

Совгира Василиса Васильевна, канд. техн. наук, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса (Украина)

Совгира Василий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса (Украина)

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ РАЗВИТИЯ ДЕСТРУКЦИЙ СТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНЫХ ОДНОРОДНО СЖАТЫХ БЕТОНОВ С ВОЗРАСТАНИЕМ НАГРУЗКИ НА ИХ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ

© РУП «Институт БелНИИС», 2020
Institute BelNIIS RUE, 2020

АННОТАЦИЯ

В статье приведены особенности процесса интенсивности развития деструкций, псевдопластического деформирования и разрушения однородно и неоднородно сжатого тяжелого бетона прочностью в диапазоне $f_{c,10} = 23,6; 40,8; 71,0$ МПа [2...5 и др.] и отмечаемое отличие процесса интенсивности развития деструкций, деформирования и разрушения одноосно сжатого тяжелого, мелкозернистого и керамзитового бетона прочностью $f_{c,10} = 50,2; 54,9$ и $36,9$ МПа при «мягком» и «жестком» режимах нагружения одноосно сжатых бетонных призматических колонн 5 типоразмера.

Выполнен анализ литературных источников с исследованиями изменения упруго-пластических характеристик ν_c , E_c^{sek} тяжелого, мелкозернистого и конструкционного керамзитового бетона с учетом влияния значимых факторов и их изменение с увеличением уровня нагрузки при описании зависимости $\sigma_c - \varepsilon_{cx}$. Установлено, что рекомендованные строительными нормами $\nu_{cл}$ и E_c одноосно сжатого бетона количественно и качественно не отражают характер изменения упруго-пластических свойств тяжелого,

керамзитового и мелкозернистого бетона (цементно-песчаной матрицы) центрально сжатого бетона с ростом уровня нагрузки.

Предложены аналитические выражения зависимости $\sigma_c - \varepsilon_{cx}$, описывающие опытные значения диаграмм деформирования одноосно сжатого тяжелого, мелкозернистого (цементно-песчаной матрицы) и керамзитобетона серии В призмочной прочностью $f_{c,10} = 50,2; 54,9$ и $36,9$ МПа исследованных бетонных образцов 5 группы типоразмеров с «мягким» и «жестким» режимами нагружения.

Приведены исследования, свидетельствующие о том, что механизм деформирования и процесс развития деструкций (разуплотнения) структуры цементного камня, тяжелого, мелкозернистого и керамзитобетона с ростом уровня нагрузки отражаются на нелинейном характере изменения упруго-пластических свойств: ν_c – коэффициента упругости; секущего модуля упругости $E_c^{sek} = E_c \cdot \nu_c$, которые отображают реологические свойства цементных бетонов в рекомендуемых выражениях (1...3).

Предложены аналитические выражения зависимости изменения коэффициентов упругости (ν_c) и коэффициентов интенсивности развития деструкций (K_D) одноосно сжатых бетонов с ростом уровня нагрузки при «мягком» и «жестком» режимах нагружения исследованных серий цементных бетонов с использованием: ε_{cx} ; ε_{clx} ; ν_{cu} ; ν_c отражающих процесс изменения упруго-пластических свойств тяжелого, керамзитового, мелкозернистого бетона и цементного камня на восходящих и нисходящих участках полных диаграмм деформирования цементных композитов при центральной сжатии кратковременной статической нагрузкой.

Исследованиями отмечено, что интенсивность развития деструкций в структуре однородно нагруженного тяжелого бетона существенно (в 1,17 раза) ниже, чем в одноосно сжатом мелкозернистом (цементно-песчаной матрице) и керамзитовом бетоне, и в 1,52 раза менее в цементном камне.

Экспериментами установлено характерное расположение уровней параметрических точек Θ_{cx} ; f_{cr}^p ; f_{cr}^v тяжелого бетона с ростом уровня нагрузки исследованных видов бетонов, отражающих интенсивность развития деструкций структуры цементных бетонов.

Ключевые слова: интенсивность развития деструкций; тяжелый, мелкозернистый и керамзитовый бетон; однородное и неоднородное сжатие; режим нагружения; полные диаграммы.

Для цитирования: Совгира, В. В. Влияние интенсивности развития деструкций структуры цементных однородно сжатых бетонов с возрастанием нагрузки на их деформирование и разрушение / В. В. Совгира, В. Н. Совгира // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2020. – Вып. 12. – С. 209-229. [https://doi.org/ 10.35579/2076-6033-2020-12-13](https://doi.org/10.35579/2076-6033-2020-12-13).

Vasilisa Sovgira, PhD in Engineering Science, Odessa State Academy of Building and Architecture, Odessa (Ukraine)

Vasiliy Sovgira, PhD in Engineering Science, Associate Professor, Odessa State Academy of Building and Architecture, Odessa (Ukraine)

INFLUENCE OF THE INTENSITY OF DEVELOPMENT OF DESTRUCTIONS STRUCTURE OF CEMENTS UNIFORMLY COMPRESSED CONCRETES WITH INCREASING LOAD ON THEIR DEFORMATION AND DISRUPTION

ABSTRACT

The article presents the features of the process of the intensity of the development of destruction, pseudoplastic deformation and fracture of uniformly and inhomogeneously compressed heavy concrete with strength in the range $f_{c,10} = 23,6; 40,8; 71,0$ MPa [2...5 and others] and the marked difference in the intensity of the development of destruction, deformation and fracture of uniaxially compressed heavy, fine-grained and expanded clay concrete with strength $f_{c,10} = 50,2; 54,9$ and $36,9$ MPa under the “soft” and “hard” loading conditions of uniaxially compressed concrete prismatic columns of the 5th standard size.

