фибровой арматуры в зависимости от длины заделки соседних фибр в шлакобетоне и качества сцепления между ними.

В проведённых исследованиях в качестве волокна использовалась фибра «Драмикс» бельгийской фирмы «Бекарт»,

длиной  $l_f = 60$  мм, диаметром  $d_f = 0,8$  мм, с временным сопротивлением разрыву  $R_f = 980-1200$  МПа.

Опытные образцы и схемы анкеровки фибры в образцах представлены на рисунке 1а. Геометрические характеристики фибры и образца приведены на рисунке 1б. При изготовлении образцов использовались комбинации следующих анкеровок фиброволокон в матрице бетона: 10 мм, 20 мм и 30 мм. Расстояние между фибрами в образце составляло 5 мм (максимальный размер фракции отсева от дробления литого шлакового щебня).

В исследуемых составах использовались в качестве вяжущего цемент марки ПЦ-500 D0 Липецкого цементного завода и пластифицирующая добавка Реламикс (10% раствор), а в качестве заполнителя – отсев от дробления литого шлакового щебня фракции 0...5 мм с насыпной плотностью от 1085 до 1135 кг/м<sup>3</sup>. В исследованиях использовались бетоны классов В7,5 (М100), В15 (М150), В20 (М200), В25 М(250).

Всего было проведено 144 отдельных испытания, - по три опытных образца на каждый вариант комбинации анкеровки и класса шлакобетона.

Прочность бетона на сжатие определялась предварительно на стандартных образцах согласно указаниям ГОСТ 10180-90. Твердение бетона происходило в лабораторных условиях в течение 50-ти суток при температуре  $18 \pm 2^\circ\text{C}$  и влажности  $65 \pm 5\%$ .

В таблице 1 представлены значения заделки фиброволокон для каждого типа образцов.

Испытания проводились в специально разработанном устройстве, позволяющем определять смещение фибры при выходе из бетона-матрицы [4]. Схемы нагружения, закрепления и фотоиллюстрации образцов в захватах установки представлены на рис. 2а. Смещение фибр измерялось с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм, который имеет рабочий ход штока 1 мм.

