

УДК 624.012.25

Ю.А. Семина

ОГАСА

ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ И МАЛОЦИКЛОВОЙ ЗНАКОПОСТОЯННОЙ НАГРУЗОК

Приведены результаты исследования разрушающего поперечного усилия образцов-балок при заданном виде нагружения. Получены и проанализированы адекватные математические модели прочности наклонных сечений прогонных железобетонных элементов с учетом изменения конструктивных факторов (относительного пролета среза, класса тяжелого бетона и коэффициента поперечного армирования), а также фактора внешнего воздействия (режима циклического нагружения).

Ключевые слова: балка, эксперимент, прочность, бетон, арматура, циклическая знакопеременная нагрузка, малоцикловая знакопостоянная нагрузка.

Большое количество пролетных железобетонных конструкций во время эксплуатации подвергается воздействию малоцикловых повторных и знакопеременных нагрузок, которые возникают в пределах эксплуатационного уровня, а иногда и превышают его. Такие явления возникают при ветровых, технологических, сейсмических, температурно-влажностных и других воздействиях, а также при реконструкции зданий и сооружений, сопровождаются изменением схемы нагружения и напряженно-деформированного состояния конструкций из железобетона, который по оценкам специалистов останется еще как минимум на 50 лет основным строительным материалом. Поэтому для повышения эффективности капитальных вложений существует реальная необходимость совершенствования используемых методов расчетов нормальных и, особенно, наклонных сечений указанных конструкций на указанные воздействия. Прежде всего, потому что изменение знака нагрузки, его уровня и неопределенного повторения в процессе эксплуатации может привести к последствиям, качественно отличающимся от полученных при расчете на постоянные нагрузки одного знака максимальной интенсивности, на которые, собственно, ориентировано большинство действующих норм проектирования.

Существенный вклад в развитие науки о сложном напряженно-деформированном состоянии железобетона, обусловленном циклическими нагрузками, сделали такие признанные специалисты и известные ученые, как Т.Н. Азизов, В.С. Александровский, В.Я. Багрий, А.М. Бамбура, А.Я. Барашиков, А.Я. Берг, Г.Ф. Бегенев, В.В. Блинков, З.Я. Блихарский, А.П. Борисюк, А.И. Валовой, А.В. Войцеховский, А.С. Городецкий, Б. Гнидец, О.Б. Гольшев, С.С. Гомон, П.С. Гомон, А.Б. Григорчук, В.А. Гришин, А.В. Гришин, А.И. Давыденко, В.С. Дорофеев, Е.В. Жук, Н.И. Ильчук, В.В. Караван, В.Г. Казачек, Н.И. Карпенко, Р.И. Кинаш, И.Л. Корчинский, В.Г. Кваша, Е.В. Клименко, Ф.Е. Клименко, С.Ф. Клованич, А.И. Корнейчук, А.М. Кокарев, Ю.А. Крусъ, В.С. Кукунаев, В.И. Корсун, А.Н. Кухнюк, И.И. Лучко, Л.Р. Маилян,

Г.А. Молодченко, Р.Х. Мирмухамедов, Ю.И. Немчинов, Ю.М. Панчук, О.В. Перельмутер, А.П. Погореляк, В.А. Ржевский, В.В. Руденко, М.В. Савицкий, А.В. Семко, Г.М. Ставров, С.А. Фомин, Т.Л. Чирва, Е.Д. Чихладзе, А.Л. Шагин, Б.Н. Шевченко, В.С. Шмуклер, А.Ф. Яременко, А.В. Яшин и др.

Большой вклад в изучение вопросов прочности и трещиностойкости наклонных сечений пролетных железобетонных элементов сделали такие известные специалисты, как М.С. Боришанский, Р. Вальтер, П.Ф. Вахненко, А.А. Гвоздев, Л.Г. Двоскина, А.А. Дмитренко, Л.А. Дорошкевич, В.С. Дорофеев, А.С. Залесов, А.С. Зорич, Н.И. Карпенко, В.М. Карпюк, Ю.А. Климов, А.П. Кудзис, А.А. Кудрявцев, Л.Л. Кукша, Ф. Леонгардт, Г.М. Мамедов, Э. Мерш, В.П. Митрофанов, В.И. Мурашев, К.Ю. Николаев, П. Риган, С.А. Тихомиров, М.С. Торяник, М.Н. Убайдулаев, А.А. Цейтлин, Б.А. Шостак и др.

Цель данной работы — выявить влияние знакопеременного циклического и малоциклового знакопостоянного нагружений на прочность наклонных сечений железобетонных балочных элементов, а также пополнить банк экспериментальных данных для совершенствования инженерной методики их расчета на деформационной основе.

Методика исследований. Согласно принятой методологии натурный эксперимент выполняется четырехфакторным трехуровневым планом Бокса В4. Варьирование факторов осуществляли по данным обзора источников, который показал, что наиболее влиятельным фактором X_1 является величина относительного пролета среза a/h_0 , которая менялась на трех уровнях: $a = h_0, 2h_0$ и $3h_0$. Вторым по величине воздействия, как правило, является такой конструктивный фактор, как класс тяжелого бетона: $X_2 \rightarrow C16/20, C30/35, C40/50$, а третьим — величина (количество) поперечного армирования на приопорных участках: $X_3 \rightarrow \rho_{sw} = 0,0016; 0,0029; 0,0044$. В качестве четвертого — принят фактор внешнего воздействия X_4 — уровень знакопеременного: $\eta = \pm 0,50; \pm 0,65; \pm 0,80$, и знакопостоянного нагружений: $\eta = 0 \dots 0,50; 0 \dots 0,65; 0 \dots 0,85$ от фактической несущей способности, т.е. величины поперечной нагрузки, при которых ширина раскрытия наклонных трещин w_k превышала 0,4 мм, а стрела прогибов $f \geq l/150$.

Опытные образцы — это железобетонные балки прямоугольного сечения размерами 100 × 200 мм длиной 1975 мм, армированные двумя плоскими сварными каркасами с продольной нижней и верхней арматурой 4Ø14 A500C. Поперечная арматура на приопорных участках состоит из 2Ø3, 4, 5 ВрI, а на других участках — 2 Ø6A240C. Конструкция и армирования образцов-балок приведены на рис. 1.

Образцы-балки хранили в нормальных тепло-влажностных условиях при температуре 20 ± 2 °С и почти 100%-й влажности воздуха в течение 100...110 дней. Перед испытанием на боковые поверхности балок наносили тонкий слой известкового раствора с целью облегчения фиксации образования и развития нормальных и наклонных трещин, а затем высушивали их при естественной влажности.

