

УДК 691.327:539.4

## **Механизм деформирования и усталостного разрушения бетона в условиях статических малоцикловых нагружений центральным сжатием**

**Крусь Ю.А., к.т.н.**

Национальный университет водного хозяйства и природопользования,  
Украина

**Анотація.** Проведені експериментальні дослідження роботи дрібнозернистого (цементно-піщаного) і крупнозернистого (на звичайних заповнювачах) бетонів при близьких до руйнівних високих рівнях статичних малоциклових навантажувальних центральних стиснень. Виявлений механізм деформування і втомного руйнування випробуваних бетонів в умовах зазначених силових впливів. Достовірність представлених даних і переконлива обґрунтованість зроблених висновків підтверджуються аналогічними результатами інших авторів.

**Аннотация.** Проведены экспериментальные исследования работы мелкозернистого (цементно-песчаного) и крупнозернистого (на обычных заполнителях) бетонов при близких к разрушающим высоким уровнях статических малоцикловых нагружений центральным сжатием. Выявлен механизм деформирования и усталостного разрушения испытанных бетонов в условиях указанных силовых воздействий. Достоверность представленных данных и убедительная обоснованность сделанных выводов подтверждаются аналогичными результатами других авторов.

**Abstract.** Experimental researches of work of fine-grained (cement-sandy) and coarse-grained (with ordinary fillers) concretes by high levels (near-by to destruction) of static little-cyclic loadings by central compression were conducted. The mechanism of deforming and fatigue destruction of the tested concretes in the conditions of the indicated force influences is found out. The authenticity of the presented data and convincing validity of done conclusion is confirmed by similar results of other authors.

**Ключевые слова:** бетон, малоцикловые нагрузки, малоцикловая усталость, диаграмма деформирования, деформативные параметры.

**Введение.** В практике современного строительства область применения бетона и железобетона постоянно расширяется, более ответственными становятся режимы эксплуатации конструкций. Одновременно существенно увеличивается прочность используемых материалов – бетона и арматуры, что позволяет уменьшить сечения конструктивных элементов, а следовательно – и облегчить их. Учитывая непрерывную тенденцию к снижению запасов прочности и повышению эксплуатационной надёжности конструкций, особую актуальность в научном и важность в практическом отношении приобретает необходимость всестороннего исследования поведения материалов, особенно при нестандартных режимах нагружения.

На сьогоднішній день достаточного повно розроблена і широко освітлена в літературі теорія прочності бетону при статических і динаміческих кратковременних і довгих навантаженнях [1–3]. В то же время вопросы деформирования и разрушения высоконагруженного бетона при уровнях, близких к разрушающим, в условиях статических малоцикловых нагружений остаётся недостаточно изученной для возможности её реализации в расчётной практике. И это несмотря на то, что широкий класс строительных объектов в реальных условиях эксплуатации подвержены воздействию именно малоцикловых нагрузок высокого уровня (типа сейсмических, снеговых, ледовых, ветровых, волновых, транспортных и т. п.) [4], приводящих к снижению долговечности вплоть до преждевременного и неожиданного усталостного разрушения конструкций, правильно запроектированных в соответствии с действующими нормами.

По мнению авторов [5, 6] широкому накоплению опытных данных препятствуют длительность и трудоёмкость проведения соответствующих экспериментов, а также необходимость кропотливой обработки и систематизации полученных данных с большим естественным разбросом прочностных и деформативных характеристик бетона, обладающего существенной природной неоднородностью.

**Основная часть.** В представленной работе механизм деформирования центрально сжатого бетона, а также его усталостного разрушения в условиях малоцикловых нагружений высоких уровней изучали, базируясь на собственных экспериментальных данных исследования работы призматических образцов из мелкозернистого цементно-песчаного бетона (МЗБ) и крупнозернистого бетона (КЗБ) на традиционных заполнителях (см. опытные образцы МЗБ-I,II и КЗБ-I-2 в табл. 1 публикации [7]). В обработку брали лишь те несколько образцов, результаты испытаний которых на малоцикловую усталость дают наименьшее расхождение между экспериментальными значениями относительных уровней циклической прочности и соответствующими теоретическими величинами, вычисленными по формуле (3) в публикации [7], то есть опытные точки малоциклового усталости которых наилучшим образом “ложатся” на так называемые расчётные кривые Веллера (см. табл. 2 и рис. 3 в публикации [7]). Информация о режимах испытания указанных образцов в условиях малоцикловых нагружений при стандартной скорости изменения чередующихся возрастающих и убывающих напряжений (т. е. при  $V_{\sigma} = d\sigma_b/dt = const$   $t$  на циклах загрузки-разгрузки) и экспериментальные данные о циклической долговечности исследуемых бетонов представлены в таблице.

Таблиця

**Режимы испытания опытных образцов в условиях статического малоциклового центрального сжатия и экспериментальные данные о циклической долговечности исследуемых бетонов**

Шифр опытной призмы	Режим испытания опытных образцов			Количество циклов до разрушения $n_{сус}, \text{циклы}$
	нижний уровень напряжений $\eta_b^{low}$	верхний уровень напряжений $\eta_b^{top}$	характеристика цикла напряжений $\rho_\sigma = \eta_b^{low} / \eta_b^{top}$	
Мелкозернистый цементно-песчаный бетон МЗБ				
МЗБ-46	0	0,95	0	5
МЗБ-95	0	0,96	0	6
МЗБ-54	0	0,95	0	11
МЗБ-28	0	0,94	0	13
МЗБ-32	0	0,93	0	23
МЗБ-101	0	0,91	0	54
Крупнозернистый бетон на обычных заполнителях КЗБ				
КЗБ-28	0	0,95	0	3
КЗБ-36	0	0,91	0	8
КЗБ-39	0	0,89	0	16
КЗБ-40	0	0,88	0	24
КЗБ-46	0	0,86	0	43

Как известно, нелинейные свойства бетона предполагают неповторимое очертание его диаграммы деформирования в координатных осях “напряжения  $\sigma_b$  - деформации  $\varepsilon_b$ ”. В данных исследованиях в качестве аппроксимативной принимали зависимость  $\sigma_b \sim \varepsilon_b$  в форме дробно-линейной функции [8, 9]

$$\sigma_b = \frac{R_b (\varepsilon_b / \varepsilon_{bR})}{(1 - \nu_{bR})(\varepsilon_b / \varepsilon_{bR}) + \nu_{bR}}, \quad (1)$$

приведенную к линейному уравнению связи между секущим модулем деформаций  $E'_b = \sigma_b / \varepsilon_b$  и соответствующими уровнями напряжений  $\eta_b = \sigma_b / R_b$  вида

$$E'_b = E_{b0} [1 - (1 - \nu_{bR}) \eta_b] = E_{b0} (1 - \lambda_{bR} \eta_b), \quad (2)$$

где  $R_b$  – временное сопротивление осевому сжатию бетона (призменная прочность), испытанного при стандартном “мягком” режиме нагружения;  $E_{b0}$  – модуль упругости бетона при сжатии;  $\varepsilon_{bR}$  – предельная сжимаемость бетона, отвечающая напряжениям  $R_b$ ;  $\nu_{bR}$  и  $\lambda_{bR}$  – предельные значения коэффициентов соответственно упругости и пластичности бетона при сжатии.