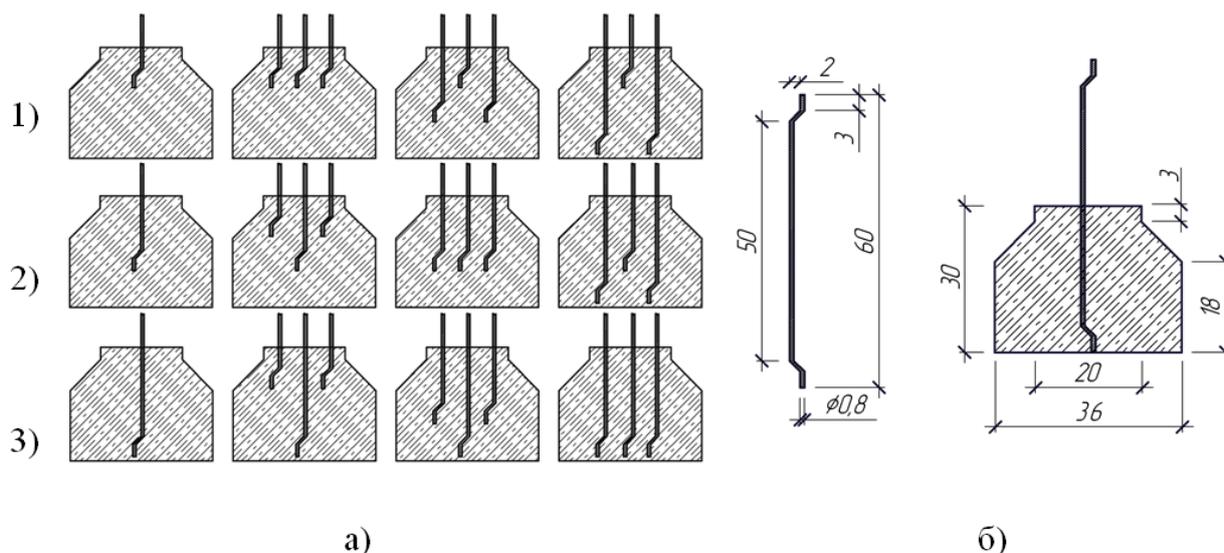


Рис. 1. Опытные образцы: а – анкеровка центральной фибры: 1)  $l_{f,an} = 10$  мм, 2)  $l_{f,an} = 20$  мм; 3)  $l_{f,an} = 30$  мм; б – геометрические характеристики фибры и испытательного образца

Таблица 1

Значения анкеровок фибр для каждой серии испытаний

№ серии	№ комбинации анкеровки фибр	Анкеровка центральной фибры, $l_{f,an}$ , мм	Анкеровка соседних фибр, $l_{f,an}^c$ , мм	$\frac{l_{f,an}^c}{l_{f,an}}$
1	1	10	0	0
	2		10	1,0
	3		20	2,0
	4		30	3,0
2	1	20	0	0
	2		10	0,5
	3		20	1,0
	4		30	1,5
3	1	30	0	0
	2		10	0,33
	3		20	0,67
	4		30	1,0

Данный индикатор упирался в шляпку специально изготовленной подвижной опоры, которую в случае необходимости можно фиксировать. В ходе эксперимента данная опора вручную неоднократно перемещалась и фиксировалась, что позволяло измерить нагрузку при любом смещении фибры.

Режим нагружения был монотонный, с одинаковой скоростью. Временную выдержку составляли паузы в 5-10 секунд, требуемые для изменения положения опоры для штока индикатора. Изредка наблюдались эффекты кратковременной ползучести при нагружении.

На рисунке 26 представлены усреднённые эмпирические кривые зависимости «смещение-нагрузка» для трёх серий испытаний: класс бетона – В25 ( $R_m = 27,6$  МПа), цифрами обозначены графики, соответствующие комбинациям анкеровок фибр, представленным в таблице 2.

Большинство исследователей предлагают описывать диаграмму «нагрузка-смещение» посредством характерных точек, полученных из анализа эмпирических кривых выхода гладкой фибры из бетона [5, 6, 7]. Такие диаграммы являются кусочно-линейными и имеют различный вид, который зависит как от прочностных характеристик бетона и фибры, так и от величин, определяющих характер взаимодействия стальной фибры и бетона.

Кривые «нагрузка-смещение» нагруженной единичной фибры с одиночным отгибом на конце можно также представить в кусочно-линейном виде. Представленная на рис. 3а диаграмма и, соответственно, эмпирические зависимости для определения координат точек на ней получены для случая смещения единичного волокна, заделанного в шлакобетон параллельно оси приложения нагрузки, т. е. на основе анализа серий экспериментов с комбинацией №1 (см. табл. 1).