Деформации бетона, арматуры и прогибы опытных образцов измеряли с помощью индикаторов часового типа с ценой деления, соответственно, 0,001 и 0,01 мм. Схема расстановки измерительных приборов показана на рис. 2.

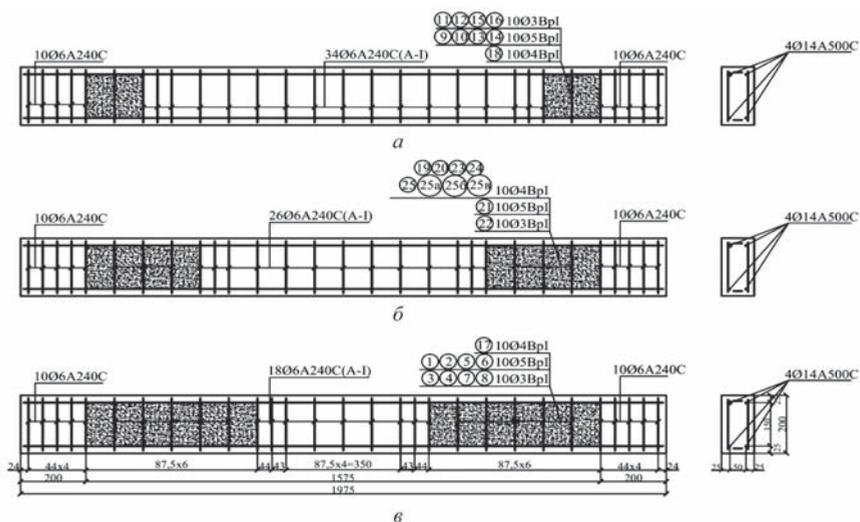


Рис. 1. Конструкция и армирование опытных образцов-балок с малым (а), средним (б) и большим (в) пролетами среза

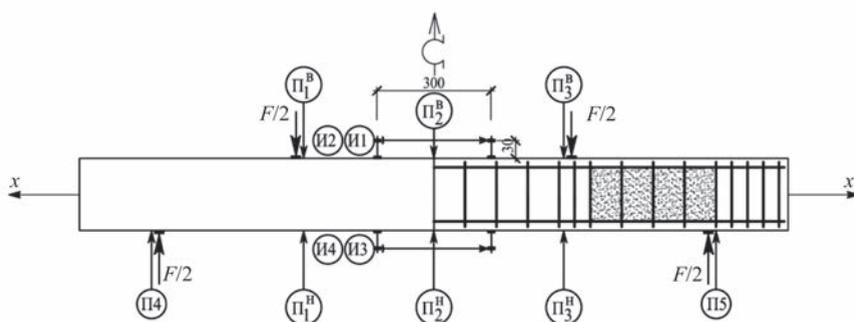


Рис. 2. Схема расстановки приборов в опытных балках

Испытания опытных образцов осуществляли по схеме однопролетной свободно опирающейся балки, поочередно нагружаемой то сверху, то снизу двумя сосредоточенными силами, расположенными в третях пролета без изменения ее (балки) положения.

Перед основным экспериментом сначала поочередно испытали 25 исследуемых балок (образцов-близнецов) первой серии на действие однократной кратковременной ступенчатой нагрузки практически до разрушения (когда ширина раскрытия наклонных трещин и стрела прогибов превышали допустимые значения, ширина раскрытия наклонных трещин $w_k \geq 0,4$ мм, а стрела прогибов $f \geq 1/150$). В дальнейшем испытывали аналогичные исследуемые балки второй и третьей серий при воздействии, соответственно, знакопеременного и знакопостоянного не многократно повторного поперечного нагружения указанных уровней.

Комплексным планом экспериментов предусмотрены были также повторные испытания усиленных углепластиком наклонных и нормальных сечений, почти разрушенных опытных образцов-балок второй и третьей серий на воздействие аналогичного нагружения.

Количество циклов знакопеременного и знакопостоянного нагружений продиктовано критерием стабилизации деформаций, прежде всего, в бетоне Е.М. Бабича [1] и его учеников и составляет не менее 10, если опытные образцы-балки не разрушились при меньшем числе циклов.

Некоторые результаты испытаний опытных образцов-балок первой, второй и третьей серий согласно принятой методике [2] приведены в таблице в виде разрушающего поперечного усилия $V_{u,1,2,3} = F_{u,1,2,3}$.

План эксперимента и прочность приопорных участков, кН, опытных образцов-балок первой, второй и третьей серий

Номер опыта	a/h_0 , мм	С, МПа	ρ_{sw} , (Ø ВрI)	η	Первая серия		Вторая серия		Третья серия	
					$V_{u,1}$, эксп.	$\hat{V}_{u,1}$, расч. (1)	$V_{u,2}$, эксп.	$\hat{V}_{u,2}$, расч. (2)	$V_{u,3}$, эксп.	$\hat{V}_{u,3}$, расч. (3)
1	525	C40/50	0,0044 (2 Ø5)	±0,80; 0...0,8	71	72	58	61	63	66
2	525	C40/50	0,0044 (2 Ø5)	±0,50; 0...0,5	68	72	63	65	67	68
3	525	C40/50	0,0016 (2 Ø3)	±0,80; 0...0,8	67	60	50	49	55	52
4	525	C40/50	0,0016 (2 Ø3)	±0,50; 0...0,5	59	60	53	53	57	54
5	525	C16/20	0,0044 (2 Ø5)	±0,80; 0...0,8	66	62	53	49	60	62
6	525	C16/20	0,0044 (2 Ø5)	±0,50; 0...0,5	68	62	50	53	65	64
7	525	C16/20	0,0016 (2 Ø3)	±0,80; 0...0,8	53	50	40	37	45	48
8	525	C16/20	0,0016 (2 Ø3)	±0,50; 0...0,5	47	50	44	41	46	50
9	175	C40/50	0,0044 (2 Ø5)	±0,80; 0...0,8	175	168	138	141	146	150
10	175	C40/50	0,0044 (2 Ø5)	±0,50; 0...0,5	169	168	142	145	165	160
11	175	C40/50	0,0016 (2 Ø3)	±0,80; 0...0,8	164	156	125	129	134	136
12	175	C40/50	0,0016 (2 Ø3)	±0,50; 0...0,5	150	156	134	133	142	146
13	175	C16/20	0,0044 (2 Ø5)	±0,80; 0...0,8	129	130	100	101	109	114
14	175	C16/20	0,0044 (2 Ø5)	±0,50; 0...0,5	122	130	104	105	114	124
15	175	C16/20	0,0016 (2 Ø3)	±0,80; 0...0,8	113	118	90	89	100	100
16	175	C16/20	0,0016 (2 Ø3)	±0,50; 0...0,5	121	118	92	93	108	110

Окончание табл.