Преимуществами аппроксимации диаграммы деформирования аналитическим выражением (2) является, во-первых, возможность его непосредственного получения по опытным значениям  $\eta_b = \sigma_b/R_b$  и соответствующим им величинам  $E'_b = \sigma_b/\varepsilon_b$  методом наименьших квадратов в виде линейного уравнения регрессии  $E'_b = f(\eta_b)$ , в котором  $E_{b0}$  и  $\lambda_{bR}$  – постоянные коэффициенты (параметры) принятого уравнения; во-вторых – наглядность, когда  $E_{b0}$ , фиксируя начальный (при  $\sigma_b=0$ ) наклон кривой  $\sigma_b \sim \varepsilon_b$  к оси деформаций  $0-\varepsilon_b$ , характеризует начальную жёсткость (в физическом понимании – степень структурной сплошности) бетона, а коэффициент  $\lambda_{bR}$ , указывая направление выпуклости указанной кривой  $\sigma_b \sim \varepsilon_b$  в графическом толковании, определяет степень пластичности бетона  $\lambda_{bR} = \varepsilon_{b,pl;R}/\varepsilon_{bR}$  (или же степень его упругости  $\nu_{bR} = \varepsilon_{b,el;R}/\varepsilon_{bR}$ , если взять во внимание известное соотношение  $\nu_{bR} + \lambda_{bR} = 1$ ) с точки зрения физического смысла; в-третьих - корректность толкования понятия модуля упругости бетона  $E_{b0}$  как предельного значения  $E'_b$  при  $\sigma_b=0$  и высокая точность определения его истинной величины по всем точкам опытной кривой  $\sigma_b \sim \varepsilon_b$ , а не только лишь ограниченного диапазоном напряжений  $(0..0,3)R_b$ , как это регламентируется действующим стандартом на испытание; в-четвёртых - возможность аналитического определения предельных деформаций сжатия материала  $\varepsilon_{bR}$  даже без доведения его до разрушения по формуле

$$\varepsilon_{bR} = R_b/E'_{bR} = R_b/(\nu_{bR}E_{b0}) = R_b/[(1-\lambda_{bR})E_{b0}]. \quad (3)$$

Отметим, что в выполненных исследованиях учитывали “дрейф” циклических напряжений  $\sigma_{bi}$ , связанный с уменьшением от цикла к циклу прочности материала  $R_{b,cyc}$ . То есть при известной экспериментальной зависимости для определения относительной границы малоциклового усталости бетона  $\eta_{b,cyc}$  вида (см. формулу (2) и табл. 2 в публикации [7])

$$\eta_{b,cyc} = R_{b,cyc}/R_b = 1 - a(n_{cyc} - 1)/(n_{cyc} + b), \quad (4)$$

(здесь  $a$  и  $b$  - постоянные эмпирические коэффициенты) в пределах  $n$ -го цикла на  $i$ -ой ступени нагружения уровень циклического напряжения  $\eta_{bi;n}$  определяли по формуле

$$\eta_{bi;n} = \frac{\sigma_{bi}}{R_{b, \text{cyc}}} = \frac{\sigma_{bi}}{R_b \left[ 1 - a(n_{\text{cyc}} - 1) / (n_{\text{cyc}} + b) \right]} \quad (5)$$

В этой связи при известных  $R_{b, \text{cyc}}$ ,  $E_{b0;n}$  и  $\lambda_{bR;n}$  предельную сжимаемость  $\varepsilon_{bR;n}$  в рамках  $n$ -го цикла малоциклового нагружения вычисляли так:

$$\varepsilon_{bR;n} = \frac{R_{b, \text{cyc}}}{E_{b0;n} (1 - \lambda_{bR;n})} = \frac{R_b \left[ 1 - a(n_{\text{cyc}} - 1) / (n_{\text{cyc}} + b) \right]}{E_{b0;n} (1 - \lambda_{bR;n})} \quad (6)$$

Для наглядности последовательное изменение от цикла к циклу характеристик нелинейного деформирования бетона проиллюстрируем на работе призматических образцов из КЗБ и МЗБ, которые при испытании выдержали максимальное количество циклов до усталостного разрушения (соответственно  $n_{\text{cyc}} = 43$  цикла при  $\eta_b^{\text{top}} = 0,86$  для призмы КЗБ-46 и  $n_{\text{cyc}} = 54$  цикла при  $\eta_b^{\text{top}} = 0,91$  для призмы МЗБ-101; см. таблицу).

Графики диаграмм  $\sigma_b \sim \varepsilon_{b,l(tr)}$  и  $E'_{b,l(tr)} = \sigma_b / \varepsilon_{b,l(tr)} \sim \eta_b = \sigma_b / R_{b, \text{cyc}}$  продольного и поперечного деформирования КЗБ и МЗБ (для различия направлений деформирования в обозначениях применяем нижние индексы соответственно “ $l$ ” и “ $tr$ ”) в условиях малоциклового центрального сжатия представлены на рис. 1 и рис. 2. Прямые линии зависимостей  $E'_{b,l(tr)} \sim \eta_b$  построены для случаев приведения загрузочных веток кривых  $\sigma_b \sim \varepsilon_{b,l(tr)}$  к одному и тому же началу координат, исключив тем самым из учёта накопленные между отдельными циклами остаточные деформации. Кроме того, на рис. 3 и рис. 4 представлены графики изменения суммарных максимальных  $\sum \varepsilon_{b, \text{max}, l(tr); n}$  и остаточных  $\sum \varepsilon_{b, pl, l(tr); n}$  (неучтённых при оформлении рис. 1, б, г и рис. 2, б, г) деформаций, а также их межцикловых приростов соответственно  $\Delta(\sum \varepsilon_{b, \text{max}, l(tr); n})$  и  $\Delta(\sum \varepsilon_{b, pl, l(tr); n})$  при циклическом продольном и поперечном деформировании исследуемых бетонов.

