

УДК 624.012.46

**Постернак А.А.**

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

**Кравченко С.А.**

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

**Агафонова И.П.**

Бендерский политехнический филиал

Государственного образовательного учреждения

«Приднестровский государственный университет имени Т.Г. Шевченко»

**Иванова С.С.**

Бендерский политехнический филиал

Государственного образовательного учреждения

«Приднестровский государственный университет имени Т.Г. Шевченко»

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КЕРАМЗИТОБЕТОНА НА МНОГОКОМПОНЕНТНОМ ВЯЖУЩЕМ ПРИ ДЕЙСТВИИ КРАТКОВРЕМЕННОЙ НАГРУЗКИ

*Исследование технической возможности и экономической целесообразности использования керамзита, кварцевого песка и многокомпонентного вяжущего для бетона и железобетона является важной народно-хозяйственной задачей. На основании проведенного эксперимента изгибаемых элементов, изготовленных из керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем, получены данные по несущей способности, трещиностойкости и деформативности.*

**Ключевые слова:** несущая способность, деформативность, трещиностойкость, легкий бетон.

**Постановка проблемы.** Известно, что одной из актуальнейших задач в деятельности строительного комплекса страны является производство изделий и конструкций для жилых, гражданских и промышленных зданий. Разработка конструкций сниженной материалоемкости и требуемой долговечности с одновременной разработкой ресурсосберегающих технологий их изготовления – это одно из основных направлений успешного решения указанной задачи.

В Одесской государственной академии строительства и архитектуры разработана технология малоцементных бетонов. В ее основе лежит применение четырёхкомпонентного вяжущего, в состав которого, кроме портландцемента и молотой негашёной извести, входят также активная минеральная добавка (зола-унос) и гипс для изготовления и исследования изгибаемых элементов, стеновых блоков [1].

**Анализ последних исследований и публикаций.** За последнее время накопилось много исследований прочности и деформаций легких бетонов и конструкций на их основе, которые приведены в работах М.А. Ахматова, Э.М. Бабича, В.Н. Вырового, Б.С. Комисаренко, Р.Л. Маиляна,

Л.П. Орентлихера, Н.Я. Спивака, В.Г. Суханова, А.Б. Пирадова и других.

На современном уровне значительный вклад в развитие бетонов с использованием шлака и золы внесли Ш.Т. Бабаев, Е.В. Гончигова, С.А. Высоцкий, Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин, А.Г. Зоткин, М.Ю. Лещинский, Н.Р. Рузиев, А.В. Каляскин и другие, но в основном вопросы ресурсосбережения за счёт применения промышленных отходов при изготовлении пористых заполнителей и вяжущих рассматриваются для тяжелых бетонов.

**Постановка задачи.** Цель исследования включала разработку и получение конструкций из керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем меньшей массы, по сравнению с тяжелыми бетонами, которые должны отвечать требованиям по несущей способности, трещиностойкости и деформативности. При этом задачей исследования было разработать оптимальные составы бетона с последующим проведением испытаний конструкций, пригодных к эксплуатации в современном строительстве.

**Изложение основного материала исследования.** В работах упомянутых ученых [2; 3; 4]

Состав бетона для экспериментальной партии изгибаемых элементов

Проектная прочность, МПа	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона							
	Цемент, кг/м <sup>3</sup>	Известь, кг/м <sup>3</sup>	Зола, кг/м <sup>3</sup>	Керамзит, кг/м <sup>3</sup>	Песок, кг/м <sup>3</sup>	Гипс, кг/м <sup>3</sup>	С-3, %	Вода, л
7,5	100	100	100	460	200	25	0,3	170

исследованы основные свойства керамзитобетона на карбонатном и кварцевом песках с применением многокомпонентных вяжущих, определены оптимальные составы для изготовления сборных монолитных железобетонных элементов и конструкций.

Состав бетона для экспериментальной партии изгибаемых элементов приведен в Таблице 1.