An analysis of literary sources was carried out with studies of changes in the elastic-plastic characteristics of ν_c, E_c^{sek} heavy, fine-grained and structural expanded clay concrete taking into account the influence of

significant factors and their change with increasing load when describing the dependence $\sigma_c - \varepsilon_{cx}$. It was found that the recommended by the Building Standards ν_{cu} , and E_c uniaxially compressed concrete quantitatively and qualitatively do not reflect the nature of the change in the elastic-plastic properties of heavy, expanded clay and fine-grained concrete (cement-sand matrix) of centrally compressed concrete with increasing load level.

Proposed analytical expressions of the dependence $\sigma_c - \varepsilon_{cx}$, describing experimental values of deformation diagrams of uniaxially compressed heavy, fine-grained (cement-sand matrix) and expanded clay concrete of series B with prismatic strength $f_{c,10} = 50,2; 54,9$ and $36,9$ MPa of the investigated concrete samples of the 5th group of standard sizes with “soft” and “hard” loading conditions.

Studies are given that indicate that the mechanism of deformation and the process of development of destructions (decompression) of the structure of cement stone, heavy, fine-grained and expanded clay concrete with increasing load level affects the nonlinear nature of the change in the elastic-plastic properties: ν_c - coefficient of elasticity; secant modulus of elasticity $E_c^{sek} = E_c \cdot \nu_c$, which reflect the rheological properties of cement concrete in recommended expressions (1...3).

Analytical expressions are proposed for the dependence of changes in the elastic coefficients (ν_c) and the coefficient of developmental rate of destruction (K_D) of uniaxially compressed concrete with an increase in the load level under the “soft” and “hard” loading conditions of the investigated series of cement concrete using: ε_{cx} ; ε_{clx} ; ν_{cu} ; ν_c , reflecting the process of changing the elastic-plastic properties of heavy, expanded clay, fine-grained concrete and cement stone in the ascending and descending sections of the complete diagrams of deformation of cement composites under central compression with a short-term static load.

Studies have noted that the intensity of the development of destruction in the structure of uniformly loaded heavy concrete is significantly (1,17 times) lower than in uniaxially compressed fine-grained (cement-sand matrix) and expanded clay concrete and 1,52 times less in cement stone.

The experiments established a characteristic arrangement of the levels of parametric points Θ_{cx}^0 ; f_{cr}^0 ; f_{cr}^i of heavy concrete with an increase in the load level of the investigated types of concrete, reflecting the intensity of the development of destruction of the structure of cement concrete.

Keywords: the intensity of the development of destructions; heavy, fine-grained and expanded clay concrete; uniformly and non-uniformly compression; loading mode; full diagrams.

For citation: Sovgira Vasilisa, Sovgira Vasilii. *Vliyanie intensivnosti razvitiya destruktivnoy struktury tsementnykh odnorodno szhatykh betonov s vozrastaniem nagruzki na ikh deformirovanie i razrushenie* [Influence of the intensity of development of destructions structure of cements uniformly compressed concretes with increasing load on their deformation and disruption]. In: *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 12. 2020. pp. 209-229. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2020-12-13> (in Russian).

ВВЕДЕНИЕ

Представленная статья является продолжением работ [1–5 и др.], посвященных экспериментальному исследованию и математическому моделированию интенсивности развития деструкций структуры однородно сжатого тяжелого (ТБ), мелкозернистого (МБ) и конструктивного керамзитового бетона (КБ) с ростом уровня ступенчатой статической нагрузки.

Процесс интенсивности развития деструкций структуры цементного композита, характеризуемый обобщающим параметром неоднородного и неупругого деформирования и разрушения бетона с ростом уровня ступенчатой кратковременной статической нагрузки, представляет собой сложный многостадийный процесс, сопровождающийся: возникновением дефектов структуры цементного камня и бетона на стадии изготовления, до приложения нагрузки; нарушением сплошности структуры в виде пор, капилляров субмикро-, микро- и макротрещин с формированием фрагментов магистральных трещин и других дефектов с увеличением уровня нагрузки.

Выполненные исследования авторов [1–5 и др.] и результаты анализа исследований из литературных источников [6–10 и др.] свидетельствуют о том, что интенсивность развития деструкций структуры однородно и неоднородно сжатых композитов -

тяжелого, мелкозернистого (цементно-песчаной матрицы) и конструктивного керамзитобетона – с ростом кратковременной статической нагрузки зависит от существенно влияющих факторов: прочности и вида бетона; зернового состава и упругих характеристик заполнителей и цементного камня; водоцементного отношения; количественного содержания цементного камня в составе бетона и условий его твердения; возраста бетона; высоты сечений и величины эксцентриситета; вида напряженного состояния; режимов нагружения и др.

Из анализа работ [2...10 и др.] следует, что механизм процесса интенсивности развития деструкций цементных бетонов при различных режимах напряженно-деформированного состояния (НДС) напрямую связан с нарушением структуры композитов как многокомпонентных неоднородных материалов. Однако изучаемый вопрос из-за различных мнений о методиках исследований характера развития микроразрушений с ростом нагрузки не приблизил к конкретным результатам.

Исследование процесса развития деструкций с возрастанием уровня нагрузки при использовании полных диаграмм $\sigma_c - \epsilon_c$ позволяет определять механизм субмикро-, микро-, макротрещинообразования в бетоне с увеличением нагрузки и принимать обоснованные качественные решения на стадии проектирования или реконструкции промышленных и гражданских сооружений. Исследования в этой области продолжаются.

Выполненные исследования [1–5 и др.] процесса интенсивности развития деструкций однородно и неоднородно сжатого тяжелого бетона обнаружили ряд особенностей: деструкции структуры одноосно сжатого бетона с ростом уровня нагрузки развиваются нелинейно; количественные показатели деструкции в уровне $\sigma_c = f_c$ с увеличением прочности бетона уменьшаются в диапазоне (0,62...0,35); показатели деструкции менее нагруженных волокон внецентрично сжатого бетона существенно зависят от градиента эпюры напряжений и др.