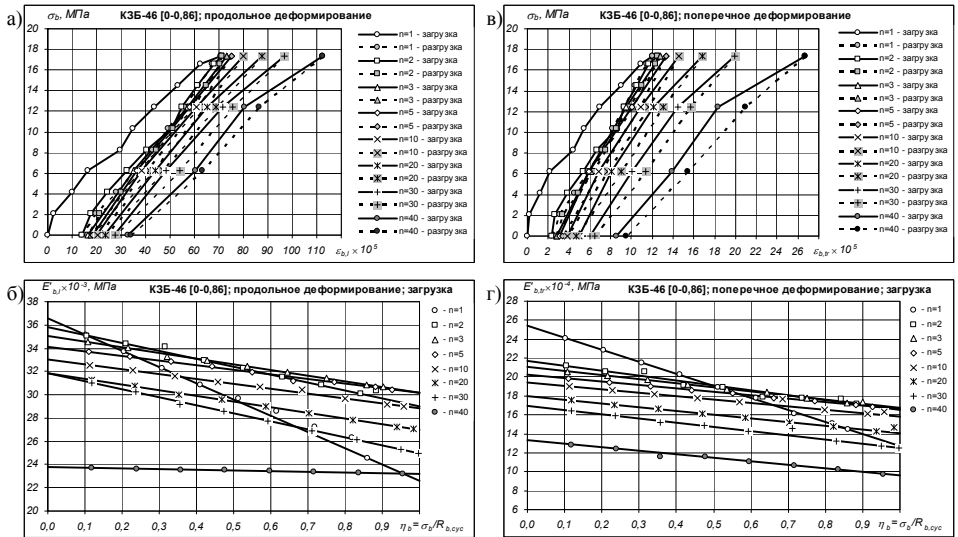


Рис. 1. Диаграммы продольного (а, б) и поперечного (в, г) деформирования крупнозернистого бетона КЗБ в координатных осях  $\sigma_b \sim \varepsilon_b$  (а, в) и  $E'_b \sim \eta_b$  (б, г) в условиях малоциклового центрального сжатия

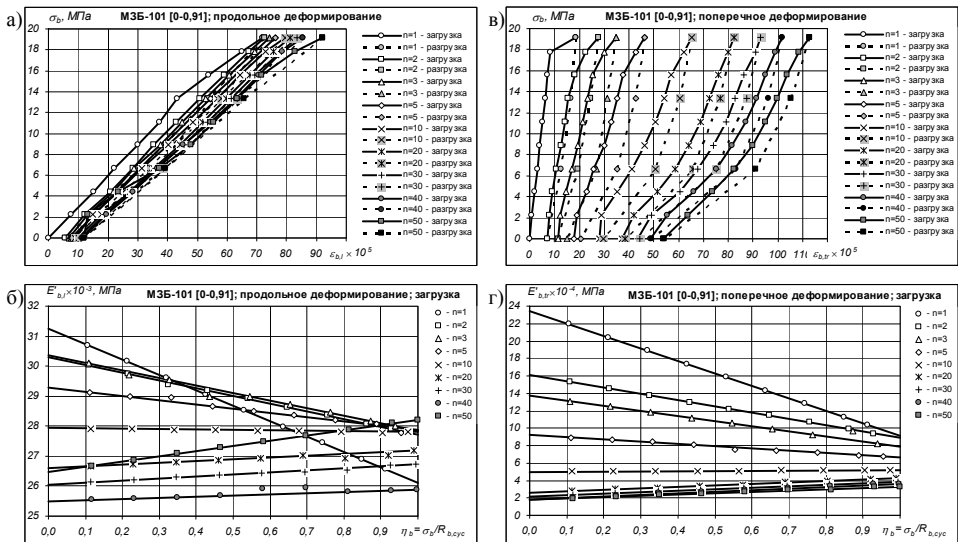


Рис. 2. Диаграммы продольного (а, б) и поперечного (в, г) деформирования мелкозернистого бетона МЗБ в координатных осях  $\sigma_b \sim \varepsilon_b$  (а, в) и  $E'_b \sim \eta_b$  (б, г) в условиях малоциклового центрального сжатия

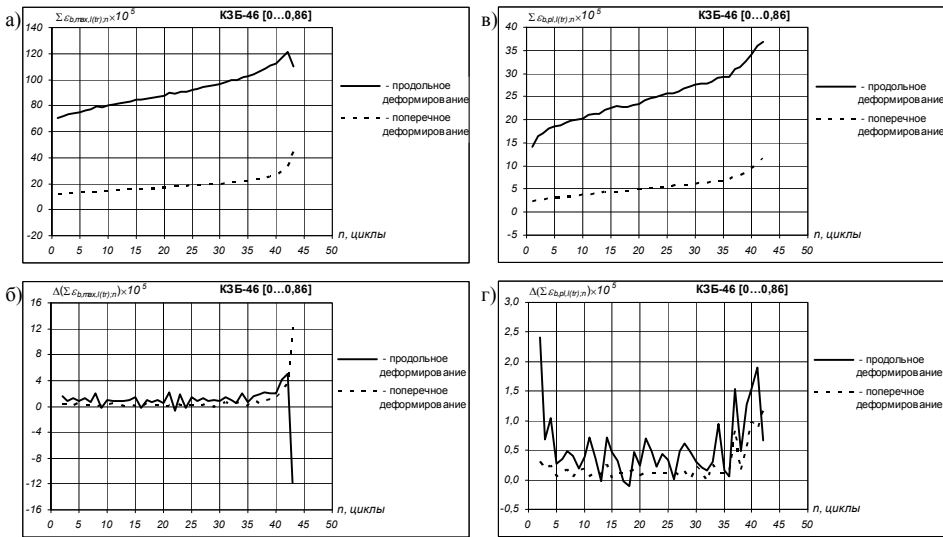


Рис. 3. Изменение суммарных максимальных  $\Sigma \epsilon_{b,max,l(tr);n}$  (а) и остаточных  $\Sigma \epsilon_{b,pl,l(tr);n}$  (в) деформаций и их межцикловых приростов соответственно  $\Delta(\Sigma \epsilon_{b,max,l(tr);n})$  (б) и  $\Delta(\Sigma \epsilon_{b,pl,l(tr);n})$  (г) при продольном и поперечном деформировании крупнозернистого бетона КЗБ в условиях малоциклового центрального сжатия