Номер опыта	a/h_0 , мм	С, МПа	$\rho_{\text{сп}} (\text{Ø Врл})$	η	Первая серия		Вторая серия		Третья серия	
					$V_{u,1}$, эксп.	$\hat{V}_{u,1}$, расч. (1)	$V_{u,2}$, эксп.	$\hat{V}_{u,2}$, расч. (2)	$V_{u,3}$, эксп.	$\hat{V}_{u,3}$, расч. (3)
17	525	C30/35	0,0029 (2 Ø4)	$\pm 0,65$; 0...0,65	69	73	63	68	65	72
18	175	C30/35	0,0029 (2 Ø4)	$\pm 0,65$; 0...0,65	165	155	150	134	156	144
19	350	C40/50	0,0029 (2 Ø4)	$\pm 0,65$; 0...0,65	104	103	92	81	98	94
20	350	C16/20	0,0029 (2 Ø4)	$\pm 0,65$; 0...0,65	79	79	52	55	73	74
21	350	C30/35	0,0044 (2 Ø5)	$\pm 0,65$; 0...0,65	100	99	82	81	90	91
22	350	C30/35	0,0016 (2 Ø3)	$\pm 0,65$; 0...0,65	79	87	66	69	73	77
23	350	C30/35	0,0029 (2 Ø4)	$\pm 0,80$; 0...0,8	91	98	76	78	88	85
24	350	C30/35	0,0029 (2 Ø4)	$\pm 0,50$; 0...0,5	98	98	82	82	92	91
25	350	C30/35	0,0029 (2 Ø4)	$\pm 0,65$; 0...0,65	100	98	79	80	88	90
Среднеквадратическое отклонение σ , кН					$\sigma_1 = 5,09$		$\sigma_2 = 4,66$		$\sigma_3 = 4,59$	
Коэффициент вариации v , %					$v_1 = 5,2$		$v_2 = 5,8$		$v_3 = 5,1$	

Абсолютное большинство исследуемых балок трех серий разрушились по наклонным сечениям в обоих или одном (чаще) из пролетов среза. Критериями разрушения опытных образцов служили достижения предельных значений деформаций в бетоне или арматуре, чрезмерное раскрытие (до 1 мм) наклонных (чаще) или нормальных (реже) трещин, существенное увеличение (до 15 мм) стрелы прогиба, отсутствие приращения или спад (до 15 %) показаний манометра насосной станции силовой установки.

В результате обработки полученных экспериментальных данных, извлечения незначимых и перерасчета оставшихся коэффициентов, с помощью эффективной компьютерной программы COMPEX, разработанной профессором В.А. Вознесенским, получили адекватные математические модели прочности, т.е. разрушающего поперечного усилия V_u , которые имеют хорошую информативную полезность и показывают хорошую сходимость с опытными данными (коэффициенты вариации v не превышают 6 %):

$$\hat{Y}(V_{u,1}) = 98 - 41X_1 + 12X_2 + 6X_3 + 16X_1^2 - 7X_2^2 - 5X_3^2 - 7X_1X_2, \quad ; \quad (1)$$

$$\hat{Y}\left(\frac{V_{u,1}}{bh_0}\right) = 5,60 - 2,34X_1 + 0,69X_2 + 0,34X_3 + 0,91X_1^2 - 0,40X_2^2 - 0,29X_3^2 - 0,40X_1X_2, \quad ; \quad (1a)$$

$$\hat{Y}(V_{u,2}) = 80 - 33X_1 + 13X_2 + 6X_3 - 2X_4 + 21X_1^2 - 12X_2^2 - 5X_3^2 - 7X_1X_2, \text{ кН}; \quad (2)$$

$$\hat{Y}\left(\frac{V_{u,2}}{bh_0}\right) = 4,57 - 1,89X_1 + 0,74X_2 + 0,34X_3 - 0,11X_4 + 1,20X_1^2 - 0,69X_2^2 - 0,29X_3^2 - 0,40X_1X_2, \text{ МПа}; \quad (2a)$$

$$\hat{Y}(V_{u,3}) = 90 - 36X_1 + 10X_2 + 7X_3 - 3X_4 + 18X_1^2 - 6X_2^2 - 6X_3^2 - 2X_4^2 - 8X_1X_2 + 2X_1X_4, \text{ кН}; \quad (3)$$

$$\hat{Y}\left(\frac{V_{u,3}}{bh_0}\right) = 5,14 - 2,06X_1 + 0,57X_2 + 0,40X_3 - 0,17X_4 + 1,03X_1^2 - 0,34X_2^2 - 0,34X_3^2 + 0,11X_4^2 - 0,46X_1X_2 + 0,11X_1X_4, \quad (3a)$$

При этом выходной параметр, т.е. физическая прочность приопорных участков исследуемых балок, может быть представлен моделями (1), (2), (3) для первой ($V_{u,1}$, без повторной), второй ($V_{u,2}$, при знакопеременной $\eta = \pm 0,50 \dots \pm 0,80$) и третьей ($V_{u,3}$, при знакопостоянной $\eta = 0,00 \dots 0,80$) серий нагрузок в виде двух разрушающих поперечных сил V_u , кН. Для того, чтобы представленные результаты экспериментальных исследований можно было сравнить с данными других авторов [3, 4], модели (1), (2), (3) трансформированы в модели (1а), (2а), (3а) в виде средних, приведенных по аналогии [3] к рабочей площади сечения, напряжений, которые являются адекватными при изменении прочности бетона опытных образцов-балок от С16/20 (В20) до С40/50 (В50), т.е. во всем диапазоне изменения классов тяжелых промышленных бетонов.

Представленные адекватные математические модели (1)–(3,а) имеют существенное преимущество над другими статистическими методами постановки экспериментов и обработки их результатов. Оно заключается, прежде всего, в том, что эти модели позволяют оценить влияние каждого исследуемого фактора на выходной параметр не только в частности, но и во взаимодействии друг с другом. Также они позволяют сравнить величину этого влияния как в отдельно взятой серии, так и по всем описанным сериями вместе, т.е. сделать системный анализ. Геометрическая интерпретация приведенной несущей способности приопорных участков опытных образцов-балок частично может быть приведена на рис. 3.