При подборе составов использовали расчетно-экспериментальный метод в соответствии с Рекомендациями по учету комплекса технологических и эксплуатационных параметров, оптимизирующих свойства конструкционного керамзитобетона на карбонатном песке [2], включающий такие операции:

- выбор заполнителя;
- назначение предварительного расхода вяжущего;
- установление зернового состава и расхода заполнителя;
- определение расхода воды, обеспечивающего удобоукладываемость бетонной смеси;
- установление зависимостей между расходом вяжущего и прочностью бетона;
- корректировка и назначение производственного состава.

Разработанная последовательность приготовления керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем как для обычного керамзитобетона включала такие операции:

- отдозированные на замес компоненты (цемент, зола-унос, известь, гипс) смешивали в бетономешалке. Смесь готовилась в течении 3 мин;
- заполнители перед приготовлением смеси высушили до постоянного веса. Добавку готовили в виде водного раствора принятой концентрации;
- в бетономешалку загружали всё количество вяжущего и песка. Производили перемешивание в течении 2 мин до получения однородной смеси (время перемешивания зависело от ее объёма);
- загружали керамзитовый гравий и 80% воды с добавкой. Производили также перемешивание в течении 2–4 мин до получения однородной смеси;
- в полученную смесь вводили оставшееся количество воды и проводили перемешивание до

получения однородной смеси, затем измеряли ее подвижность.

Окончательно приготовленную смесь укладывали в металлические разъемные формы и подвергали кратковременному вибрационному воздействию на вибростол. Затем образцы выдерживали 2–4 ч, после чего они проходили тепловлажностную обработку при температуре 80–90°C с длительностью изотермического прогрева 14 ч: 2+10+2 ч. После окончания пропаривания образцы остывали в течение 2 ч. Затем проводили распалубку, взвешивали и маркировали.

Испытание образцов кубов и призм, элементов и конструкций проводили в соответствии с действующими нормами ДСТУ и ДБН [5].

Испытание балок осуществляли с целью выявления их фактической несущей способности, трещиностойкости и деформативности. Результаты исследования балок приведены в Таблице 2. Все балки изготавливались из класса бетона по прочности на сжатие С8/10 (Таблица 1) с различным процентом армирования и разрушились по нормальному сечению в зоне чистого изгиба. Разрушение балок из керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем происходило при достижении в растянутой арматуре напряжений, равных пределу текучести, с последующим раздроблением бетона сжатой зоны. Полученные экспериментальные прогибы балок перед разрушением не превышали величину предельно допустимых прогибов:  $f = l / 200$ . Перед разрушением в сжатой зоне бетона происходило шелушение поверхности, вертикальные трещины в верхней части разветвлялись, переходя в горизонтальные, наблюдалась тенденция к непрерывному росту деформаций.

Расчётные значения разрушающих моментов  $M_u^{расч}$  определялись по формулам ДБН В.2.6 – 98:2009 с введением в расчёт фактической прочности бетона и предела текучести арматуры.

За опытный разрушающий момент  $M_u^{он}$  принимали изгибающий момент от внешней нагрузки, при котором напряжения в растянутой арматуре достигали предела текучести. При этом начиналось разрушение бетона сжатой зоны. Для уточ-

Таблица 2

Результаты испытания балок

Серия	Обозначение	$M_u^{on}$ , Нм	$M_u^{расч}$ , Нм	$\frac{M_u^{on} - M_u^{расч}}{M_u^{расч}} \times 100, \%$	$M_{срс}^{on}$ , Нм	$M_{срс}^{расч}$ , Нм	$\frac{M_{срс}^{on} - M_{срс}^{расч}}{M_{срс}^{расч}} \times 100, \%$
1	БК-1-1	5930	6060	2,1	2430	2594	6,3
	БК-1-2	6350		4,8	2710		4,4
	БК-1-3	5980		1,3	2460		5,1
2	БК-2-1	8170	7790	4,9	3100	2945	5,3
	БК-2-2	8300		6,5	3090		4,7
	БК-2-3	8230		5,7	3120		5,8

Таблица 3

Деформации бетона сжатой грани балок

Серия	Марка балки	$\epsilon_{bm}^{on} \times 105$	$\epsilon_{bm}^{теор} \times 105$	$\epsilon_{bm}^{on} / \epsilon_{bm}^{теор}$
1	БК-1-1	115	118	0,97
	БК-1-2	124		1,05
	БК-1-3	121		1,02
2	БК-2-1	161	156	1,03
	БК-2-2	167		1,07
	БК-2-3	164		1,05

нения опытного значения разрушающего момента использовали результаты измерения деформаций растянутой арматуры и бетона сжатой зоны, а также прогибов балок. Опыты показали, что при достижении момента разрушения во всех образцах проявлялись большие пластические деформации.