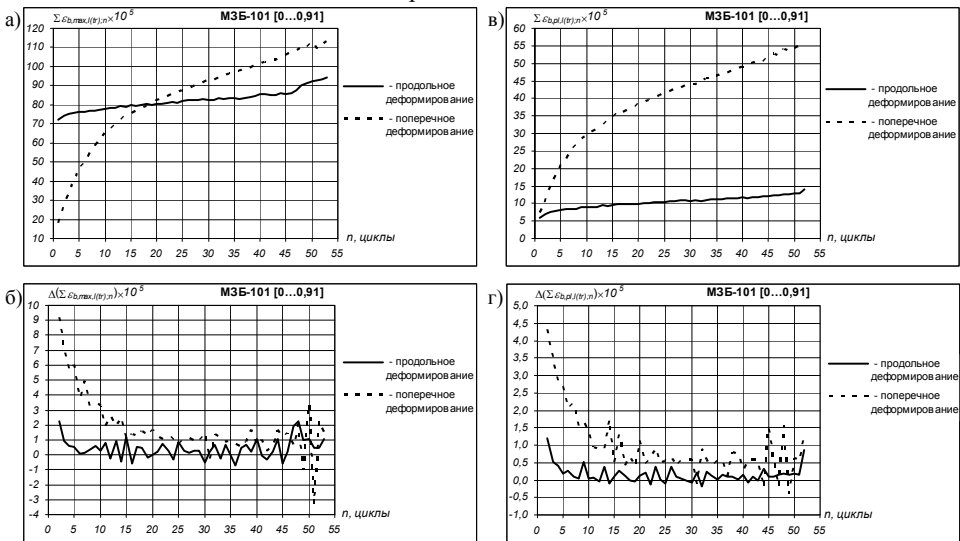


Рис. 4. Изменение суммарных максимальных  $\Sigma \epsilon_{b,max,l(tr);n}$  (а) и остаточных  $\Sigma \epsilon_{b,pl,l(tr);n}$  (в) деформаций и их межцикловых приростов соответственно  $\Delta(\Sigma \epsilon_{b,max,l(tr);n})$  (б) и  $\Delta(\Sigma \epsilon_{b,pl,l(tr);n})$  (г) при продольном и поперечном деформировании мелкозернистого бетона МЗБ в условиях малоциклового центрального сжатия

Анализ диаграмм  $\sigma_b \sim \varepsilon_{b,l(tr)}$  (рис. 1, а, в и рис. 2, а, в),  $\sum \varepsilon_{b,max,l(tr),n} \sim n$  (рис. 3, а и рис. 4, а) и  $\sum \varepsilon_{b,pl,l(tr),n} \sim n$  (рис. 3, в и рис. 4, в) позволяет отчётливо выделить три последовательных стадии деформирования бетона, а именно такие: **стадия I** уплотнения структуры, когда ширина петель пластического гистерезиса с увеличением количества повторных циклов интенсивно уменьшается; **стадия II** относительной стабилизации деформирования, которое при практическом наложении загрузочных и разгрузочных веток одна на другую характеризуется относительной неизменностью ширины петель в каждом цикле; **стадия III** разуплотнения структуры, когда при прогрессирующем росте деформаций наблюдается непрерывное увеличение ширины гистерезисных петель от цикла к циклу, завершающееся усталостным разрушением материала.

Как видим, для КЗБ стадия I длится на протяжении первых 5-ти циклов. При этом суммарные максимальные продольные сжимающие и поперечные растягивающие деформации (рис. 3, а), которые на 1-ом цикле загрузки составляли  $\sum \varepsilon_{b,max,l;n} = 70,71 \times 10^{-5}$  и  $\sum \varepsilon_{b,max,tr;n} = 12,00 \times 10^{-5}$ , к 5-му циклу возросли соответственно до  $75,26 \times 10^{-5}$  и  $13,35 \times 10^{-5}$ , т. е. в 1,06...1,11 раза. Суммарные остаточные деформации (рис. 3, в), имея после 1-го цикла загрузки-разгрузки значения  $\sum \varepsilon_{b,pl,l;n} = 14,06 \times 10^{-5}$  и  $\sum \varepsilon_{b,pl,tr;n} = 2,33 \times 10^{-5}$ , после 5-го цикла составляют соответственно  $18,49 \times 10^{-5}$  и  $3,12 \times 10^{-5}$ , увеличившись в 1,32...1,34 раза. Приросты суммарных максимальных продольных и поперечных деформаций (рис. 3, б) от величин  $\Delta(\sum \varepsilon_{b,max,l;n}) = 1,61 \times 10^{-5}$  и  $\Delta(\sum \varepsilon_{b,max,tr;n}) = 0,45 \times 10^{-5}$  после 2-го цикла уменьшаются соответственно до  $0,86 \times 10^{-5}$  и  $0,29 \times 10^{-5}$  после 5-го цикла, то есть в 1,55...1,87 раза. Приросты суммарных остаточных продольных и поперечных деформаций (рис. 3, в), составляя после 2-го цикла соответственно  $\Delta(\sum \varepsilon_{b,pl,l;n}) = 2,41 \times 10^{-5}$  и  $\Delta(\sum \varepsilon_{b,pl,tr;n}) = 0,30 \times 10^{-5}$ , после 5-го цикла приобретают значения соответственно  $0,28 \times 10^{-5}$  и  $0,06 \times 10^{-5}$ , уменьшившись в 5,00...8,61 раза.

Интенсивному накоплению остаточных деформаций на стадии I сопутствуют ярко выраженные уменьшение начальной жёсткости КЗБ, увеличение его упругих свойств и, как следствие – снижение деформируемости (см. рис. 1, б и рис. 1, г). Так, модули упругости бетона при его продольном и поперечном деформированиях, которые на 1-ом цикле имеют значения  $E_{b0,l} = 36,61 \times 10^3$  и  $E_{b0,tr} = 24,41 \times 10^4$  МПа, к 5-му циклу уменьшаются соответственно до  $34,17 \times 10^3$  и  $20,25 \times 10^4$  МПа (снизились в 1,07...1,21 раза); предельные коэффициенты пластичности, будучи в исходном состоянии на 1-ом цикле  $\lambda_{bR,l} = 0,382$  и  $\lambda_{bR,tr} = 0,500$ ,



приобретают значения соответственно 0,117 и 0,179 на 5-ом цикле (уменьшились в 2,79...3,26 раза); величины предельной деформируемости (для продольного деформирования - сжимаемости, а для поперечного - растяжимости) за это же количество циклов повторения нагрузок уменьшаются от  $\varepsilon_{bR,l}=89,27 \times 10^{-5}$  и  $\varepsilon_{bR,tr}=15,89 \times 10^{-5}$  соответственно до  $62,23 \times 10^{-5}$  и  $11,30 \times 10^{-5}$  (снизились в 1,41...1,44 раза). На протяжении всей I-ой стадии и при продольном, и при поперечном деформировании кривые загрузочных веток диаграмм  $\sigma_b \sim \varepsilon_{b,l(tr)}$  обращены к вертикальной оси напряжений, разгрузочных - к горизонтальной оси деформаций (см. рис. 1, а и рис. 1, в соответственно для продольного и поперечного деформирования).

С физической точки зрения указанные тенденции, а также идентичность изменений при продольном и поперечном деформировании свидетельствуют о том, что присущее стадии I уплотнение структуры обусловлено интенсивным “выбором” пластической части деформаций растворной составляющей бетона и образованием в его теле локальных микроразрушений над и под полюсами гранул крупного заполнителя. Скорее всего в это же время в КЗБ зарождаются и микротрещины отслоения растворной части от боковой поверхности заполнителя, которые сориентированы вдоль внешнего силового воздействия при загрузке и перпендикулярно к указанному направлению - при разгрузке, создавая начальное разрыхление структуры бетона и подготавливая развитие микротрещин в материале. Однако похоже, что в стадии I последние процессы не являются преобладающими.