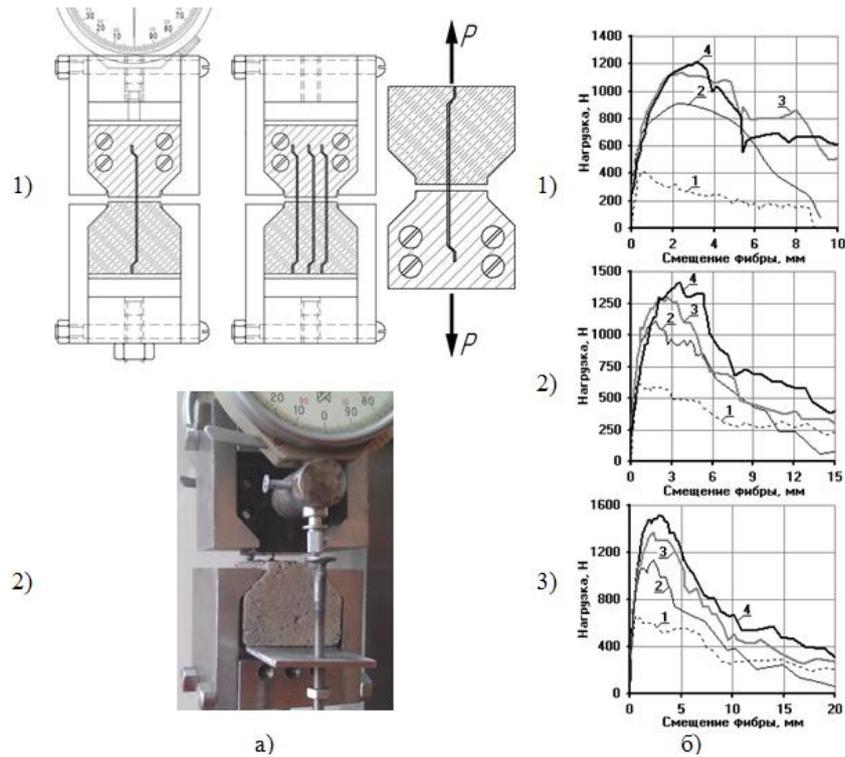


Рис. 2. а – Схемы нагружения (1) и фотоиллюстрация закрепления образца в захватах установки (2); б – Экспериментальные зависимости «нагрузка-смещение» загруженных концов фибр, заделанных в шлакобетон класса В25 (М250): 1) для 1-й серии испытаний, 2) для 2-й серии, 3) для 3-й серии; цифрами обозначены номера комбинаций анкеронок фибр

Анализ экспериментальных данных позволил получить зависимости, определяющие значения координат характеристических точек диаграммы «нагрузка-смещение» для фибры с одиночным отгибом на конце:

$$\text{для точки } H_{01}: W_{H_{01}} = 1 - 0,02R_m,$$

$$P_{H_{01}} = (355 + 11R_m)(0,55 + 0,015l_{\text{ан}});$$

$$\text{для точки } H_{02}: W_{H_{02}} = 3W_{H_{01}},$$

$$P_{H_{02}} = 0,7P_{H_{01}};$$

$$\text{для точки } H_{03}: W_{H_{03}} = 6W_{H_{01}},$$

$$P_{H_{03}} = 0,6P_{H_{01}};$$

$$\text{для точки } H_{04}: W_{H_{04}} = 8W_{H_{01}},$$

$$P_{H_{04}} = 0,4P_{H_{01}}.$$

Здесь  $l_{\text{ф,ан}}$  – длина заделки фибры (мм);  $W_{H_{0i}}$  – абсцисса точки (смещение фибры, мм);  $P_{H_{0i}}$  – ордината точки (нагрузка, Н).

Анализ полученных экспериментальных диаграмм для фибр, заделанных в комбинациях 2-4, позволяет сделать выводы об их взаимовлиянии на анкерующую способность в мелкозернистом шлакобетоне. Соседние фиброволокна оказывают влияние на работу центральной фибры. Вычисление работы центральной фибры в случае комбинаций 2-4 осуществляется посредством разделения общей работы комбинации фибр на работу каждой фибры в отдельности.

Отметим, что при анализе экспериментальных кривых гипотезу равнонагруженности трёх фибр, которые выдёргивают одновременно, можно применить только для двух крайних фибр из-за их симметричного расположения. На крайние и средние фибры нагрузка (и соответственно работа усилий при выдергивании) будет распределяться пропорци-

онально их жёсткости на выдергивание, в каждый момент испытаний это соотношение будет разным. С учётом этого фактора, нагрузка на каждую фибру рассчитывалась в зависимости от длины заделки фибры в шлакобетоне.