Среди конструктивных факторов наибольшее влияние на несущую способность приопорных участков исследуемых элементов имеет пролет среза (рис. 3, а). В целом, подтверждается обнаруженная А.С. Залесовым, Ю.А. Климовым [3] и другими исследователями [4, 6] закономерность нелинейного (затухающего) уменьшения прочности наклонных сечений балок с увеличением пролета среза.

С повышением класса бетона от С16/20 до С40/50 происходит нелинейное затухающее (непропорциональное) увеличение прочности указанных участков во всех сериях (рис. 3, б).

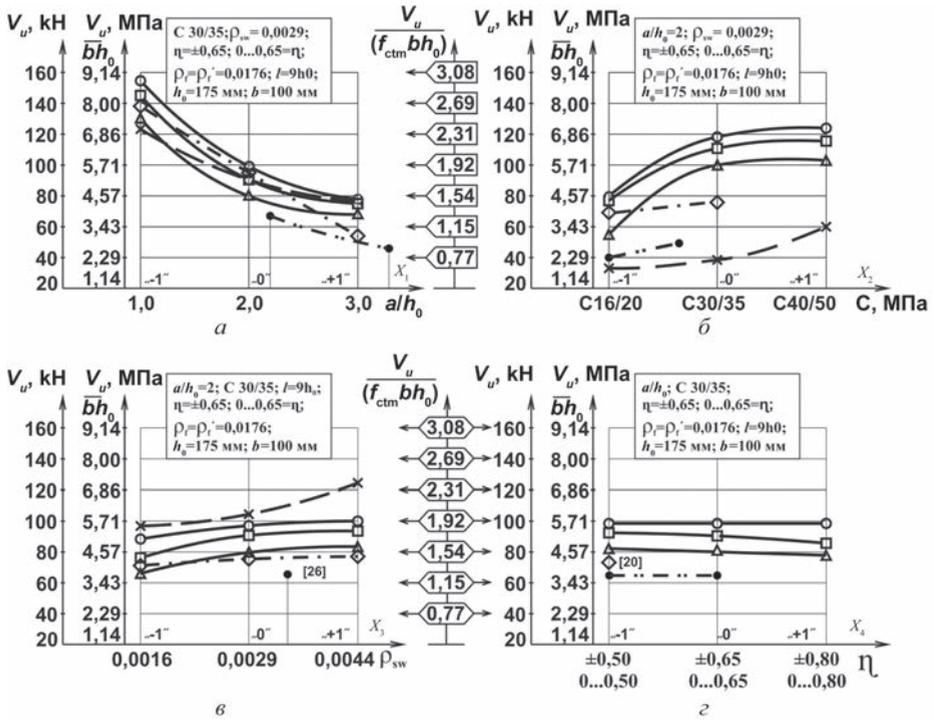


Рис. 3. Влияние конструктивных факторов: *a* — пролета среза; *б* — класса бетона; *в* — количества поперечной арматуры; *г* + (*a*—*в*) — уровней и режимов нагружений на прочность приопорных участков опытных балок: \circ — данные однократного статического нагружения (серия I); \triangle — данные знакопеременного малоциклового нагружения (II); \square — данные знакопостоянного многократно повторного нагружения (III); \times — данные А.С. Залесова и Ю.А. Климова [3]; \diamond — данные Н.М. Ярошевич [5]; \bullet — данные А.И. Корнейчука [4].

Аналогичная картина наблюдается с повышением коэффициента поперечного армирования ρ_{sw} от 0,0016 до 0,0044 (см. рис. 3, в).

Факторы внешнего воздействия, прежде всего, характер циклической нагрузки, оказывают существенное влияние на рассматриваемый выходной параметр. Так, если при знакопостоянной малоцикловой нагрузке среднее значение прочности приопорных участков опытных образцов уменьшается на 8,2 % по сравнению с несущей способностью балок первой серии, испытанных без повторного нагружения, то при знакопеременной циклической нагрузке — на 18,4 %. Такая тенденция сохраняется во всех диапазонах изменения исследуемых факторов (см. рис. 3). При этом величина уровней знакопеременного и знакопостоянного нагружений ($\eta = \pm 0,50 \dots \pm 0,80$; $0 \dots 0,80$) мало влияет на конечный результат (см. рис. 3, г).

Таким образом, значение разрушающих поперечных сил увеличивается по отношению к средним значениям, соответственно, 98 кН при однократной статической, 80 кН при знакопеременной циклической V_u и 90 кН при знакопостоянной малоцикловой нагрузках:

при уменьшении относительного пролета среза a/h_0 с 3 до 1, соответственно на 84, 83 и 80 %;

увеличении класса бетона от C16/20 до C40/50, соответственно на 24, 33 и 22 %;

увеличении количества поперечной арматуры ρ_{sw} от 0,0016 до 0,0044, соответственно на 12, 15 и 16 %;

уменьшении уровня циклической нагрузки η от $\pm 0,8$ до $\pm 0,5$, соответственно на 5 и 7 %;

одновременном уменьшении пролета среза и увеличении класса бетона, соответственно, на 14, 17 и 18 %;

одновременном уменьшении пролета среза и уровня знакопостоянной нагрузки на 5 %.

Положительный знак при квадратичном эффекте X_1^2 свидетельствует о том, что при дальнейшем увеличении пролета среза, существенного уменьшения несущей способности приопорных участков исследуемых балок не произойдет. А положительный знак при квадратичных эффектах X_2^2 и X_3^2 — о том, что дальнейшее увеличение класса бетона за пределами C40/50 и количества поперечной арматуры $\rho_{sw} \geq 0,0044$ также не приведет к существенному увеличению разрушающего поперечного усилия.

Как видно из рис. 3, полученные результаты экспериментов согласуются с опытными данными других авторов: А.С. Залесова, Ю.А. Климова [3] и Н.М. Ярошевич [5] при однократной статической нагрузке, а также А.И. Корнейчука [4] при знакопеременной циклической нагрузке в несколько отличных условиях. Для этого нужно было воспользоваться приведенной к размерам поперечного сечения и прочности бетона на растяжение величине разрушающей поперечной силы.

Приложение малоциклового знакопеременного нагружения, особенно высоких уровней, не только уменьшало несущую способность опытных образцов до 20 %, но и меняло характер их разрушения. Если при однократной нагрузке процесс образования и развития трещин связан только с изменением напряженно-деформированного состояния балок, то при воздействии циклической знакопеременной нагрузки — главным образом с уменьшением их жесткости, что подтверждается исследованиями [4, 7—11].