Процесс интенсивности развития деструкций (разуплотнения) однородно и неоднородно сжатого бетона существенно зависит от упруго-пластических характеристик бетона E_c ; ν_c ; E_c^{sek} ; $\nu_{c,e}$,

изменяющихся с ростом уровня нагрузки, что является актуальным при описании зависимости $\sigma_c - \epsilon_c$ полных диаграмм деформирования бетона аналитическими выражениями.

Графики на рисунке 1 изменения времени прохождения ультразвукового импульса сквозь тело бетонных призматических однородно и неоднородно сжатых образцов [2–5 и др.] качественно похожи, однако, по расположению уровней параметрических точек $f_{crc}^0; f_{crc}^V$, свидетельствующих о том, что развитие изменений в структуре бетона с ростом уровня нагрузки, существенно отличаются.

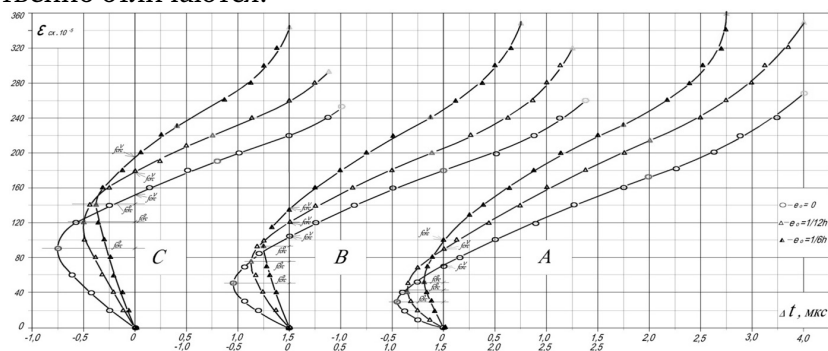


Рисунок 1. Графики зависимости $\epsilon_{cx} (f_{crc}^0; f_{crc}^V; \Delta t)$ одноосно сжатого тяжелого бетона прочностью в диапазоне $f_{c,10} = 23,6; 40,8; 71,0$ МПа (исследованных серий А, В, С) образцов 5-й группы типоразмеров, отражающие изменение уровней параметрических точек $f_{crc}^0; f_{crc}^V$ с увеличением прочности бетона, эксцентриситета нагрузки

Сопоставление и анализ данных [2–10 и др.] исследований изменения времени распространения импульсов ультразвука в бетоне с ростом нагрузки и деформаций (рисунок 1) указывают на то, что уровни уплотнения и разуплотнения бетона, отражаемые параметрическими точками $f_{crc}^0; f_{crc}^V$ зависят от ряда факторов: прочности бетона, размеров сечений образцов, величины эксцентриситета, водоцементного отношения и др.

Выполненные исследования [2–10 и др.] уровней $f_{crc}^0; f_{crc}^V$ процесса субмикро-, микро-, макротрещинообразования в многокомпонентном бетоне показывают, что процессы

интенсивности развития деструкций в цементно-песчаной матрице, цементном камне и бетоне с ростом уровня кратковременной статической нагрузки неодинаковы и существенно зависят от комплекса влияющих факторов.

ПРОЦЕСС ИНТЕНСИВНОСТИ РАЗВИТИЯ ДЕСТРУКЦИЙ СТРУКТУРЫ ОДНООСНО СЖАТОГО ТЯЖЕЛОГО, МЕЛКОЗЕРНИСТОГО И КЕРАМЗИТОВОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ПОЛНЫХ ДИАГРАММ

Исследование процесса развития деструкций структуры тяжелого, мелкозернистого и керамзитового одноосно сжатого бетона с возрастанием уровня нагрузки напрямую связано с обобщенными показателями деформирования и разрушения бетона при использовании полных диаграмм деформирования $\sigma_c - \epsilon_c$, характеризующих изменение упруго-пластических свойств материала и позволяющих определять механизм субмикро-, микро-, макротрещинообразование в неоднородном конгломерате с увеличением нагрузки.

Исследованиями предполагается изучить процесс интенсивности развития деструкций компонентов тяжелого, мелкозернистого (цементно-песчаной матрицы), керамзитобетона, цементного камня и композитов в целом при одноосном кратковременном сжатии ступенчатой статической нагрузкой. Для выполнения исследований изготовлено четыре серии образцов из тяжелого, мелкозернистого бетона и цементного камня прочностью в диапазоне $f_c = 50,2 \dots 56,6$ МПа, а также керамзитобетона прочностью $f_c = 36,9$ МПа.

Согласно программе исследований напряженно-деформированного состояния бетонных призматических образцов 5 типоразмера (100x100 x 400мм) при однородном статическом сжатии, изготовлены и испытаны четыре серии образцов-призм (по 6 образцов в каждой серии) и 32 куба с размерами грани 150 мм (по 8 кубов в серии) по три образца при «мягком» и «жестком» режимах нагружения по методике [2–5].

Для изготовления опытных образцов использовано: в качестве крупного заполнителя для тяжелого бетона гранитный щебень фракции 5...15мм, пустотностью $P_{ц} = 0,425$ и насыпной массой $p_{ц} = 1\,465 \text{ кг/м}^3$. Для приготовления керамзитобетона использован керамзитовый гравий Одесского керамзитового завода фракции 5...15мм с насыпной массой $p_{ц} = 518 \text{ кг/м}^3$, прочностью на сжатие в цилиндре 2,32 МПа и пустотностью $P_{ц} = 0,43$. При приготовлении тяжелого, мелкозернистого (песчано-цементной матрицы) и керамзитобетона использовался кварцевый морской рефулированный песок объемной массой $P_{п} = 1580 \text{ кг/м}^3$, модуль крупности $M_{к} = 1,96$. Для затворения бетонной смеси использована водопроводная питьевая вода. Формование и уплотнение бетона осуществлялось по методике, изложенной в [2–5]. Составы смесей исследуемых серий образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Составы бетонных смесей исследуемых серий образцов