Например, на диаграмме, полученной при испытании образца второй серии с комбинацией №2 (рис. 3б), тёмная область под диаграммой – работа трёх

фибр, светлая область – работа единичной центральной фибры, соседние фибры на последнем участке вышли из матрицы бетона. Из работы, выделенной тёмно-серым цветом, вычитается работа соседних фибр, известная из диаграмм работы единичной фибры (комбинация №1), которые будут различны в зависимости от длины заделок соседних фибр.

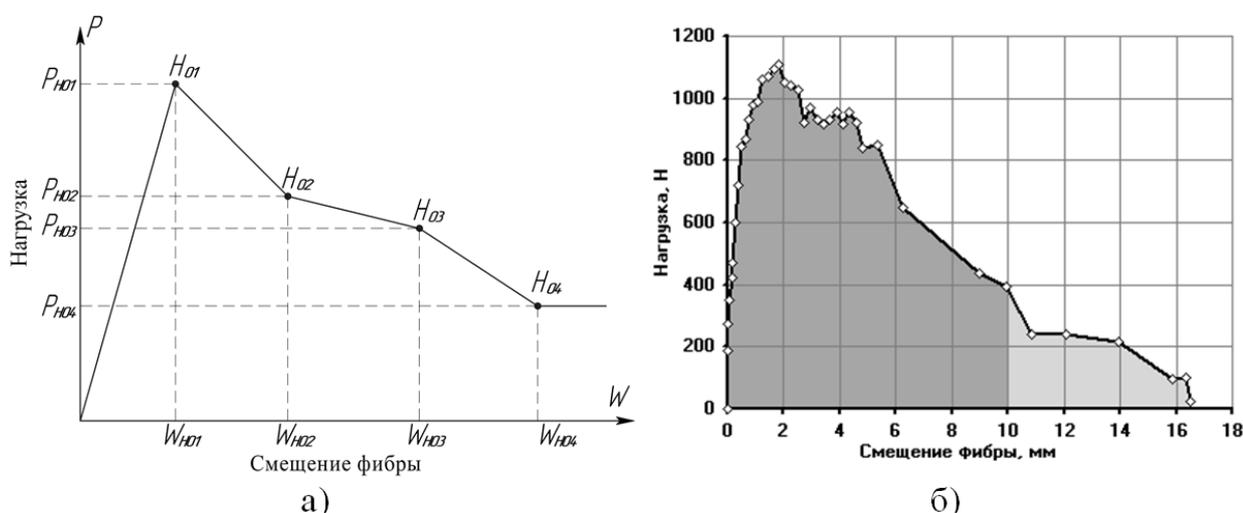


Рис 3. а – кусочно-линейная диаграмма «нагрузка-смещение» для стальной фибры с одиночным отгибом на конце; б – работа фибр в матрице шлакобетона (серия испытаний №2, комбинация фибр №2, класс шлакобетона В20 (М250))

Сравнивая полученную работу центральной фибры с работой единичной фибры с той же анкеровкой, получим коэффициент изменения работы  $k_A$ .

В результате обработки опытных данных получена зависимость для определения коэффициента  $k_A$ , характеризующего изменение величины вклада в работу элемента фибровой арматуры в зависимости от длины заделки соседних фибр в шлакобетоне и качества сцепления между ними.:

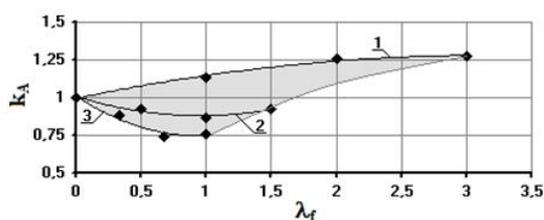
$$k_A = (0,24 \cdot l_{f,an} - 2,7) \cdot \frac{\lambda_f^2}{R_m} + (7,7 - 0,52 \cdot l_{f,an}) \cdot \frac{\lambda_f}{R_m} + 1, \quad (1)$$

где  $\lambda_f = l_{f,an}^c / l_{f,an}$ ,  $R_m$  – кубиковая прочность шлакобетона.