Очевидно, что основной причиной снижения несущей способности опытных образцов при циклическом знакопостоянном и знакопеременном нагружении является нарушение структуры бетона на приопорных участках, его разуплотнение и частичная потеря сцепления с арматурой.

Наибольший прирост остаточных деформаций в бетоне и поперечной арматуре наблюдался на первых двух-трех циклах и, как правило, они стабилизировались до пятого-шестого циклов при уровнях нагрузки $\eta = \pm 0,5 \dots 0,65$. А в некоторых образцах с минимальным классом бетона и количеством поперечной арматуры при уровнях нагрузки $\eta = \pm 0,8$ указанные деформации не стабилизировались, и образцы разрушались на 6...9 циклах из-за достижения усталостной прочности или возможного снижения их прочностных параметров вследствие статистической погрешности при определении разрушающей нагрузки высоких уровней.

Во время испытаний опытных образцов-балок на действие кратковременного однократного и циклического нагружений следили за образованием, развитием и шириной раскрытия трещин на их поверхности. Ширину раскрытия

нормальных трещин определили на уровне растянутой рабочей арматуры, а наклонных — посередине высоты балки в местах, где визуально она казалась самой большой.

Первыми образовывались нормальные трещины в зоне чистого изгиба и под сосредоточенными силами на уровнях нагрузки $\eta = 0,15...0,25$ от разрушающего усилия. С ростом нагрузки эти трещины развивались в сторону сжатой зоны, увеличивалась ширина их раскрытия, и образовывались новые в зоне совместного действия изгибающего момента и поперечной силы с постепенным их наклоном к месту приложения сосредоточенной нагрузки.

Первые наклонные трещины появлялись при нагрузках $\eta = 0,4...0,6$ от разрушающей силы посередине высоты в балках с малыми или средними пролетами среза или развивались из нормальных трещин в образцах с большим пролетом среза и максимальным количеством поперечной арматуры.

Процесс развития нормальных и наклонных трещин происходил прогнозируемо: с ростом внутренних усилий создавались новые трещины, увеличивалась длина и ширина раскрытия существующих трещин, дальнейшее развитие указанных трещин определялось интенсивностью поперечного армирования в пролетах среза. При достаточном его количестве разрушение опытного образца происходило по нормальным сечениям в результате, как правило, текучести рабочей арматуры. При недостаточном — ранее образованные наклонные трещины сливались в одну магистральную, по которой собственно и происходило разрушение с текучестью стержней поперечной арматуры с последующим срезом или раздроблением сжатой зоны бетона.

После изменения знака нагрузки независимо от его предыдущего уровня нормальные и наклонные трещины образовывались уже, как правило, при меньших на 10...20 нагрузках. При этом после снятия нагрузки уровнями $\eta = 0,5...0,65$ нормальные трещины закрывались полностью, а наклонные — почти полностью. При высоких уровнях нагрузки ($\eta = 0,8F_u$) происходило более стремительное развитие существующих и появление новых наклонных и нормальных трещин, увеличивалась ширина раскрытия, и уменьшалось расстояние между ними. Как правило, несмотря на симметричное продольное армирование образцов во втором полуцикле (парном «II» или «б») нормальные трещины оказывались более длинными и широкими на 10...40 % по сравнению с аналогичными трещинами в первом полуцикле («I» или «а»). Аналогичная картина наблюдалась на приопорных участках с перекрестными наклонными трещинами. Это явление можно объяснить накоплением зон в бетоне с локальными концентрациями напряжений на границах контакта менее деформативных зерен гранитного щебня с прослойками более деформативного цементно-песчаного камня, образованием неплоских микро- и макротрещин в этих местах и другими деструктивными процессами. Очевидно также, что появлению трещин на предварительно сжатой грани или зоне балки при изменении знака нагрузки способствовали ранее образованные трещины на противоположной грани (зоне). Как правило, места образования этих трещин были почти симметричны.

С дальнейшим увеличением количества циклов нагрузки указанная разница в длине и ширине раскрытия трещин нивелируется, за исключением случаев разрушения исследуемых элементов на высоких ($\eta = \pm 0,8F_u$) уровнях. Уже при первых циклах знакопеременной нагрузки происходило слияние большинства

нормальных сквозных трещин и появление аналогичных перекрестных наклонных трещин с образованием отдельных блоков, соединенных между собой продольной и поперечной арматурой. Взаимное перемещение образованных при циклической знакопеременной нагрузке блоков одного относительно другого приводит к нарушению сцепления арматуры с бетоном и уменьшению сил сцепления по берегам наклонных трещин. В результате чего основные внутренние усилия на приопорных участках воспринимаются в основном, продольной и поперечной арматурой, а в зоне чистого изгиба и на участках под сосредоточенными силами — растянутой (рабочей) арматурой, поврежденной нормальными трещинами сжатой зоны бетона и сжатой арматурой, которая выполняет роль монтажной на данном полуцикле.

Анализ величин стрелы прогиба опытных образцов первой серии (так называемых эталонных балок) при ступенчатом однократном нагружении показал достаточно малые пропорциональные их приросты до появления первых нормальных и наклонных трещин, которые резко уменьшают их жесткость. И, как следствие, возрастание указанных приростов прогибов имеет хоть и почти слишком прямое очертание при высоких уровнях ($\eta = \pm 0,8F_u$), однако по более пологим прямым. С появлением значительных пластических деформаций в арматуре и бетоне графики прогибов искривляются, образуя экстремум функции нагрузки [7, 12] при разрушении балок по нормальным сечениям.

При знакопеременных нагрузках прогибы опытных образцов-балок в первых полуциклах «а» были больше чем прогибы в первых полуциклах «б» на 5...40 % вследствие образования в них остаточных прогибов в первых полуциклах. Но этот процесс является затухающим и к 3...5 циклу они стабилизировались при низких и средних ($\eta = \pm 0,5...0,65F_u$) уровнях нагрузки, а при высоких ($\eta = \pm 0,8 F_u$) — к 7...10, если их разрушение не происходило раньше. При этом прогибы балок, которые испытывали циклическим нагружением низких уровней, не превышали прогибов эталонных образцов более чем на 10...15 %, средних уровней — на 15...25 %, высоких — на 15...35 % вследствие снижения их жесткости, что подтверждается исследованиями [4, 7, 12—21].

Проведенные исследования позволили раскрыть особенности характера деформирования, трещинообразования и разрушения опытных образцов-балок, испытывающих сложное напряженно-деформированное состояние, выявить механизм и новые схемы разрушения этих элементов, а также установить их зависимость от соответствующего соотношения исследуемых факторов.