Серия образцов, вид бетона	В/Ц	Количество образцов в серии, шт.	Состав бетонной смеси на 1м ³					
			Вода в л	Цемент в кг	Молотый песок в кг	Песок в кг	Щебень в кг	Всего кг
I ТБ (тяжелый бетон)	0,52	3 + 3	151	290	-	586	1334	2 361
II МБ (цементно-песчаная матрица)	0,55	3 + 3	329	598	-	1433	-	2 351
III КБ (керамзитобетон)	0,53	3 + 3	283	535	-	657	390	1 865
IV-ЦК (цементный камень)	0,6	3 + 3	369	1 062	658	-	-	2 089

Процессы развития деструкций структуры тяжелого, мелкозернистого и керамзитового одноосно сжатого бетона изучались с учетом влияния значимых факторов при «мягком», аналогично испытанию с $d\sigma / dt = \text{const}$, и «жестком», подобно испытанию

с падающей нагрузкой при $d\varepsilon / dt = \text{const}$, режимах нагружений на восходящих и нисходящих участках диаграмм $\sigma_c - \varepsilon_c$ по методике, изложенной в [2–5]. Испытания осуществляли, используя сервоуправляемую систему «испытательная машина, пружинный кондуктор – образец, УКБ –1М».

Учитывая феноменологические требования к диаграмме $\sigma_c - \varepsilon_c$ (при $\sigma_c \rightarrow 0, d\sigma_c / d\varepsilon_c = E_c$ и при $\sigma_c = f_{c,10}, d\sigma_c / d\varepsilon_c = 0$), предложены аналитические выражения описания полных диаграмм $\sigma_c - \varepsilon_c$ деформирования одноосно сжатых призматических коротких бетонных колонн 5 типоразмера призматической прочностью серии В : ТБ - $f_{c,10} = 50,2$ МПа ; МБ (цементно-песчаная матрица) - $f_{c,10} = 54,9$ МПа; ЦК (цементный камень) - $f_{c,10} = 56,6$ МПа и КБ - $f_{c,10} = 36,9$ МПа [2–5].

В исследованиях при «мягком» и «жестком» режимах нагружения образцов в качестве максимальных ε_{clx} приняты деформации, отвечающие максимальным напряжениям $\sigma_c = f_c$ в уровне вершины диаграммы $\sigma_c - \varepsilon_{cx}$.

Предельные деформации ε_{culx} контролировались в уровнях $f_c^3 \sigma_c = 0,8 f_c$ нисходящего участка диаграммы $\sigma_c - \varepsilon_{cx}$ при «жестком» режиме нагружения образцов 5 типоразмера с использованием упругого кондуктора по методике [2...5]. Из экспериментальных данных на рисунке 2 следует, что усредненные относительные максимальные ε_{clx} и предельные ε_{culx} деформации одноосно сжатого ТБ, МБ и КБ серии В изменяются в диапазоне $\varepsilon_{clx} = (170...205) \cdot 10^{-5}$ и $\varepsilon_{culx} = (250...280) \cdot 10^{-5}$, что отвечает опытам других авторов при прочих равных условиях.

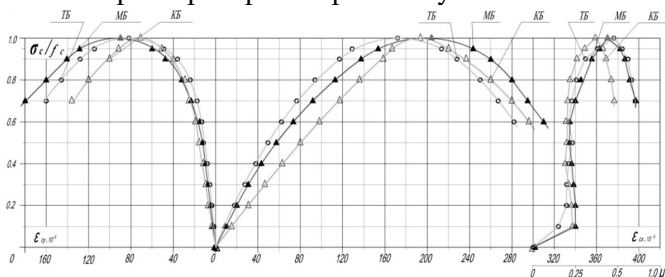


Рисунок 2. Графики зависимости $\sigma_c / f_c (\varepsilon_{cx}, \varepsilon_{cy}, m)$ одноосно сжатого ТБ, МБ и КБ исследованных серий В образцов 5-й группы типоразмеров прочностью $f_{c,10} = 50,2; 54,9; 36,9$ МПа, отражающие процесс изменения продольных ε_{cx} , поперечных ε_{cy} деформаций, и коэффициента поперечных деформаций m с ростом уровня нагрузки

Опытные диаграммы зависимости σ_c - ε_c деформирования одноосно сжатого ТБ, МБ и КБ серии В исследованных типоразмеров 5 группы одноосно сжатых образцов с «мягким» режимом нагружения до уровня $\sigma_c = f_c$ и диаграммы зависимости σ_c - ε_c образцов 5 группы типоразмеров с «жестким» режимом нагружения на рисунке 2 аппроксимированы выражениями (1–3)

$$\varepsilon_{cx} = \varepsilon_{clx} \cdot [1 \mp (1 - \sigma_c/f_c)^n], \quad (1)$$

σ_c (ε_{cx}) до уровня $\sigma_c = f_c$ при «мягком» режиме нагружения

$$\sigma_c = f_c \cdot [1 - (1 - \varepsilon_{cx}/\varepsilon_{clx})^{1/n}], \quad (2)$$

или в уровнях $(0-1) f_c = \sigma_c \leq f_c \geq \sigma_c = 0,8f_c$ - при «жестком» режиме нагружения

$$\sigma_c = \varepsilon_{clx} \cdot [1 \mp (1 - \sigma_c/f_c)^n] \cdot v_c \cdot E_{cm}. \quad (3)$$

В показателе степени выражений (1–3) использована безразмерная характеристика (n), физический смысл которой раскрывается: $n = f_c / E_c \cdot \varepsilon_{clx} = v_{cu}$, где v_{cu} – максимальный коэффициент упругости (при $\sigma_c = f_c$) ТБ, МБ и КБ при осевом сжатии. Знак (–) используется на восходящих участках диаграмм σ_c - ε_c , а знак (+) – на нисходящих участках диаграмм σ_c - ε_c . Выражениями f_c , v_{cu} , v_c , E_c в составе формул (1-3) учитывается влияние значимых факторов, включая вид и прочность бетона, упруго-пластических свойств, изменение размеров поперечных сечений, режимов нагружений и др. [2–5].