На рисунке 4а графически представлен пример области, в которой лежат значения коэффициента  $k_A$  для шлакобетона класс В15 (М150) ( $R_m = 18,3$  МПа) в зависимости от величины  $\lambda_f$ : кривая 1 применима для фиброволокон первой серии испытаний ( $l_{f,an} = 10$  мм), 2 – для второй серии ( $l_{f,an} = 20$  мм) и 3 – для третьей серии ( $l_{f,an} = 30$  мм) испытаний; точками здесь обозначены эмпирические значения коэффициента. Заметим, что для одних и тех же значений величины  $\lambda_f$  возможны случаи увеличения работы центральной

фибры ( $k_A > 1$ ), а также случаи уменьшения её работы ( $k_A < 1$ ).

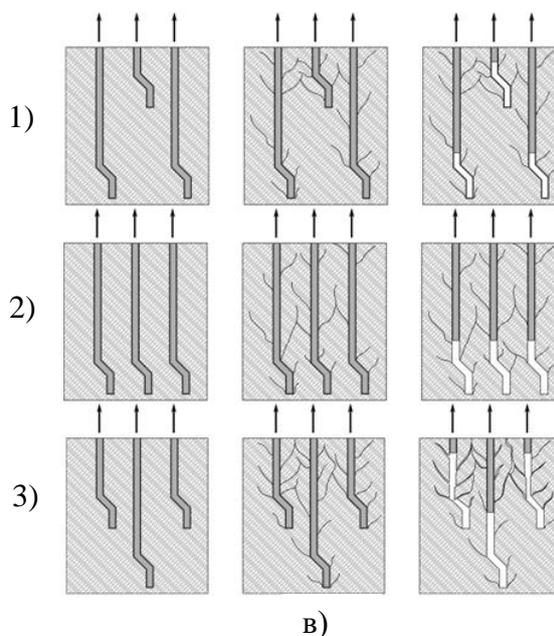
В случае использования кусочно-линейных диаграмм, коэффициент  $k_A$  определяет, во сколько раз увеличится (уменьшится) площадь под кусочно-линейной диаграммой. При этом влияние данного коэффициента на ординаты характери-



а)



б)



в)

Рис. 4. а – область значений коэффициента  $k_A$ ; б – фотоиллюстрации треков фибры в поперечном срезе образцов после испытания; в – характер образования микротрещин в зависимости от расположения фибр

Все случаи взаимного расположения центральной и соседних фибр можно условно разделить на три типа.

1. Анкеровка центральной фибры не превышает среднее значение анкеровок соседних фибр,  $l_{f,an} < l_{f,an}^c$ . В этом случае, если  $l_{f,an} = 10$  мм и  $k_A \geq 1,1$  практически на всей стадии нагружения будет происходить незначительное повышение работы центрального волокна, поскольку микротрещины, возникающие в шлакобетоне при нагружении и распространяющиеся в разных направлениях от соседних фибр, затрудняют развитие друг друга и развитие микротрещин, имеющих в бетоне до нагружения. В ином случае, когда

$l_{f,an} > 10$  мм и  $k_A < 1$ , будет иметь место незначительное понижение работы. В этих случаях ординаты точек  $H_{01}$ ,  $H_{02}$ ,  $H_{03}$ ,  $H_{04}$  будут изменены в  $0,9k_A$  раз:

$$P'_{0i} = 0,9k_A P_{0i}.$$

2. Анкеровка центральной фибры равнозначна анкеровкам соседних фибр,  $l_{f,an} = l_{f,an}^c$ . Здесь также на начальной стадии нагружения будет происходить изменение работы центрального волокна из-за препятствующих развитию друг друга микротрещин в бетоне. В дальнейшем, когда фибра выпрямится и лишится отгиба на конце, развитие трещин будет носить незначительный характер. Изме-