Процессы, происходящие между 5-ым и 36-ым циклами повторных нагружений, можно охарактеризовать как пребывание КЗБ в стадии II – относительной стабилизации пластического деформирования. Тут наблюдаем более интенсивный рост суммарных максимальных продольных деформаций и малозаметное увеличение суммарных максимальных поперечных деформаций (рис. 3, а) от величин  $\sum \varepsilon_{b,max,l;n}=75,26 \times 10^{-5}$  и  $\sum \varepsilon_{b,max,tr;n}=13,35 \times 10^{-5}$  на 5-ом цикле загрузки соответственно до  $104,35 \times 10^{-5}$  и  $23,19 \times 10^{-5}$  на 36-ом цикле, т. е. в 1,39...1,74 раза. С абсолютно аналогичной тенденцией изменяются суммарные остаточные продольные и поперечные деформации (рис. 3, в), возрастая от  $\sum \varepsilon_{b,pl,l;n}=18,49 \times 10^{-5}$  и  $\sum \varepsilon_{b,pl,tr;n}=3,12 \times 10^{-5}$  после 5-ти циклов загрузки-разгрузки соответственно до  $29,37 \times 10^{-5}$  и  $6,96 \times 10^{-5}$  после 36-ти циклов, т. е. в 1,59...2,23 раза. При устойчивом практически прямолинейном росте суммарных максимальных (рис. 3, а) и остаточных (рис. 3, в) деформаций характер изменения их приростов в большей степени соответствует случайному колебательному процессу. При этом

приросты суммарных максимальных продольных и поперечных деформаций изменяются в достаточно узких границах  $\Delta(\sum \varepsilon_{b,max,l;n}) = (-0,74...2,25) \times 10^{-5}$  и  $\Delta(\sum \varepsilon_{b,max,tr;n}) = (-0,08...0,98) \times 10^{-5}$  вокруг средних значений соответственно  $0,94 \times 10^{-5}$  и  $0,32 \times 10^{-5}$  (рис. 3, б), а приросты суммарных остаточных продольных и поперечных деформаций варьируют в значительно меньших диапазонах  $\Delta(\sum \varepsilon_{b,pl,l;n}) = (-0,10...0,94) \times 10^{-5}$  и  $\Delta(\sum \varepsilon_{b,pl,tr;n}) = (-0,02...0,26) \times 10^{-5}$  около соответствующих средних величин  $0,35 \times 10^{-5}$  и  $0,12 \times 10^{-5}$  (рис. 3, г). Очевидно, вследствие указанных небольших колебаний происходит медленное и относительно стабильное уплотнение структуры бетона. Такой процесс по своим последствиям можно приравнять к “слеживаемости” сыпучих материалов под воздействием вибраций или же к “наклёпу” металлов.

Стадию II условной стабилизации отличает устойчивость изменения основных упруго-пластических характеристик КЗБ, о чём свидетельствует высокая кучность расположения графиков поцикловых диаграмм его деформирования в координатных осях  $E'_{b,l(tr)} - \eta_b$  (см. рис. 1, б и рис. 1, г). При этом значения модулей упругости, сохраняя присущий стадии I характер изменения, со значительно меньшей интенсивностью уменьшаются от  $E_{b0,l} = 33,86 \times 10^3$  и  $E_{b0,tr} = 20,07 \times 10^4$  МПа соответственно до  $31,70 \times 10^3$  и  $17,26 \times 10^4$  МПа (снизились в 1,07...1,16 раза); величины предельных коэффициентов пластичности, имея до этого тенденцию к уменьшению с убывающей интенсивностью, начинают расти, правда в значительно меньшей степени, от  $\lambda_{bR,l} = 0,123$  и  $\lambda_{bR,tr} = 0,189$  соответственно до 0,255 и 0,350 (увеличились в 1,85...2,07 раза); величины предельной сжимаемости, интенсивно падая во время I-ой стадии деформирования, изменяют тенденцию, засвидетельствовав некоторый рост от  $\varepsilon_{bR,l} = 62,64 \times 10^{-5}$  и  $\varepsilon_{bR,tr} = 11,42 \times 10^{-5}$  соответственно до  $73,59 \times 10^{-5}$  и  $15,50 \times 10^{-5}$  (выросли в 1,17...1,36 раза).

На протяжении большей части стадии II кривизна гистерезисных петель при их минимальной ширине почти отсутствует (рис. 1, а, в), свидетельствуя о приостановке прироста пластических деформаций и приближении к упругой работы КЗБ. Лишь в конце II-ой стадии наблюдаем несколько большее обычного присущее ей повышение приростов суммарных деформаций  $\Delta(\sum \varepsilon_{b,max,l(tr);n})$  при максимальных напряжениях цикла (рис. 3, б), что, адекватно влияя на прирост суммарных остаточных деформаций  $\Delta(\sum \varepsilon_{b,pl,l(tr);n})$  (рис. 3, г), вызывает некоторое увеличение ширины петель гистерезиса. Причём в то время,

когда загрузочные ветки диаграмм  $\sigma_b \sim \varepsilon_{b,l(tr)}$  приобретают малозаметное S-подобное очертание с незначительным выгибом к оси деформаций на начальных ступенях загрузки и дальнейшим изменением кривизны выпуклостью к оси напряжений при более высоком уровне нагрузки, разгрузочные ветки сохраняют практически прямолинейную форму.

Выявленные признаки дают основания полагать, что основным физическим процессом во время деформирования КЗБ на стадии II является внутреннее перераспределение усилий в зоне их концентрации и выравнивание поля напряжений между структурными компонентами бетона (растворной цементно-песчаной матрицей и крупным заполнителем) преимущественно за счёт развития микротрещин отрыва, первоначально образовавшихся на предыдущей стадии. Непериодичность колебаний величин  $\Delta(\sum \varepsilon_{b,pl,l(tr);n})$  (рис. 3, г) указывает на то, что распространение этих трещин может временно задерживаться недонапряжёнными областями материала.

Особого внимания заслуживает важное обстоятельство, которое характеризует завершающие циклы II-ой стадии деформирования - обращение загрузочных веток кривых  $\sigma_b \sim \varepsilon_{b,l(tr)}$  на начальных ступенях силового воздействия выпуклостью к оси деформаций (рис. 1, а, в). Причиной такого искривления является развитие при предшествующей разгрузке образца перпендикулярных к направлению сжимающей силы так называемых “разгрузочных” микротрещин, зарождённых еще во время стадии I, по контактной зоне растворной матрицы и крупных заполнителей над и под полюсами последних из-за значительных растягивающих контактных напряжений во время перераспределения усилий между необратимо пластически деформируемой матрицей и упруго работающими заполнителями. Как следствие, при последующей отнулевой загрузке до закрытия указанных микротрещин бетон работает неполным сечением. С увеличением сжимающей силы разгрузочные микротрещины постепенно закрываются, жёсткость бетона возрастает, сечение образца начинает работать всей плоскостью, на что указывает изменение направления выпуклости кривой  $\sigma_b \sim \varepsilon_{b,l(tr)}$  к оси напряжений при более высоких уровнях нагрузки. Всё это свидетельствует о том, что при малоцикловых воздействиях накопление необратимых повреждений происходит в материале как при загрузке, так и при его разгрузке.