В процессе исследований при ступенчатом нагружении бетонных образцов и контроле изменения скорости прохождения ультразвукового сигнала при сквозном диагональном расположении датчиков и приемников прибора УКБ-1М в уровнях $0,5f_c \leq f_c$ при «мягком» режиме и $0,6f_c \leq f_c \geq \sigma_c = 0,6f_c$ – «жестком» режиме нагружения на осциллографе отмечены резкие смещения (всплески) синусоиды. С увеличением уровня нагрузки частота всплесков увеличивалась. Во время выдержки нагрузки на ступени в уровнях $0,5 \dots 0,85f_c$ при «мягком» режиме нагружения в зависимости от прочности тяжелого бетона всплески прекращались. В уровнях $0,85f_c \leq f_c$ мерцание синусоиды не прекращалось

до лавинообразного разрушения образцов, за исключением уменьшения частоты мерцаний во время выдержек на очередной ступени.

При «жестком» режиме нагружения резкие всплески и затухание во время выдержек синусоиды на осциллографе наблюдались в уровнях $0,6f_c \leq 0,95f_c$. В уровнях $0,95f_c \leq f_c \leq \sigma_c = 0,6f_c$ мерцание синусоиды не прекращалось до лавинообразного разрушения образцов на отдельные фрагменты. В уровнях $0,95f_c \leq f_c \leq \sigma_c = 0,8f_c$ в зависимости от прочности бетона отмечалось снижение частоты мерцаний во время выдержек на очередной ступени. Появление всплесков синусоиды по причине некачественного крепления датчиков и приемников к поверхности образцов, как отмечается в [2–5], несостоятельно. При более тщательном изучении причин появления всплесков синусоиды на осциллографе установлено, что мерцание синусоиды является реакцией прибора на динамику разрывов силовых связей в структуре субмикро- и микрообъемов цементно-песчаной матрицы (МБ) цементного камня ТБ и КБ в процессе увеличения нагрузки до следующего, более высокого уровня.

Наблюдаемые процессы нарушения структуры цементного камня и бетона объясняются положениями теории А. А. Гвоздева [9], которая трактует, что установившееся поле начальных напряжений, вызванное капиллярно-пористой структурной неоднородностью изготовленного бетона, взаимодействуя с внутренним полем напряжений, вызванным статической нагрузкой в теле образца, создает местные концентрации напряжений, приводящие к нарушению сплошности бетона образца. В результате этого при внешних нагрузках очередного уровня происходят силовые микроразрывы элементов структуры цементного камня и бетона локального характера с развитием субмикро-, микро-трещин в отдельных точках микро-, макрообъема образца [2–5]. Таким образом, одноосно сжатый бетон в результате начальных микроразрушений при увеличении нагрузки следующей ступени деформируется по длине образца весьма неравномерно.

Выполненные исследования свидетельствуют о том, что механизм деформирования и процесса развития деструкций (разуплотнения) структуры цементного камня и бетона с ростом

уровня нагрузки отражается на нелинейном характере изменения упруго-пластических свойств [2–5]: ν_c – коэффициента упругости; E_c – начального модуля упругости и, следовательно, секущего модуля упругости $E_c^{sek} = E_c \cdot \nu_c$, которые отражают реологические свойства цементных бетонов в выражениях (1–3).

Аналитические выражения (1–3) позволяют выразить характер изменения коэффициента упругости ν_c , отражающего процесс интенсивности развития деструкций (разуплотнения) структуры одноосно сжатых цементных бетонов с ростом уровня нагрузки на восходящем и нисходящем участках полной диаграммы деформирования бетонов. Изменение коэффициента упругости ν_c с ростом уровня нагрузки определяется зависимостью (4)

$$\nu_c = \frac{\nu_{cu} \cdot \sigma_c}{f_c} : [1 \mp [1 - \sigma_c / f_c]^{\nu_{cu}}], \quad (4)$$

в которой: f_c с учетом влияния размеров радиуса r сечения образцов аппроксимировано выражением

$$f_{c,10} = f_{c15}(r) = f_{c15}(a + r) / (b + c \cdot r), \quad (5)$$

где a , b , c – эмпирические постоянные для исследованных серий: ТБ – 4,25; 3,50; 1,20; МБ – 10,6; 9,1; 1,4 и КБ – 3,15; 2,1; 1,28 при осевом сжатии.

f_{c15} – призменная прочность изучаемых бетонов базовых призм с размерами сторон 150x150x600мм при осевом сжатии.

ν_{cu} – максимальный коэффициент упругости (при $\sigma_c = f_c$) для исследованных серий и видов бетонов аппроксимировано выражением

$$\nu_{cu} = (a + f_{10}) / (b + c \cdot f_{10}), \quad (6)$$

где a , b , c – опытные коэффициенты для исследованных серий: ТБ – 19; 102; 0,4; МБ – 36; 115; 0,4 и КБ – 62; 111; 0,45 при осевом сжатии.

На рисунке 3 приведены графики зависимости σ_c / f_c (ν_c) изменения коэффициентов упругости (ν_c) с ростом уровня нагрузки, количественно и качественно отображающие нелинейный

процесс развития деструкций в структуре цементно-песчаной матрицы, цементного камня ТБ, МБ и КБ, обуславливающие трансформацию упруго-пластических свойств и, следовательно, формирование псевдопластических деформаций, описываемых аналитическими выражениями (1–3) полных диаграмм зависимости $\sigma_c - \varepsilon_c$ исследуемых одноосно сжатых цементных бетонов.