Сопоставление опытных разрушающих моментов  $M_u^{on}$  с расчётными  $M_u^{расч}$  приведено в Таблице 2. Как видно из таблицы, для всех серий наблюдается достаточно хорошая сходимость опытных и расчётных разрушающих моментов. Опытные разрушающие моменты в балках серии 1 выше расчётных в среднем на 1%, а в балках серии 2 – на 4,1%. Максимальное отклонение  $M_u^{on}$  и  $M_u^{расч}$  в балках 1 серии наблюдались в балке БК-2 и составило 1,3%, в балках 2 серии максимальное отклонение не наблюдалось.

Деформации бетона сжатой зоны  $\epsilon_{bm}^{on}$  определяли по показаниям тензометров с ценой деления 0,01, установленных на верхней грани бетона в зоне чистого изгиба. Замер деформаций производили на всех этапах нагружения балок. Для сравнения опытных значений  $\epsilon_{bm}^{on}$  с их теоретическими значениями  $\epsilon_{bm}^{теор}$  последние вычисляли по действующим нормам ДБН в стадии работы с трещинами.

Опытные деформации сжатой грани бетона и их сравнение с деформациями, вычисленными по ДБН В.2.6-98:2009, приведены в Таблице 3 и на Рис. 1.

Из полученных зависимостей (Рис. 1) видно, что экспериментальное значение укорочения крайнего волокна бетона для балок с процентом армирования  $\mu = 0,013$  заметно меньше их величин, вычисленных по ДБН.

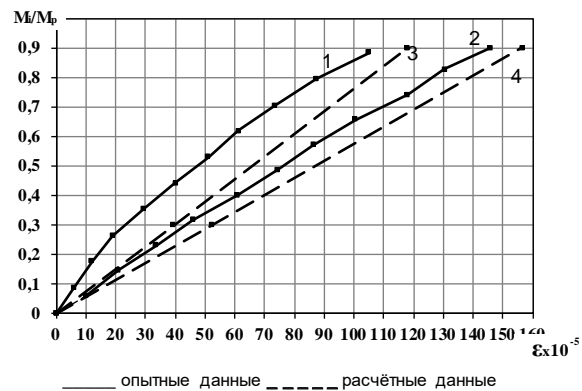


Рис. 1. Зависимость средних деформаций сжатой грани бетона  $\epsilon_{bm}^{on}$  от изгибающего момента при различном армировании

Расхождение между величинами имеет место на всём протяжении нагружения конструкции и в некоторых случаях  $\epsilon_{bm}^{теор}$  превышает  $\epsilon_{bm}^{on}$  в 1,02–1,05 раза. Такое положение вещей может иметь место в том случае, если принятая в нормах величина параметра  $\psi_b$  для балок с меньшим процентом армирования превышает его опытное значение. Однако существует общая закономерность, заключающаяся в том, что с повышением армирования разрывы между опытными и тео-

ретическими значениями деформаций бетона сокращаются, что может быть вызвано влиянием повышения армирования на уменьшение неоднородности деформаций бетона сжатой зоны.

Физически указанное приводит к выравниванию средних и пиковых деформаций сжатого бетона и, как следствие этого, к увеличению коэффициента неравномерности сжатия крайнего волокна  $\psi_b$ . Зависимость деформаций арматуры  $\varepsilon_{sm}^{on}$  от величины изгибающего момента приведена на Рис. 2. Здесь значения  $\varepsilon_{sm}^{on}$  получены по результатам поэтапного замера удлинений арматуры. Теоретическую величину деформаций  $\varepsilon_{sm}^{теор}$  вычисляли по формулам ДБН с использованием принятых в нормах параметров деформативности.