Библиографический список

1. *Бабич Е.М.* Влияние длительных и малоцикловых нагрузок на механические свойства бетонов и работу железобетонных элементов. Ровно, 1995. 386 с.
2. *Албу Е.И., Кицак А.К., Семина Ю.А., Гайдаржи А.П., Гребенюк А.В., Сащин В.О., Карпюк В.М.* Методика экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния приопорных участков железобетонных балок при малоцикловом нагружении // *Строительство – как фактор формирования комфортной среды жизнедеятельности: сб. материалов V Республ. науч.-техн. конф. (28 ноября 2013 г.)*. Бендеры, 2014. С. 3—10.
3. *Залесов А.С., Климов Ю.А.* Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил. Киев : Будівельник, 1989. 104 с.

4. *Корнейчук А.И., Масюк Г.Х.* Экспериментальные исследования несущей способности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов при действии малоцикловых знакопеременных нагрузок // Ресурсоэкономные материалы, конструкции здания и сооружения : сб. науч. тр. Ровно, 2008. Вып. 16. Ч. 2. С. 217—222.
5. *Дорофеев В.С., Карпюк В.М., Ярошевич Н.М.* Прочность и трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов // Вестник ОГАСА. 2008. Вып. 28. С. 149—158.
6. *Карпюк В.М.* Расчетные модели силового сопротивления прогонных железобетонных конструкций в общем случае напряженного состояния. Одесса : ОГАСА, 2014. 352 с.
7. *Гомон П.С.* Работа железобетонных балок таврового сечения при действии повторного нагружения // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. конф. молодых ученых. Могилев, 2009. С. 90.
8. *Заречанский О.О.* Исследование сжато-изогнутых элементов при повторном действии поперечной силы высоких уровней // Ресурсоэкономные материалы, конструкции, здания и сооружения : сб. науч. тр. Ровно, 2005. Вып. 13. С. 129—135.
9. *Зинчук Н.С.* Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов при однократном и малоцикловом нагружении в условиях повышенных температур // Ресурсоэкономные материалы, конструкции, здания и сооружения : сб. науч. тр. Ровно, 2004. Вып. 11. С. 164—166.
10. *Караван В.В., Масюк Г.Х.* Результаты экспериментальных исследований трещиностойкости и деформативности изгибаемых железобетонных элементов при воздействии малоцикловых знакопеременных нагрузок // Сталежелезобетонные конструкции. Исследование, проектирование, строительство, эксплуатация : сб. науч. ст. Кривой Рог, 2002. Вып. 5. С. 168—172.
11. *Григорчук А.Б., Масюк Г.Х.* Прочность и деформативность железобетонных элементов, которые подвергаются воздействию знакопеременного нагружения // Сб. материалов конф. Ч. 1. Строительство. Львов, 2001. С. 29—34.
12. *Карпенко Н.И., Карпенко С.Н.* О построении более совершенной модели деформирования железобетона с трещинами при плоском напряженном состоянии // Бетон и железобетон — пути развития : материалы II Всеросс. Междунар. конф. по бетону и железобетону (05.09—09.09.2002). М., 2005. С. 431—444.
13. *Залесов А.С., Мухамедиев Т.А., Чистяков Е.А.* Расчет прочности железобетонных конструкций при различных силовых воздействиях по новым нормативным документам // Бетон и железобетон. 2002. № 3. С. 10—13.
14. *Бабич Е.М., Гомон П.С., Филипчук С.В.* Работа и расчет несущей способности изгибаемых железобетонных элементов таврового профиля при воздействии повторных нагрузок. Ровно : Изд-во НУВГП, 2012. 108 с.
15. *Масюк Г.Х., Корнейчук А.И.* Напряженно-деформированное состояние наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов, которые подвергаются воздействию малоцикловых знакопеременных нагрузок // Ресурсоэкономные материалы, конструкции, здания и сооружения : сб. науч. тр. Ровно : Изд-во НУВГП, 2008. Вып. 17. С. 204—211.
16. *Мельник С.В., Борисюк О.П., Конончук О.П., Петришин В.М.* Исследование работы усиленных железобетонных балок при действии малоцикловых нагружений // Ресурсоэкономные материалы, конструкции, здания и сооружения : Сб. науч. тр. Ровно, 2008. Вып. 17. С. 404—410.
17. *Ковальчик Я.И., Коваль П.М.* Исследование трещиностойкости предварительно напряженных железобетонных балок при воздействии малоцикловых нагружений // Научно-прикладные аспекты автомобильной и транспортно-дорожной отраслей : Науч. заметки. Луцк, 2014. № 45. С. 282—287.

18. Довбенко В.С. Исследование работы железобетонных балок, усиленных полимерной композицией при воздействии малоцикловых нагрузок // Ресурсоэкономные материалы, конструкции, здания и сооружения : сб. науч. тр. Ровно, 2011. Вып. 22. С. 787—794.

19. Бабич В.Е. Особенности работы неразрезных железобетонных балок при повторных нагрузках // Строительные конструкции : сб. науч. тр. Киев, 2003. Вып. 58. С. 8—13.

20. Дробышинец С.Я., Бабич Е.М. Работа сталефибробетонных и сталефиброжелезобетонных балок при однократном и повторном нагружениях // Сталежелезобетонные конструкции. Исследование, проектирование, строительство, эксплуатация : сб. науч. ст. Кривой Рог, 2004. Вып. 6. С. 65—71.

21. Валовой М.А. Прочность, деформативность и трещиностойкость железобетонных балок при воздействии повторных нагрузок // Сталежелезобетонные конструкции. Исследование, проектирование, строительство, эксплуатация : сб. науч. ст. Кривой Рог, 2008. Вып. 8. С. 45—48.

Поступила в редакцию в июле 2015 г.

Об авторе: **Семина Юлия Анатольевна** — аспирант кафедры сопротивления материалов, **Одесская государственная академия строительства и архитектуры (ОГАСА)**, 65045, Украина, г. Одесса, ул. Дидрихсона, д. 4, 8 (048) 716-45-29, hamster3091@mail.ru.

Для цитирования: *Семина Ю.А.* Прочность железобетонных балочных элементов при воздействии циклической знакопеременной и малоцикловой знакопостоянной нагрузок // Вестник МГСУ. 2015 № 9. С. 36—50.

Yu.A. Semina

THE STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAM ELEMENTS UNDER CYCLIC ALTERNATING LOADING AND LOW CYCLE LOAD OF CONSTANT SIGN

The behavior of reinforced concrete elements under some types of cyclic loads is described in the paper. The main aim of the investigations is research of the stress-strain state and strength of the inclined sections of reinforced concrete beam elements in conditions of systemic impact of constructive factors and the factor of external influence. To spotlight the problem of cyclic loadings three series of tests were conducted by the author.