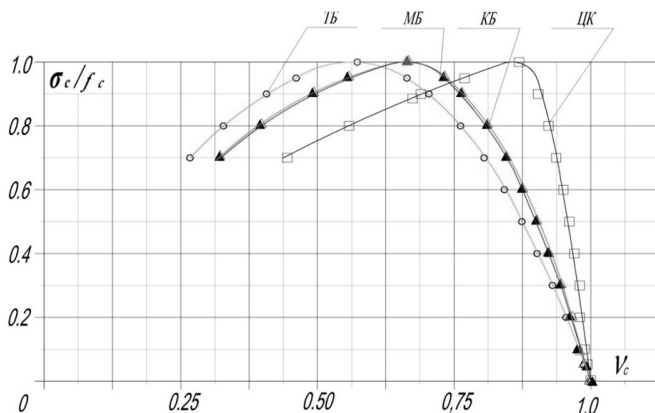


Рисунок 3. Графики зависимости $\sigma_c / f_c - v_c$ одноосно сжатого ТБ, МБ (цементно-песчаной матрицы) КБ и ЦК исследованных серий образцов 5 группы типоразмеров исследованных серий образцов прочностью $f_{c,10} = 50,2; 54,9; 36,9; 56,6$ МПа, отображающие процесс изменения упруго-пластических свойств компонентов исследуемых цементных бетонов с ростом уровня нагрузки

Кривые нелинейной зависимости $\sigma_c / f_c (v_c)$ компонентов цементных композитов ТБ, МБ (цементно-песчаной матрицы), цементного камня и КБ, по характеру изменения v_c исследованных серий бетонов показывают: на восходящих участках диаграмм интенсивность развития деструкций структуры тяжелого бетона в уровнях $f_{cr}^b; f_{cr}^v$ и $\sigma_c = f_c$, а также на нисходящих участках диаграмм в уровнях f_c^3 $\sigma_c = 0,8f_c$ коэффициент упругости v_c ТБ существенно (в 1,17 раза) отличается от v_c цементно-песчаной матрицы (МБ) и КБ и в 1,52 раза менее v_c цементного камня (ЦК). Интересно отметить, что коэффициент упругости (v_c) КБ близок или почти совпадает с v_c МБ (цементно-песчаной матрицей) и в 1,29 раза менее v_c цементного камня на всех уровнях зависимости $\sigma_c / f_c (v_c)$.

Развитие деструкций (при уплотнении, разуплотнении) технологически образовавшихся вакансий, дислокаций микропор внутри кристаллов, а также микропор и трещин цементного камня, включая микро- и макродефекты структуры цементного камня, цементно-песчаной матрицы и бетона в уровнях $f_{сг}^0; f_{сг}^v$ на восходящем участке диаграмм $\sigma_c - \varepsilon_c$ и диссипативные процессы интенсивного развития микро- и макротрещин в цементно-песчаной матрице и бетоне со слиянием их в фрагменты формирующихся магистральных трещин и расслоение образца на фрагменты с уровня $f_c^3 \sigma_c = 0,8f_c$ нисходящей ветви полных диаграмм деформирования исследуемых цементных бетонов целесообразно отражать коэффициентом интенсивности развития деструкций K_D (7), предложенным в работе [4],

$$K_D = (1 - \nu_c) = 1 - \frac{\nu_{cu} \cdot \sigma_c}{f_c} : [1 \mp [1 - \sigma_c/f_c]^{\nu_{cu}}], \quad (7)$$

где ν_c – коэффициент упругости исследуемых цементных бетонов, с ростом уровня нагрузки, устанавливаемый по формулам (4...6).

На рисунке 4 графики зависимости $\sigma_c/f_c - K_D$ отражают количественную и качественную оценки интенсивности развития деструкций структуры компонентов ТБ, МБ (цементно-песчаной матрицы), цементного камня и КБ по характеру изменения коэффициента деструкций K_D исследованных серий одноосно сжатых цементных бетонов на всех уровнях нагружения.

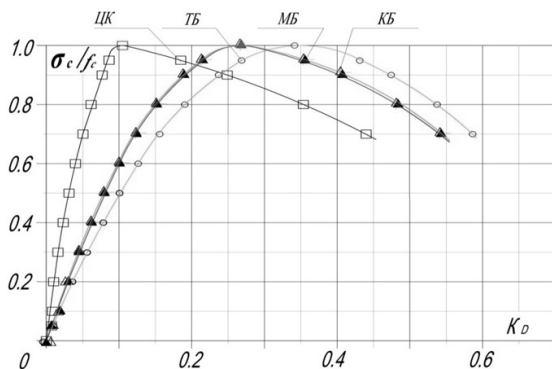


Рисунок 4. Графики зависимости $\sigma_c/f_c - K_D$ интенсивности развития деструкций (K_D) исследованных серий однородно сжатого ТБ, МБ КБ и ЦК исследованных образцов 5-й группы прочностью $f_{с,10} = 50,2; 54,9; 36,9; 56,6$ МПа, отображающие процесс разуплотнения бетона с ростом уровня нагрузки и развития псевдопластических деформаций

Деструкции бетонов в уровнях $0,75f_c \leq f_c^3 \sigma_c = 0,8f_c$ сопровождаются интенсивным ростом псевдопластических деформаций (рисунок 2) с раскрытием, ростом и слиянием в участки формирующихся магистральных трещин и в уровнях $f_c^3 \sigma_c = 0,8f_c$ в зависимости от вида и прочности бетона последующим упруго-вязким (серии бетона ТБ, МБ и КБ) и хрупким (компонент бетона – серия ЦК) разрушением.