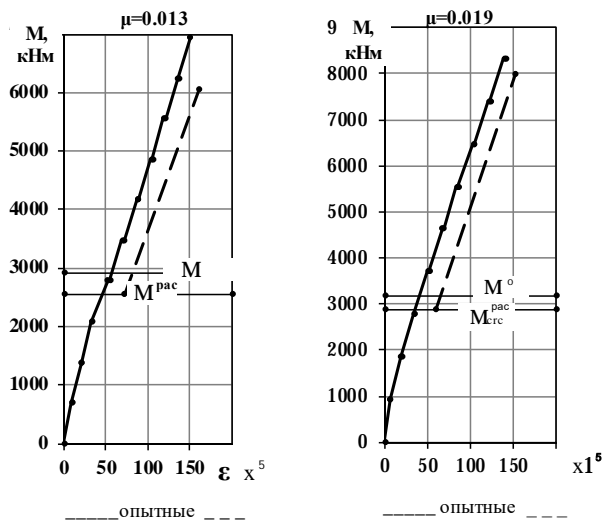


Рис. 2. Зависимость деформаций растянутой арматуры от изгибающего момента

Из приведенного выше графика  $\varepsilon_s - M_i$  видно, что опытные значения деформаций арматуры практически на всех этапах загрузки меньше их расчётных значений в среднем на 73% для балок с процентом армирования  $\mu = 0,013$  и на 65% для балок с  $\mu = 0,019$ .

При нагрузке, близкой к моменту образования трещин в растянутой зоне бетона, происходило заметное развитие деформаций. Отмечено, что перед образованием трещин с увеличением нагрузки деформации в растянутой зоне резко возрастали. Первые трещины появились при нагрузках, составляющих для балок 1 серии (0,39–0,44)  $M_u^{on}$ , а для 2 серии – (0,56–0,61)  $M_u^{on}$ .

Предельные деформации бетона в растянутой зоне составили в среднем  $33 \cdot 10^{-5}$ , что в 1,5 раза превышает максимальное относительное удлинение, принятое в ДБН и равное  $2f_{сд,сер} / E_c$ .

Расчётный момент трещинообразования определяли по ДБН [5]. Анализ опытных и расчётных моментов трещинообразования (Таблица 2) показал, что для половины испытанных балок опытный момент на 3,2–4,8% превышает расчётный, а для другой половины – на 1,3% меньше. Соотношение опытных и расчётных моментов трещинообразования ( $M_{ср}^{on} / M_{ср}^{расч}$ ) в среднем составляет 1,03.

Ширина раскрытия трещин замерялась на боковых гранях балок на уровне центра тяжести растянутой арматуры. Измерения проводились начиная с нагрузки, при которой образовывалась трещина, и приблизительно до 0,8 от разрушающей. Средняя ширина раскрытия трещин вычислялась по данным 7–9 замеров.

Средняя ширина раскрытия трещин в зоне чистого изгиба балок при эксплуатационной нагрузке находилась в пределах 0,07–0,18 мм, увеличиваясь с уменьшением коэффициента армирования. Наибольшее значение  $a_{ср}$  при этой нагрузке составило 0,24 мм для балок 1 серии.

При анализе опытных значений ширины раскрытия трещин выявлена достаточно высокая изменчивость  $a_{ср}$ . Коэффициент вариации для  $a_{ср}$  составил 0,38, что находится в соответствии с обобщёнными данными экспериментов по лёгким бетонам.

Сравнение опытных значений  $a_{ср}$  с нормативными, вычисленными по формуле ДБН, показало, что нормативные превышают их в 1,2 раза. Это вполне справедливо, так как определяемое нормами значение  $a_{ср}$  является шириной раскрытия трещин с 95% обеспеченностью.

Анализ опытных данных расстояний между трещинами  $l_{ср}$  в зоне чистого изгиба балок показал, что эта величина не постоянна и изменяется в пределах  $\pm 50\%$  при среднем значении  $l_{ср}$  около 6 см.