Итак, в стадию III бетон входит как разрыхленный по всем направлениям материал, пронизанный развитыми продольными и поперечными микротрещинами. На протяжении последних шести циклов повторных нагружений (с 36-го до предшествующего разрушению 42-го цикла)

наблюдаем прогрессирующий рост суммарных максимальных продольных сжимающих и поперечных растягивающих деформаций (рис. 3, а) от величин  $\sum \varepsilon_{b,max,l;n} = 106,19 \times 10^{-5}$  и  $\sum \varepsilon_{b,max,tr;n} = 23,64 \times 10^{-5}$  на 37-ом цикле соответственно до  $121,66 \times 10^{-5}$  и  $32,62 \times 10^{-5}$  на 42-ом цикле, то есть в 1,15...1,38 раза. В это же время, аналогично прогрессируя, увеличиваются суммарные остаточные деформации (рис. 3, в) от  $\sum \varepsilon_{b,pl,l;n} = 30,90 \times 10^{-5}$  и  $\sum \varepsilon_{b,pl,tr;n} = 7,80 \times 10^{-5}$  соответственно до  $36,76 \times 10^{-5}$  и  $11,55 \times 10^{-5}$ , т. е. в 1,19...1,48 раза. Как видим из рис. 3, а, в, в целом по отношению к 1-му циклу суммарные деформации  $\sum \varepsilon_{b,max,l(tr);n}$  и  $\sum \varepsilon_{b,pl,l(tr);n}$  на последнем перед разрушением 42-ом цикле возросли соответственно в 1,72...2,72 и 2,61...4,96 раза. Заметное неравномерно ускоренное увеличение приростов суммарных максимальных деформаций (рис. 3, б) от  $\Delta(\sum \varepsilon_{b,max,l;n}) = 1,84 \times 10^{-5}$  и  $\Delta(\sum \varepsilon_{b,max,tr;n}) = 0,45 \times 10^{-5}$  на 36-ом цикле соответственно до  $5,02 \times 10^{-5}$  и  $3,55 \times 10^{-5}$  на 42-ом цикле (возросли в 2,73...7,89 раза), а также значительное расширение диапазонов колебаний приростов суммарных остаточных деформаций (рис. 3, г) по сравнению с аналогичными изменениями во время предыдущей II-ой стадии соответственно до  $\Delta(\sum \varepsilon_{b,pl,l;n}) = (0,49...1...1,90) \times 10^5$  и  $\Delta(\sum \varepsilon_{b,pl,tr;n}) = (0,16...0...0,98) \times 10^5$  указывает на всестороннее саморазвитое “расшатывание” структуры и её разуплотнение, причём преимущественно за счёт всестороннего образования и развития микротрещин, о чём ярко свидетельствует значительно более интенсивные изменения параметров КЗБ при его деформировании в поперечном направлении.

Из-за нестабильного состояния бетона на завершающей III-ей стадии работы не представляется возможным анализировать поцикловые изменения параметров  $E_{b0,l(tr)}$ ;  $\lambda_{bR,l(tr)}$  и  $\varepsilon_{bR,l(tr)}$ . Вместе с тем, очевидно, что происходит интенсивный самоускоренный процесс объединения развитых микротрещин в более или менее протяжённые видимые на глаз поверхностные макротрещины, из которых после их значительного раскрытия формируются магистральные трещины, вызывающие быстрое усталостное разрушение разрыхленной структуры образца разделением его на отдельные части. Об этом свидетельствует непрерывное увеличение ширины гистерезисных петель от цикла к циклу и характер искривления диаграмм  $\sigma_b \sim \varepsilon_{b,l(tr)}$  (рис. 1, а, в), приобретающих ярко выраженную S-подобную форму.

Как и в случае однократного статического сжатия (рис. 5, а) исследуемый образец разрушается по несколько отклонённой от продольной оси наклонной плоскости с его разделением сквозной трещиной на два почти одинаковых блока (рис. 5, б, в). Однако, в отличие от однократного нагружения усталостное разрушение бетона после малоцикловых воздействий имеет хрупкий взрывоподобный сопровождающийся громким звуковым эффектом характер с вовлечением в разрушительный процесс отчётливо визуально наблюдаемого значительно большего объёма накопленных повреждений в виде крупных трещин и выколов.

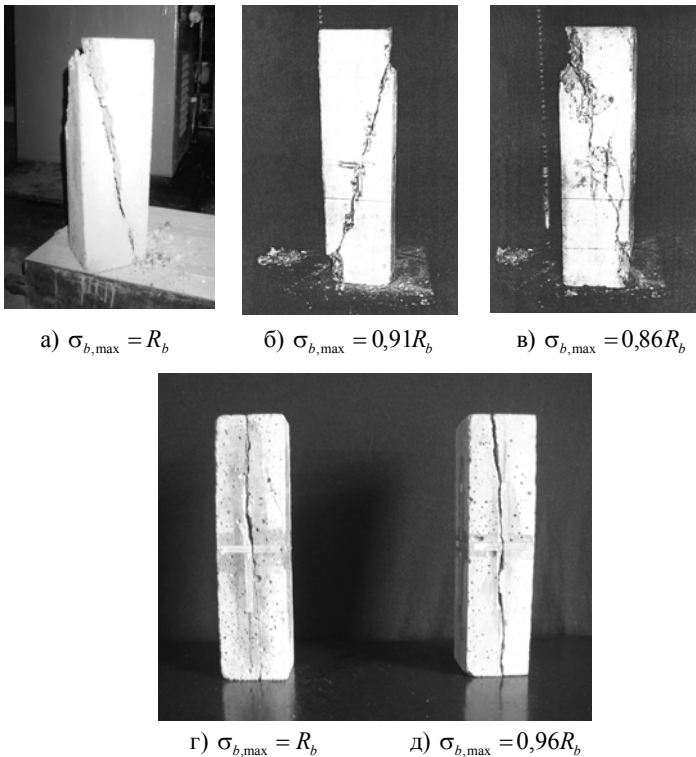


Рис. 5. Характер разрушения опытных призмных образцов из крупнозернистого КЗБ (а, б, в) и мелкозернистого МЗБ (г, д) бетонов в условиях монотонного однократного (а, г) и малоциклового (б, в, д) центрального сжатия

Вышеизложенные результаты собственного комплексного исследования работы КЗБ в продольном и поперечном направлениях, а также экспериментальный опыт и выводы других авторов [10–12], занимающихся вопросами сопротивления деформированию и разрушению материалов, позволяют схематизировать последовательные стадии зарождения, образования и развития трещин в КЗБ в условиях его малоциклового центрального сжатия вплоть до разрушения (рис. 6).