Возникающие микроразрывы силовых связей структуры бетона и, как следствие, субмикро- и микротрещины в бетоне призматических одноосно сжатых образцов, стремясь развиваться в микро-, макрообъемах компонентов цементных бетонов (цементном камне; цементно-песчаной матрице и контакте матрицы с крупным заполнителем), встречаются на своем пути менее нагруженные объемы бетона с создавшимся вторичным внутренним полем напряженного состояния, которое препятствует дальнейшему развитию микротрещин. Кроме того, образовавшиеся субмикро- и микротрещины на своем пути встречаются поры, капилляры, дислокации, зерна заполнителей с обходящими трещинами, а также с полем собственного напряженного состояния, которое активно участвует в перераспределении напряжений с устья движущейся микротрещины, препятствуя тем самым ее дальнейшее развитие. С приложением усилия очередной ступени устья трещин прорастают или обходят тормозящие преграды (круглые поры, капилляры, зерна мелкого или крупного заполнителя), продолжают развиваться вглубь, встречая новые преграды с вновь создавшимся полем напряженного состояния с перераспределением возрастающих напряжений.

Описанный процесс трещинообразования в исследованных ТБ, МБ, КБ и ЦК при однородном сжатии с «мягким» и «жестким» режимами нагружения оценивался косвенными методами на основании характера изменения: коэффициента развития в бетоне деструкций $\sigma_c/f_c - K_D$; поперечных $\varepsilon_{cy}(\varepsilon_{cx})$ и объемных $\Theta_c(\varepsilon_{cx})$ деформаций; коэффициента поперечных деформаций $\mu_c(\varepsilon_{cx})$ и скорости прохождения ультразвука $\Delta t(\varepsilon_{cx})$ с ростом уровня нагрузки по методике, изложенной в [2–5].

Графики зависимости $\sigma_c/f_c(\Theta_{cx}; \Delta t)$ (рисунок 5) свидетельствуют о том, что уменьшение объема в окрестности точки Θ_{cx} и уровни параметрических точек $f_{crc}^0; f_{crc}^v$ тяжелого бетона с ростом уровня нагрузки расположены ниже параметрических точек МБ (цементно-песчаной матрицы) и КБ, которые подтверждают гипотезу о более раннем развитии интенсивности деструкций структуры тяжелого бетона, чем МБ или КБ.

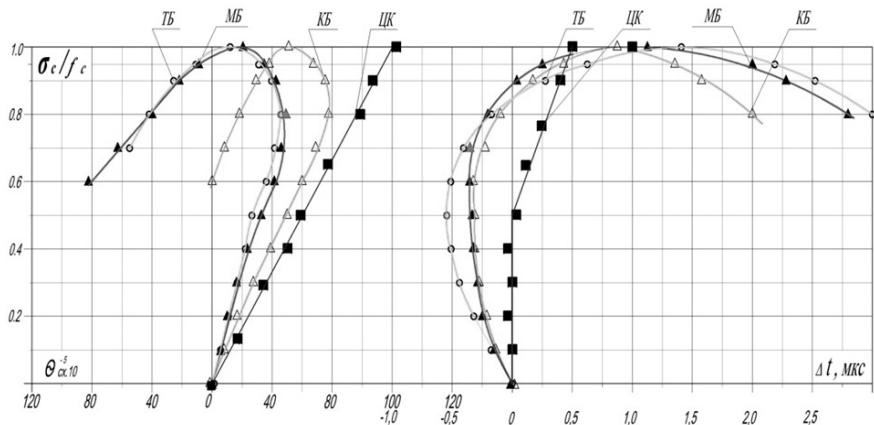


Рисунок 5. Графики зависимости $\sigma_c/f_c(\Theta_{cx}; \Delta t)$ интенсивности развития деструкций (K_D) исследованных серий однородно сжатого ТБ, МБ КБ и ЦК исследованных образцов 5-й группы прочностью $f_{c,10} = 50,2; 54,9; 36,9; 56,6$ МПа, отображающие процесс разуплотнения бетона с ростом уровня нагрузки и развития псевдопластических деформаций

Анализ построенных по результатам исследований графиков зависимостей $\varepsilon_{cx}(\Delta t; f_c; e_0)$ и $\sigma_c/f_c(\varepsilon_{cy}; \varepsilon_{cx}; \Theta_{cx}; \mu_c; \Delta t; K_D; \nu_c)$ показал, что: $\varepsilon_{cy}, \varepsilon_{cx}$ одноосно сжатого ТБ существенно меньше $\varepsilon_{cy}, \varepsilon_{cx}$ МБ и КБ; $K_D, \Theta_{cx}, f_{crc}^0, f_{crc}^v$ одноосно сжатого ТБ менее $K_D, \Theta_{cx}, f_{crc}^0, f_{crc}^v$ аналогично нагруженного МБ и КБ (см. рисунки 1–5). Наблюдаемые превышения количественных и качественных характеристик компонентов цементных бетонов (цементно-песчаной матрицы (МБ), цементного камня) по отношению к ТБ и КБ с увеличением уровня нагрузки возможно при значительном влиянии комплекса факторов на интенсивность развития деструкций структуры исследуемых бетонов и, следовательно, на характер их деформирования и разрушения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований свидетельствуют о качественном и количественном влиянии комплекса недостаточно изученных факторов: вида, прочности и зернового состава бетонов; их упруго-вязких свойств; размеров сечений (h) образцов; эксцентриситета нагрузки и режима нагружений и др. на интенсивность развития деструкций в структуре цементного камня и бетона, его деформирования с особенностями изменения коэффициента упругости, который совместно с начальным модулем упругости ($v_c \cdot E_c = E_c^{sek}$) образует секущий модуль упругости, характеризующий изменение упруго-пластических свойств бетона на рассматриваемых уровнях нагрузки при кратковременном центральном сжатии бетонных коротких призматических колонн 5 типоразмера с «мягким» и «жестким» режимами нагружения.