ние значений ординат точек  $H_{01}$ ,  $H_{02}$ ,  $H_{03}$ ,  $H_{04}$ , аналогично случаю 1, будут зависеть от значения коэффициента  $k_A$ :

$$\begin{aligned} P'_{01} &= 0,9k_A P_{01}, P'_{02} = 0,8k_A P_{02}, \\ P'_{03} &= 0,7k_A P_{03}, P'_{04} = 0,6k_A P_{04}. \end{aligned} \quad (3)$$

3. Анкеровка центральной фибры превышает среднее значение анкеровок соседних фибр,  $l_{f,an} > l_{f,an}^c$ . В этом случае лишь на первой стадии нагружения будет происходить увеличение работы центральной фибры, в дальнейшем пустоты, образовавшиеся в результате выхода соседних фибр, будут способствовать развитию микротрещин и разрушению бетона, вследствие чего будет иметь место уменьшение работы центральной фибры. В этом случае ордината точки  $H_{01}$  будет увеличена (на  $\approx 10-15\%$ ); ординаты точек  $H_{02}$ ,  $H_{03}$ ,  $H_{04}$  будут уменьшены (на  $\approx 40-60\%$ ):

$$\begin{aligned} P'_{01} &= 1,13k_A P_{01}, P'_{02} = 0,94k_A P_{02}, \\ P'_{03} &= 0,7k_A P_{03}, P'_{04} = 0,6k_A P_{04}. \end{aligned} \quad (4)$$

Заметим, что при изменении ординат характеристических точек кусочно-линейной диаграммы «нагрузка-смещение» общее изменение площади диаграммы произойдет в  $k_A$  раз. Расчётные обоснования о характере влияния соседних фибр на работу средней расчетной центральной фибры для бетона класса В15 (М150) ( $R_m = 18,3$  МПа) представлены в таблице 2.

Зависимости (1)-(4) являются универсальными и служат для построения аналитических кусочно-линейных диаграмм «нагрузка-смещение», описывающих работу фибры, заделанной в мелкозернистый шлакобетон, при осуществлении расчётов элементов строительных конструкций из сталефиброшлакобетона на ЭВМ по диаграммной методике.

Таблица 2

Значения анкеровок фибр для каждой серии испытаний

№ серии	Анкеровка центральной фибры, $l_{f,an}$ , мм	$\lambda$	Средние значения $P, H$ (получены из экспериментальных диаграмм)				Расчётные значения $P', H$ (получены по формулам (1)-(4))			
			$P_{01}$	$P_{02}$	$P_{03}$	$P_{04}$	$P'_{01}$	$P'_{02}$	$P'_{03}$	$P'_{04}$
1	10	0	325,9	273,9	180,3	143,9	389,4	272,6	233,6	155,8
		1,00	376,5	249,0	193,6	105,1	389,0	242,1	181,5	103,8
		2,00	402,1	293,5	250,0	160,7	410,0	287,0	245,9	164,1
		3,00	410,3	280,4	261,3	171,8	417,0	291,9	250,2	166,9
2	20	0	488,3	355,4	306,5	260,0	472,9	331,0	283,7	189,2
		0,50	503,6	281,3	189,7	110,1	507,6	295,6	188,7	107,8
		1,00	410,6	267,3	203,4	100,5	408,6	254,2	190,6	108,9
		1,50	428,9	297,8	260,7	182,4	434,1	303,9	260,4	173,7
3	30	0	590,1	450,3	400,1	306,3	556,3	389,4	333,8	222,5
		0,33	547,3	330,1	214,9	118,6	553,2	322,1	205,6	117,5
		0,66	208,1	296,4	193,4	114,7	515,5	300,1	191,6	109,5
		1,00	410,3	254,4	180,0	111,3	400,5	249,2	186,9	106,8

**Список литературы**

1. Исследование анкеровки стальной фибры с одиночными отгибами по концам в цементно-песчаном бетоне / Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов, А.В. Суханов, Б.А. Бондарев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2014. № 1(52). С. 111–117.

2. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. К расчёту прочности, жёсткости и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели // Известия КГАСУ. 2013. № 4(26). С. 113–120.

3. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов // Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: монография. М.: Издательство АСВ, 2004. 560 с.

4. Черноусов Р.Н. Прочность и деформативность элементов конструкций транспортных сооружений на основе мелкозернистого сталефиброшлакобетона // Научный вестник Воронеж. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. 2011. № 1(21). С. 87–97.

5. Пат. 2544299 Рос. Федерация: МПК G 01 N 3/08. Способ испытания образцов строительных материалов на растяжение: / Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов, А.В. Суханов, А.Н. Прокофьев. № 2013134589/28, заявл. 23.07.2013; опубл. 20.03.15, Бюл. № 8. 5с.: ил.

6. Черноусов Н.Н., Черноусов Р.Н., Суханов А.В. Исследование анкеровки стальной фибры в цементно-песчаном бетоне // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 2014. № 2. С. 96–103.

7. Черноусов Н.Н., Суханов А.В., Ливенцева А.В. Анализ диаграмм «нагрузка-смещение», описывающих работу гладкой стальной фибры с одиночными отгибами на концах в цементно-песчаной матрице // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. Липецк, 2014. С.93-95.

8. Черноусов Н.Н., Суханов А.В., Ливенцева А.В. Анализ диаграммы «нагрузка-смещение», описывающей работу гладкой стальной фибры в цементно-песчаной матрице // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. Липецк, 2014. С.95-97.

9. Bentur A., Midness S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. Second edition // New York, London: Taylor & Francis, 2007. 604 p.

10. Laranjeira F., Molins C., Aguado A. Predicting the pullout response of inclined hooked steel fibers // Cement and concrete research, 2010, no. 40. pp. 1471–1487.

*Поступила в редакцию 19.02.17*

UDC 620.172.212

**B.A. Bondarev**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Lipetsk State Technical University (Lipetsk, Russia) (e-mail: Insp-48@mail.ru)

**N.N. Chernousov**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Lipetsk State Technical University (Lipetsk, Russia) (e-mail: nto\_tezis@mail.ru)

**R.N. Chernousov**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Lipetsk State Technical University (Lipetsk, Russia) (e-mail: ozzgood@inbox.ru)

**V.A. Sturova**, Master in Technical Sciences, Lipetsk State Technical University (Lipetsk, Russia) (e-mail: v-livenceva@mail.ru)

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE NATURE OF INTERACTION OF STEEL FIBRES EQUIDIRECTIONALLY LOCATED IN PARALLEL TO FORCE IN FINE-GRAINED SLAG CONCRETE

*At present, the use of modern technologies is becoming more urgent. This concerns both construction engineering and structural design standards. There is a need for a wider use of computer technology, which will allow solving multifactorial tasks taking into account actual stress-strain state of structures at all the stages of their operation with the help of a nonlinear deformation model in the future.*

*The objective of this work is to study the nature of the interaction of steel fibers equidirectionally located in parallel to force in fine-grained slag concrete, in particular, to determine the coefficient characterizing the change in the contribution to the work of the fibre reinforcement unit depending on the length of the adjacent fibers embedment in the slag concrete and the quality of adhesion between them, and construction of a graphical model of steel fibers operation in cinderblock matrix, diagrams of deformation (state) of concrete, reinforcement and fibers which are an integral characteristic of physical and mechanical properties of materials.*

*Tests for the extraction of steel fibers with single offset bends at the ends of fine-grained slag concrete have been carried out. Experimental dependences of steel fibers displacement on the applied load have been obtained. Based on the results of the experimental data analysis, formulas for determining the coordinates of piecewise-linear 'load-displacement' diagrams are proposed; they describe the displacement of a single fiber from fine-grained slag-concrete, which allows drawing conclusions concerning their mutual influence on the anchoring ability in fine-grained slag concrete.*