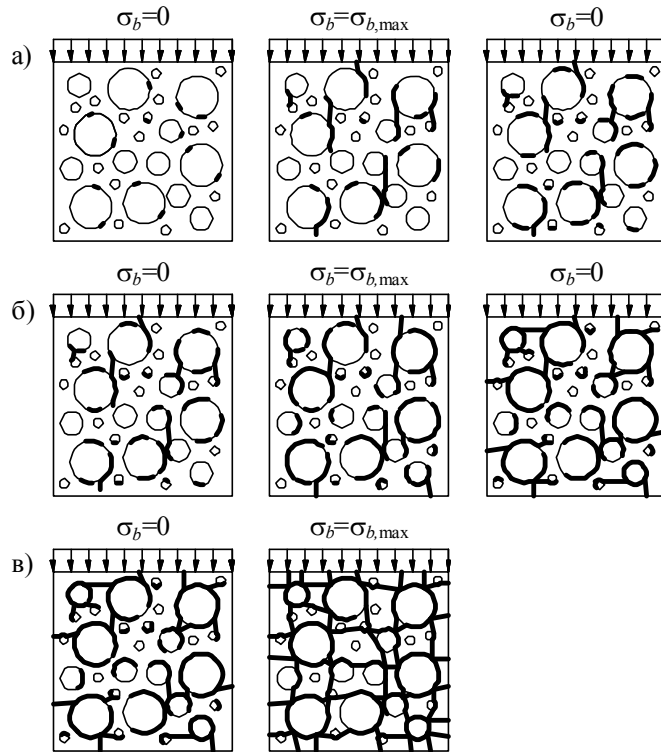


Рис. 6. Схема последовательных стадий образования и развития трещин в крупнозернистом бетоне КЗБ в условиях малоциклового центрального сжатия: а) стадия I уплотнения структуры; б) стадия II относительной стабилизации деформирования; в) стадия III разуплотнения структуры с последующим усталостным разрушением

Тенденции изменения параметров деформирования МЗБ во многом схожи с теми, что выявлены для КЗБ. В отличие от однократного монотонного сжатия, когда призмный образец из МЗБ разрушается вследствие сопровождающегося характерным едва слышимым щелчком (звуком растрескивания) его хрупкого разделения сквозными вертикальными трещинами на 2 (иногда 4) практически одинаковых призматических блока (рис. 5, г), усталостное разрушение бетона после малоцикловых воздействий имеет громкий взрывоподобный и хрупкий характер, а от МЗБ в большинстве случаев остаётся лишь небольшая кучка мелких обломков полностью разрушенного материала. Вид разрушенного образца из МЗБ, представленный на рис. 5, д, характерен для максимально высоких переменных напряжений циклов, когда стадия II устойчивого деформирования бетона очень непродолжительна или вообще отсутствует.

Если рассматривать на уровне макроструктуры КЗБ как компонентную систему “крупный заполнитель (щебень) - цементно-песчаный раствор”, а МЗБ как систему “мелкий заполнитель (песок) - цементный камень”, то несомненно, что в обоих случаях основными структурными неоднородностями (а, следовательно, и основными локальными концентраторами напряжений) являются включения в виде зёрен заполнителей. Учитывая высокую прочность составляющих компонентов КЗБ и МЗБ, наиболее слабым звеном оказывается зона их контакта, откуда при нагружениях и берёт начало разрушительный процесс. Поэтому очевидно, что проиллюстрированная на рис. 6 схема стадий зарождения, образования и развития трещин в КЗБ при испытании в условиях малоциклового центрального сжатия аналогично реализуется и в МЗБ. Имеющиеся отличия могут быть объяснены лишь неодинаковой удельной насыщенностью заполнителями бетонных матриц КЗБ и МЗБ. Указанная насыщенность, будучи более высокой для МЗБ и предопределяя большую площадь контактной поверхности, обуславливает некоторые особенности его деформирования, что и зафиксировано в экспериментах. Во-первых: на протяжении всех 3-ёх стадий деформирования в значительно большей степени работу МЗБ определяет всестороннее образование и развитие структурных микротрещин, в меньшей степени – пластическое деформирование цементного камня. Это заметно отличает МЗБ от КЗБ, для которого последнее обстоятельство является преобладающим во время деформирования на стадиях I и II. Во-вторых: МЗБ как материал более однородный, упругий и хрупкий (по сравнению с КЗБ) проявляет повышенную чувствительность к структурным дефектам. Даже незначительное структурное повреждение (образование новой микротрещины или даже малозаметное развитие уже существующей микротрещины) может качественно изменить состояние МЗБ и стать причиной неожиданного его перехода, к примеру, из стадии II относительно стабильного деформирования в III-ю стадию мгновенного усталостного разрушения. И это возможно в то время, когда аналогичные процессы в КЗБ проходят более плавно и прогнозировано.

Итак, результаты обработки всех экспериментальных данных относительно работы крупнозернистого КЗБ и мелкозернистого МЗБ бетонов свидетельствуют, что трёхстадийность является общим случаем деформирования бетона в условиях малоциклового нагружения, причём продолжительность каждой из стадий зависит, главным образом, от верхнего (максимального) уровня повторного напряжения цикла  $\eta_b^{top} = \eta_{b,max}$ . Так, работе КЗБ при  $\eta_b^{top} = 0,86...0,91$  и фиксированной величине  $\rho_\sigma = 0$  (см. таблицу) присуще полностадийное деформирование. Стадия I при этом проходит за 3...5 циклов, II-ая стадия длится на

протяженні 3...31 цикла, стадія III проходить за 2...7 циклів (рис. 7, а).  
Зато в призме, испытанной при наивысшем верхнем уровне напряжения  $\eta_b^{top}=0,95$ , этап стабилизации (стадия II) вообще отсутствует, и после 1-го цикла уплотнения материала (стадия I) за последующие два неполных цикла нагружения наступает его усталостное разрушение (III-я стадия).