Firstly, the analysis of the tests showed that especially cyclic alternating loading reduces the bearing capacity of reinforced concrete beams and their crack resistance by 20 % due to the fatigue of concrete and reinforcement. Thus the change of load sign creates serious changes of stress-strain state of reinforced concrete beam elements. Low cycle loads of constant sign effect the behavior of the constructions not so adversely. Secondly, based on the experimental data mathematical models of elements' strength were obtained. These models allow evaluating the impact of each factor on the output parameter not only separately, but also in interaction with each other. Furthermore, the material spotlighted by the author describes stress-strain state of the investigated elements, cracking mechanism, changes of deflection values, the influence of mode cyclic loading during the tests.

Since the data on the subject are useful and important to building practice, the ultimate aim of the tests will be working out for improvement of nonlinear calculation models of span reinforced concrete constructions taking into account the impact of these loads, and also there will be the development of engineering calculation techniques of their strength, crack resistance and deformability.

Key words: beam, experiment, strength, concrete, reinforcement, cyclic alternating loading, low cycle load of constant sign.

References

1. Babich E.M. Vliyanie dlitel'nykh i malotsiklovykh nagruzok na mekhanicheskie svoystva betonov i rabotu zhelezobetonnykh elementov [Influence of Long-Term and Low-Cycle Loads on the Mechanical Properties of Concrete and on the Work of Reinforced Concrete Elements]. Rovno, 1995, 386 p. (In Ukrainian)
2. Albu E.I., Kitsak A.K., Semina Yu.A., Gaydarzhi A.P., Grebenyuk A.V., Sashin V.O., Karpuyuk V.M. Metodika eksperimental'nykh issledovaniy napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya priopornykh uchastkov zhelezobetonnykh balok pri malotsiklovom nagruzhennii [Technique of Experimental Studies of Stress-Strain State of Reinforced Concrete Beams under Low-Cycle Loading in the Supporting Areas]. *Stroitel'stvo — kak faktor formirovaniya komfortnoy sredy zhiznedeyatel'nosti: sbornik materialov V Respublikanskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (28 noyabrya 2013 g.)* [Construction as a Factor of Comfortable Living Environment Formation: Collection of the Materials of the 5th Republican Scientific and Technical Conference]. Bendery, 2014. Pp. 3—10. (In Russian)
3. Zalesov A.S., Klimov Yu.A. *Prochnost' zhelezobetonnykh konstruksiy pri deystvii poperechnykh sil* [The Strength of Reinforced Concrete Structures under the Action of Shear Forces]. Kiev, Budivel'nik Publ., 1989, 104 p. (In Russian)
4. Korneychuk A.I., Masyuk G.Kh. Eksperimental'nye issledovaniya nesushchey sposobnosti naklonnykh secheniy izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov pri deystvii malotsiklovykh znakoperemennykh nagruzok [Experimental Study of the Bearing Capacity of Inclined Cross Sections of Bending Reinforced Concrete Elements under the Action of Low-Cycle Alternating Loads]. *Resursoekonomnye materialy, konstruksii zdaniya i sooruzheniya : sbornik nauchnykh trudov* [Resource Saving Materials, Buildings Constructions and Structures: Collection of Scientific Papers]. Rovno, 2008, no. 16, part 2, pp. 217—222. (In Ukrainian)
5. Dorofeev V.S., Karpuyuk V.M., Yaroshevich N.M. Prochnost' i treshchinostoykost' izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov [Strength and Crack Resistance of Bending Reinforced Concrete Elements]. *Vestnik OGASA* [Bulletin of the Odessa State Academy of Building and Architecture]. 2008, no. 28, pp. 149—158. (In Russian)
6. Karpuyuk V.M. *Raschetnye modeli silovogo soprotivleniya progonykh zhelezobetonnykh konstruksiy v obshchem sluchae napryazhennogo sostoyaniya* [Calculation Models of Power Resistance of Girder Reinforced Concrete Constructions in General Case of Stress State]. Odessa, OGASA Publ., 2014, 352 p. (In Ukrainian)
7. Gomon P.S. Rabota zhelezobetonnykh balok tavrovogo secheniya pri deystvii povtornogo nagruzheniya [Work of T-section Reinforced Concrete Beams under Repeated Loading]. *Novye materialy, oborudovanie i tekhnologii v promyshlennosti : materialy Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh* [New Materials, Equipment and Technologies in the Industry: Proceedings of the International Conference of Young Scientists]. Mogilev, 2009, p. 90. (In Ukrainian)
8. Zarechanskiy O.O. Issledovanie szhato-izognutykh elementov pri povtornom deystvii poperechnoy sily vysokikh urovney [Research of Compressed-Bent Elements by Repeated Transverse Force of High Levels]. *Resursoekonomnye materialy, konstruksii zdaniya i sooruzheniya : sbornik nauchnykh trudov* [Resource Saving Materials, Buildings Constructions and Structures: Collection of Scientific Papers]. Rovno, 2005, no. 13, pp. 129—135. (In Ukrainian)
9. Zinchuk N.S. Eksperimental'nye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov pri odnokratnom i malotsiklovom nagruzhennyakh v usloviyakh povyshennykh temperatur [Experimental Study of Stress-Strain State of Reinforced Concrete Bent Elements under the Single and Low-Cycle Loading at Elevated Temperatures]. *Resursoekonomnye materialy, konstruksii zdaniya i sooruzheniya : sbornik nauchnykh trudov* [Resource Saving Materials, Buildings Constructions and Structures: Collection of Scientific Papers]. Rovno, 2004, no. 11, pp. 164—166. (In Ukrainian)
10. Karavan V.V., Masyuk G.Kh. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy treshchinostoykosti i deformativnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov pri vozdeystvii malotsiklovykh znakoperemennykh nagruzok [The Experimental Results of Crack Resistance

and Deformability Bending Reinforced Concrete Elements When Exposed to Low-Cycle Alternating Loads]. *Stalezhelezobetonnye konstruktsii. Issledovanie, proektirovanie, stroitel'stvo, ekspluatatsiya : sbornik nauchnykh statey* [Composite Structures. Research, Design, Construction, Operation: Collection of Scientific Papers]. Krivoy Rog, 2002, no. 5, pp. 168—172. (In Ukrainian)