Предложены выражения (1...7) зависимости: $\sigma_c - \varepsilon_c$ исследованных серий бетонов; $\sigma_c / f_c (v_c)$ изменения коэффициента упругости и $\sigma_c / f_c (K_D)$ коэффициента интенсивности развития деструкции одноосно сжатого бетона с ростом нагрузки при «мягком» и «жестком» режимах нагружения исследованных серий цементных бетонов с использованием ε_{clx} ; E_c ; v_{cu} ; v_c , отражающих процесс развития деструкций на восходящих и нисходящих участках полных диаграмм деформирования исследованных цементных бетонов.

В исследованиях (рисунки 1...5) отмечено, что изменение вида и зернового состава крупного и мелкого заполнителя в бетонах существенно отражается на характере интенсивности развития деструкций структуры и, следовательно, деформировании и микро- и макроразрушении цементных бетонов с возрастанием уровня нагрузки.

Полученные результаты оценки интенсивности развития деструкции структуры цементных бетонов могут быть использованы при решении актуальных для практики и теории задач оценки несущей способности эксплуатируемых и проектируемых бетонных и железобетонных конструкций с учетом рекомендуемых или фактических уровней статических нагрузок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мишутин, А. В. Процесс разрушения одноосно сжатого бетона / А. В. Мишутин, В. М. Кобринец, В. В. Совгира // Вісник ОДАБА. – 2014. – Вип. № 55. – С. 185–197.
2. Совгира, В. В. Реологическая модель деформирования и разрушения одноосно сжатого бетона на основе полных равновесных диаграмм его упруго-пластических характеристик / В. В. Совгира // Вісник ОДАБА: збірник наукових праць. – 2016. – Вип. № 62. – С. 233–239.
3. Совгира, В. В. Полные диаграммы деформирования неоднородно сжатого бетона при внецентренном нагружении коротких бетонных колонн / В. В. Совгира, В. Н. Совгира // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. научн. трудов / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2017. – Вып. 9. – С. 436–454. <https://doi.org/10.23746/2017-9-26>.
4. Совгира, В. В. Полные диаграммы развития деструкций однородно и неоднородно сжатого бетона при осевом и внецентренном нагружении бетонных коротких колонн / В. В. Совгира, В. Н. Совгира // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. научн. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 288–311. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-18>.
5. Кобринец, В. М. Развитие деструкций внецентренно сжатого бетона на основе полных диаграмм / В. М. Кобринец, В. В. Совгира // Актуальні проблеми інженерної механіки. Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції 16–19 травня 2017 року. – Одеса: Видавництво «Екологія», 2017. – С. 132–136.
6. Берг, О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О.Я. Берг. – М.: Стройиздат, 1962. – 96 с.
7. Берлинова, М. Н. Аналитическое определение границы микро разрушений бетона с учетом условий твердения, вида напряженного состояния и усадки в защитном

- слое / М. Н. Берлинова, В. В. Бобров // Жилищное строительство. – 2014. – № 7. – С. 44–47.
8. Бобров, В. В. Микро разрушения бетона при центральном сжатии / В. В. Бобров // Архитектура и строительство. Россия. – 2009. – № 10. – С. 26–35.
 9. Гвоздев, А. А. Прочность, структурные изменения и деформации бетона / А. А. Гвоздев, А. В. Яшин, К. В. Петров и др. – М.: Стройиздат, 1978. – 299 с.
 10. Писанко, Г. Н. Влияние макроструктуры бетона на процессы деформирования и разрушения при сжатии / Г. Н. Писанко, Е. Н. Щербаков, Н. Г. Хубова // Бетон и железобетон. – 1972. – № 8. – С. 31–33.

REFERENCES

1. Mishutin A. V., Kobrinets V. M., Sovgira V. V. *Bulletin of the ODABA*. 2014. Vol. 55. pp. 185–197. (rus)
2. Sovgira V. V. *Bulletin of the ODABA: collected research papers*. 2016. Vol.62. pp. 233–239. (rus)
3. Sovgira V. V., Sovgira V. N. *Polnye diagrammy deformirovaniya neodnorodno szhatogo betona pri vnetsentrennom nagruzhenii korotkikh betonnykh kolonn* [Full deformation diagrams for non-uniformly compressed concrete in terms of eccentrically loading of short concrete columns]. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 9. 2017. pp .436–454. <https://doi.org/10.23746/2017-9-26>. (rus)
4. Sovgira V. V., Sovgira V. N. *Polnye diagrammy razvitiya destruktivnykh neodnorodno I neodnorodno szhatogo betona pri osovom i vnetsentrennom nagruzhenii betonnykh korotkikh kolonn* [Destructions Development Full Diagrams for Uniformly and Non-Uniformly Compressed Concrete in Terms of Uniaxial and Eccentric Loading of Short Concrete Columns]. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research*

- Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 11. 2019. pp. 288–311. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-18>. (rus)
5. Kobrinets V. M., Sovgira V. V. *Razvitie destruktivnykh vyzhivaniy betona na osnove polnykh diagramm* [Development of destructions of eccentrically compressed concrete on the basis of complete diagrams]. *Actual problems of engineering mechanics. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference. May 16-19, 2017*. Odessa: Publishing house “Ecology”, 2017. pp. 132–136. (rus)
 6. Berg O. Y. *Fizicheskiye osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona* [The physical foundations of the theory of concrete and reinforced concrete strength]. Moscow: Construction publishing, 1962. 96 p. (rus)
 7. Berlinova M. N., Bobrov V. V. *Housing construction*. 2014. No. 7. pp. 44–47. (rus)
 8. Bobrov V. V. *Architecture and Construction. Russia*. 2009. No. 10. pp. 26–35. (rus)
 9. Gvozdev A. A. *Prochnost, strukturnye izmeneniya i deformatsii betona* [Strength, structural changes and deformations of concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1978. 299 p. (rus)
 10. Pisanko G. N., Shcherbakov E. N., Khubova N. G. *Concrete and reinforced concrete*. 1972. No. 8. pp. 31–33. (rus)

Статья поступила: 19.06.2020

Received: 19.06.2020