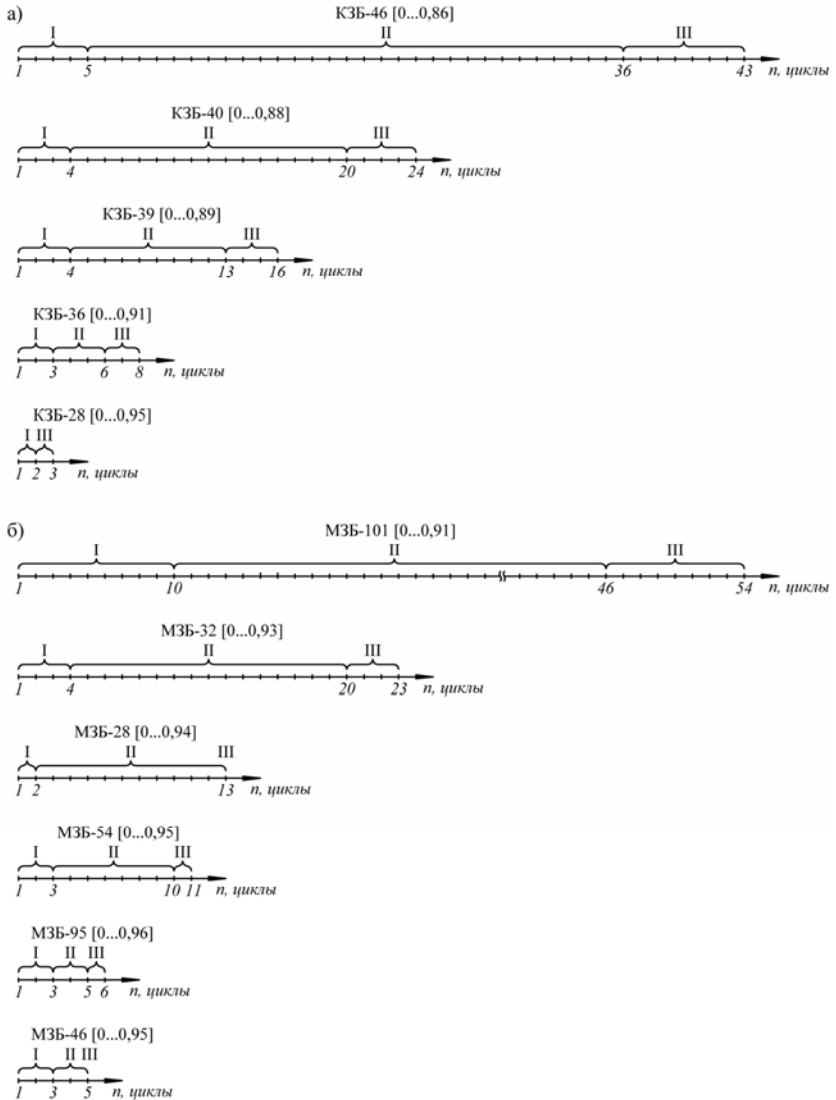


Рис. 7. Продолжительность отдельных стадий (I, II и III) деформирования крупнозернистого КЗБ (а) и мелкозернистого МЗБ (б) бетонов в зависимости от режима их испытания в условиях малоциклового центрального сжатия до усталостного разрушения



Все призмы из МЗБ, испытанные при  $\eta_b^{top}=0,91...0,96$  и неизменной характеристике цикла напряжений  $\rho_\sigma=0$ , проходят полностью все три стадии деформирования (рис. 7, б). Стадия I при этом длится 2...4 цикла, II-ая стадия – 2...16 циклов, стадия III – 1...8 циклов. Лишь в одном случае призма из МЗБ, подверженная максимальному переменному напряжению цикла с уровнем  $\eta_b^{top}=0,95$ , после характерного достаточно устойчивого деформирования в стадии II неожиданно мгновенно разрушается, свидетельствуя о наступлении III-ей стадии. Отметим, что в большинстве случаев и для КЗБ, и для МЗБ стадия II условной стабилизации деформирования, если она имеет место, является наиболее протяжённой.

### **Выводы**

Во многом аналогичные результаты, полученные в исследованиях и других авторов-циклистов [5, 6, 13, 14], подтверждают достоверность приведенных в этой статье данных и достаточно убедительную обоснованность сформулированных на их базе представлений о механизме деформирования и усталостного разрушения бетона в условиях статических малоцикловых нагружений центральным сжатием. Продемонстрированные результаты могут быть использованы при математическом моделировании работы бетонных и железобетонных конструкций, подверженных непредвиденному малоповторному воздействию близких к разрушающим высокоуровневым нагрузкам.

### **Литература**

- [1] Бондаренко В. М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона / В. М. Бондаренко, С. В. Бондаренко. – М. : Стройиздат, 1982. – 287 с.
- [2] Кириллов А. П. Выносливость гидротехнического железобетона / А. П. Кириллов. – М. : Энергия, 1978. – 272 с.
- [3] Попов Н. Н. Расчёт конструкций на динамические и специальные нагрузки: учеб. пособие для вузов по спец. “Пром. и гражд. стр-во” / Н. Н. Попов, Б. С. Расторгуев, А. В. Забегаев. – М. : Высш. школа, 1992. – 319 с.
- [4] Крусъ Ю. О. Малоциклові навантаження в комплексі впливів на будівельні конструкції, будівлі та споруди / Ю. О. Крусъ // Дороги і мости: зб. наук. праць ДерждорНДІ ім. М. П. Шульгіна. У 2-х томах : Т. I. – Київ, 2007. – Вип. 7. – С. 323–343.
- [5] Барашиков А. Я. Малоцикловая усталость бетона при сжатии / А. Я. Барашиков, Б. Н. Шевченко, А. И. Валовой // Бетон и железобетон. – 1985. – № 4. – С. 27–28.

- [6] Маилян Л. Р. Разработка методов системного комплексного расчёта железобетонных статически неопределимых балок с учётом полных диаграмм деформирования материалов, сечений и конструкций на статические, повторные и динамические воздействия: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Л. Р. Маилян. – М., 1989. – 584 с.
- [7] Крусь Ю. А. Малоцикловая усталость бетона при сжатии и растяжении в феноменологической постановке / Ю. А. Крусь // Бетон и железобетон в Украине. – 2009. – № 3 (49). – С. 8–17.
- [8] Крусь Ю. О. Моделювання зв'язку між напруженнями і деформаціями центрально стисненого бетону при різних режимах його навантажування / Ю. О. Крусь, О. Ю. Крусь // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне : Вид-во НУВГП, 2012. – Вип. 23. – С. 285–292.
- [9] Крусь Ю. А. Энергетический метод определения предельной сжимаемости бетона / Ю. А. Крусь, А. Ю. Крусь // Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб. – Київ : ДП НДІБК, 2013. – Вип. 78. Кн. 2. – С. 22–33.
- [10] Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. - М. : Госстройиздат, 1961. – 96 с.
- [11] Зайцев Ю. В. Механика разрушения для строителей: учеб. пособие для строит. вузов / Ю. В. Зайцев. – М.: Высш. шк., 1991. – 288 с.
- [12] Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – М. : Стройиздат, 1996. – 412 с.
- [13] Кузовчикова Е. А. Исследование влияния малоцикловых сжимающих воздействий на деформативность, прочность и структурные изменения бетона / Е. А. Кузовчикова, А. В. Яшин // Изв. вузов. Серия : Строительство и архитектура. – 1976. – № 10. – С. 30–35.
- [14] Ставров Г. Н. Прочность и деформативность бетона при повторно статических нагружениях / Г. Н. Ставров, В. В. Руденко, А. А. Федосеев // Бетон и железобетон. – 1985. – № 1. – С. 33–34.

*Надійшла до редакції 26.02.2016 р.*