11. Grigorchuk A.B., Masyuk G.Kh. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh elementov, kotorye podvergayutsya vozdeystviyu znakoperemennogo nagruzheniya [Strength and Deformability of Reinforced Concrete Elements That are Exposed to Action of Alternating Loading]. *Sbornik materialov konferentsii Ch. 1. Stroitel'stvo* [Collection of Conference Materials. Part 1 Building]. L'vov, 2001, pp. 29—34. (In Ukrainian)

12. Karpenko N.I., Karpenko S.N. O postroenii bolee sovershennoy modeli deformirovaniya zhelezobetona s treshchinami pri ploskom napryazhennom sostoyanii [On Construction of a More Perfect Model of Deformation of Cracked Reinforced Concrete under Plane Stress State]. *Beton i zhelezobeton — puti razvitiya : materialy II Vserossiyskoy Mezhdunarodnoy konferentsii po betonu i zhelezobetonu (05.09—09.09.2002)* [Concrete and Reinforced Concrete — Ways of Development: Materials of the 2nd All-Russian International Conference on Concrete and Reinforced Concrete]. Moscow, 2005, pp. 431—444. (In Russian)

13. Zalesov A.S., Mukhamediev T.A., Chistyakov E.A. Raschet prochnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy pri razlichnykh silovykh vozdeystviyakh po novym normativnym dokumentam [Calculation of the Strength of Concrete Structures under Different Force Actions on New Regulations]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2002, no. 3, pp. 10—13. (In Russian)

14. Babich E.M., Gomon P.S., Filipchuk S.V. *Rabota i raschet nesushchey sposobnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov tavrovogo profilya pri vozdeystvii povtornykh nagruzok* [Work and Calculation of the Bearing Capacity of Bending T-Sections Reinforced Concrete Elements under the Influence of Repeated Loads]. Rovno, NUVGP Publ., 2012, 108 p. (In Ukrainian)

15. Masyuk G.Kh., Korneychuk A.I. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie naklonnykh secheniy izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, kotorye podvergayutsya vozdeystviyu malotsiklovykh znakoperemennykh nagruzok [Stress-strain State of Incline Sections of Bending Concrete Elements That are Exposed to the Action of Low-Cycle Alternating Loads]. *Resursoekonomnye materialy, konstruktsii zdaniya i sooruzheniya : sbornik nauchnykh trudov* [Resource Saving Materials, Buildings Constructions and Structures: Collection of Scientific Papers]. Rovno, NUVGP Publ., 2008, no. 17, pp. 204—211. (In Ukrainian)

16. Mel'nik S.V., Borisyuk O.P., Kononchuk O.P., Petrishin V.M. Issledovanie raboty usilennykh zhelezobetonnykh balok pri deystvii malotsiklovykh nagruzheniy [Research of Reinforced Concrete Beams Work under the Action of Low-Cycle Loading]. *Resursoekonomnye materialy, konstruktsii zdaniya i sooruzheniya : sbornik nauchnykh trudov* [Resource Saving Materials, Buildings Constructions and Structures: Collection of Scientific Papers]. Rovno, 2008, no. 17, pp. 404—410. (In Ukrainian)

17. Koval'chik Ya.I., Koval' P.M. Issledovanie treshchinostoykosti predvaritel'no napryazhennykh zhelezobetonnykh balok pri vozdeystvii malotsiklovykh nagruzheniy [Investigation of Crack Resistance of Prestressed Concrete Beams under the Influence of Low-Cycle Loading]. *Nauchno-prikladnye aspekty avtomobil'noy i transportno-dorozhnoy otrasley : Nauchnye zametki* [Scientific and Practical Aspects of the Automobile and Transport Industries: Scientific Notes]. Lutsk, 2014, no. 45, pp. 282—287. (In Ukrainian)

18. Dovbenko V.S. Issledovanie raboty zhelezobetonnykh balok, usilennykh polimer-noy kompozitsiyey pri vozdeystvii malotsiklovykh nagruzok [Research of Reinforced Concrete Beams Work Reinforced with Polymer Composition When Exposed to Low-Cycle Loads]. *Resursoekonomnye materialy, konstruktsii zdaniya i sooruzheniya : sbornik nauchnykh trudov* [Resource Saving Materials, Buildings Constructions and Structures: Collection of Scientific Papers]. Rovno, 2011, no. 22, pp. 787—794. (In Ukrainian)

19. Babich V.E. Osobennosti raboty nerazreznykh zhelezobetonnykh balok pri povtornykh nagruzkach [Features of Continuous Reinforced Concrete Beams Work under the Repeated Loads]. *Stroitel'nye konstruktsii : sbornik nauchnykh trudov* [Building Structures: Collection of Scientific Works]. Kiev, 2003, no. 58, pp. 8—13. (In Ukrainian)

20. Drobyshinets S.Ya., Babich E.M. Rabota stalefibrobetonnykh i stalefibrozhelezobetonnykh balok pri odnokratnom i povtornom nagruzhennyakh [Work of Fiber Concrete and Fiber Reinforced Concrete Beams under the Action of Single and Repeated Loadings]. *Stalezhelezobetonnye konstruksii. Issledovanie, proektirovanie, stroitel'stvo, ekspluatatsiya : sbornik nauchnykh statey* [Composite Structures. Research, Design, Construction, Operation: Collection of Scientific Papers]. Krivoy Rog, 2004, no. 6, pp. 65—71. (In Ukrainian)

21. Valovoy M.A. Prochnost', deformativnost' i treshchinostoykost' zhelezobetonnykh balok pri vozdeystvii povtornykh nagruzok [The Strength, Crack Resistance and Deformability of Concrete Beams under the Influence of Repeated Loads]. *Stalezhelezobetonnye konstruksii. Issledovanie, proektirovanie, stroitel'stvo, ekspluatatsiya : sbornik nauchnykh statey* [Composite Structures. Research, Design, Construction, Operation: Collection of Scientific Papers]. Krivoy Rog, 2008, no. 8, pp. 45—48. (In Ukrainian)

About the author: **Semina Yuliya Anatol'evna** — postgraduate student, Department of Strength of Materials, **Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (OGASA)**, 4 Didrikhsona Str., Odessa, 65045, Ukraine; +7 (048) 716-45-29, hamster3091@mail.ru.

For citation: Semina Yu.A. Prochnost' zhelezobetonnykh balochnykh elementov pri vozdeystvii tsiklicheskoy znakeremennoy i malotsiklovy znakovostoyannoy nagruzok [The Strength of Reinforced Concrete Beam Elements under Cyclic Alternating Loading and Low Cycle Load of Constant Sign]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 9, pp. 36—50. (In Russian)