Опытные прогибы балок 1 и 2 серии при действии эксплуатационных нагрузок составили 15,9–19,2 мм и 22,1–24,8 мм. Расхождение между опытными и расчётными прогибами находилось в пределах от 19,9 до 23,8%. Соотношение опытных и расчётных прогибов в среднем для балок 1 серии  $f^{on} / f^{расч} = 1,06$ , а для балок 2 серии –  $f^{on} / f^{расч} = 1,08$ .

**Выводы.** Для получения бетона хорошего качества рекомендуется использовать методику комплексного подхода, учитывающую технологические и эксплуатационные требования к бетону. Использование золы-уноса и карбонатного песка в легких бетонах является наиболее перспективным способом экономного потребления цемента и производства заполнителей.

Расчёт несущей способности изгибаемых элементов из керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем и кварцевом песке рекомендуется проводить по ДБН В.2.6-98:2009.

Расчёт трещиностойкости и деформативности изгибаемых элементов из керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем и кварцевом песке рекомендуется проводить по ДБН В.2.6-98:2009,

используя уточнённые значения расчётных параметров  $R_b$ ,  $R_{bt}$ ,  $E_b$ ,  $\nu$ ,  $\xi$ ,  $\varepsilon_{bm}$ ,  $\varepsilon_{sm}$ .

Применение конструкционного керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем в изгибаемых элементах является перспективным и экономически целесообразным, так как позволяет снизить затраты на транспортирование и монтаж, а также стоимость конструкций.

#### Список литературы:

1. Кравченко С.А., Столевич И.А., Костюк А.И., Столевич А.С. Свойства керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. Вип. 21. Рівне, 2011. С. 32–37.
2. Рекомендации по учету комплекса технологических и эксплуатационных параметров, оптимизирующих свойства конструкционного керамзитобетона на карбонатном песке. Москва: Стройиздат, 1989. 67 с.
3. Кравченко С.А., Постернак А.А., Костюк А.И., Столевич И.А. Свойства керамзитобетона на цементно-зольном вяжущем и карбонатном песке. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. Вип. 28. Рівне, 2014. С. 54–60.
4. Костюк А.И., Столевич И.А., Кравченко С.А., Столевич О.И. Исследование свойств керамзитобетона на цементно-зольном вяжущем и карбонатном песке. Проблемы сучасного будівництва: матер. Всеукр. Конф. молодих учених та студентів. Полтава, 2013. С. 120–124.
5. ДБН В.2.6 – 98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ, 2011. 71 с.
6. Кравченко С.А., Постернак О.О. Несуча здатність та деформативність керамзитобетонних згинальних елементів. Вісник ОДАБА: зб. наук. праць. Вип. 61. Одеса, 2016. С. 220–226.

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ЗГИНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ КЕРАМЗИТОБЕТОНУ НА БАГАТОКОМПОНЕНТНОМУ СПОЛУЧНИКУ ЗА КОРОТКОЧАСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

*Дослідження технічної можливості та економічної доцільності використання керамзиту, кварцового піску і багатокомпонентного сполучника для бетону і залізобетону є важливим народно-господарським завданням. На підставі проведеного експерименту згинальних елементів, виготовлених із керамзитобетону на багатокомпонентному сполучникові, отримано дано щодо несучої здатності, тріщиностійкості і деформативності.*

**Ключові слова:** несуча здатність, деформативність, тріщиностійкість, легкий бетон.

#### THE STUDY OF FLEXIBLE ELEMENTS OF CONCRETE ON MULTICOMPONENT BINDER UNDER THE ACTION OF SHORT-TERM LOAD

*The study of the technical and economic feasibility of using expanded clay, quartz sand and multicomponent binder for concrete and reinforced concrete is an important national economic task. On the basis of the conducted experiment of the bend elements, made of expanded clay concrete on the multicomponent binder the data on the bearing capacity, crack resistance and deformability are obtained.*

**Key words:** bearing capacity, deformability, crack resistance, lightweight concrete.