*Dependencies for determining the coefficient characterizing the change in the contribution to the work of the fibre reinforcement unit depending on the length of the adjacent fibers embedment in the slag concrete and the quality of adhesion between these fibers and the slag concrete-matrix are proposed.*

*The work also presents common dependencies, which can be used to construct analytical piece-wise diagrams 'load-displacement' and describe the work of fiber embedded in fine-grained slag concrete when calculating the units of building structures from steel-fiber-slag-concrete by means of a computer using the diagram technique.*

**Key words:** fine-grained slag concrete, fibre, steel-fiber-slag-concrete, slag concrete compression breaking strength.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2017-21-2-72-82

**For citation:** Bondarev B.A., Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sturova V.A. Experimental Study of the Nature of Interaction of Steel Fibres Equidirectionally Located in Parallel to Force in Fine-Grained Slag Concrete, Proceeding of Southwest State University, 2017, vol. 21, no. 2(71), pp. 72-82 (in Russ.).

\*\*\*

### Reference

1. Issledovanie ankerovki stal'noj fibry s odinochnymi otgibami po koncam v cementno-peschanom betone / N.N. Chernousov, R.N. Chernousov, A.V. Suhanov, B.A. Bondarev //

Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2014. № 1(52). S. 111–117.

2. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radajkin O.V. K raschjotu prochnosti, zhjostkosti i treshhinostjokosti vnecentrenno szhatyh zhelezobetonnyh jelementov s

primenieniem nelinejnoj deformatsionnoj modeli // Izvestija KGASU. 2013. № 4(26). S. 113–120.

3. Rabinovich F.N. Kompozity na osnove dispersno armirovannyh betonov // Voprosy teorii i proektirovaniya, tehnologija, konstrukcii: monografija. M.: Izdatel'stvo ASV, 2004. 560 s.

4. Chernousov R.N. Prochnost' i deformativnost' jelementov konstrukcij transportnyh sooruzhenij na osnove melkozernistogo stalefibroshlakobetona // Nauchnyj vestnik Voronezh. gos. arh.-stoit. un-ta. Stroitel'stvo i arhitektura. 2011. № 1(21). S. 87–97.

5. Pat. 2544299 Ros. Federacija: MPK G 01 N 3/08. Sposob ispytaniya obrazcov stroitel'nyh materialov na rastjazhenie / N.N. Chernousov, R.N. Chernousov, A.V. Suhanov, A.N. Prokof'ev. № 2013134589/28, zajavl. 23.07.2013; opubl. 20.03.15, Bjul. № 8. – 5s.: il.

6. Chernousov N.N., Chernousov R.N., Suhanov A.V. Issledovanie ankerovki stal'noj fibry v cementno-peschanom betone // Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura. 2014. № 2. S. 96–103.

7. Chernousov N.N., Suhanov A.V., Livenceva A.V. Analiz diagramm «nagruzka-smeshhenie», opisyvajushhij rabotu gladkoj stal'noj fibry s odinochnymi otgibami na koncah v cementno-peschanoj matrice // Sbornik tezisov dokladov nauchnoj konferencii studentov i aspirantov Lipeckogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Lipeck, 2014. S.93-95.

8. Chernousov N.N., Suhanov A.V., Livenceva A.V. Analiz diagrammy «nagruzka-smeshhenie», opisyvajushhej rabotu gladkoj stal'noj fibry v cementno-peschanoj matrice // Sbornik tezisov dokladov nauchnoj konferencii studentov i aspirantov Lipeckogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Lipeck, 2014. S.95-97.

9. Bentur A., Midness S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. Second edition // New York, London: Taylor & Francis, 2007. 604 p.

10. Laranjeira F., Molins C., Aguado A. Predicting the pullout response of inclined hooked steel fibers // Cement and concrete research, 2010, no. 40. pp. 1471–1487.