

УДК 624.04

Ерышев В.А. – доктор технических наук, профессор

E-mail: gsx@tltsu.ru

Латышева Е.В. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: p-tata@mail.ru

Ключников С.В. – магистр

Седина Н.С. – магистр

Тольяттинский государственный университет

Адрес организации: 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14

## К построению диаграмм циклического нагружения бетона при одноосном сжатии

### Аннотация

В настоящей работе в рамках кратковременных моделей деформирования бетона предлагается методика описания диаграмм циклического нагружения бетона напряжениями сжатия. Рассматривается два типа режимных диаграмм малоциклового нагружения: с непрерывными изменяющимися от цикла к циклу уровнями напряжений и с постоянными уровнями напряжений при полной разгрузке. Методика строится с учетом общих закономерностей деформирования бетона при повторных нагрузках, которые отмечаются в экспериментальных исследованиях многих авторов.

**Ключевые слова:** диаграммы циклического нагружения, напряжения, деформация, огибающая кривая, предел общих точек.

Диаграммы деформирования бетона, связывающие относительные деформации с напряжениями « $\varepsilon_b - \sigma_b$ » при циклических нагружениях напряжениями сжатия и растяжения, привлекают к себе внимание исследователей, особенно в последнее время. Они важны как с точки зрения непосредственного применения в расчетах бетонных и железобетонных конструкций (в основном стержневых), так и построения более общих моделей деформирования бетона при повторных нагрузках, когда временная нагрузка периодически снимается и прикладывается вновь через определенный промежуток времени. Кроме того, моделирование поведения конструкций с учетом действия нагрузок, изменяющихся по некоторым циклическим закономерностям, является первым и необходимым шагом на пути перехода к расчетам конструкций на динамические, в том числе сейсмические нагрузки, с учетом физической нелинейности и трещинообразования.

В настоящей работе предлагается модель описания диаграмм циклического нагружения бетона « $\varepsilon_b - \sigma_b$ » напряжениями сжатия, базой построения которой служат результаты исследований диаграмм при кратковременных испытаниях бетонных элементов (нагружение статической нагрузкой ступенями в пределах 60 мин при одноосном сжатии до вершины диаграммы и столько же при полной разгрузке). Такие диаграммы в работе [1] приняты за некоторые исходные диаграммы (рис. 1а). Отдельные параметры диаграмм циклического нагружения с накоплением опытных данных могут уточняться с учетом режима изменения скорости роста напряжений и деформаций в процессе испытания опытных образцов. Однако в кратковременных моделях диаграмм время действия напряжений в явном виде не вводится, а нелинейные свойства бетона в связях « $\varepsilon_b - \sigma_b$ » устанавливаются с помощью коэффициента упругости  $\nu_b$ . При центральном сжатии диаграмма деформирования бетона в рамках этой модели представляется в виде:

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_b \nu_b}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_b, \sigma_b, E_b$  – соответственно, относительные деформации, напряжения, модуль упругости бетона;  $E_b \nu_b = E_c$  – секущий модуль.

Линейные диаграммы состояния бетона (трехлинейные и двухлинейные) предполагают, что ветви разгрузок и повторных нагрузок совпадают и находятся на одной прямой линии. Кратковременная модель и методика вычисления коэффициента упругости  $\nu_b$ , в редакции [1], в том числе при циклических нагрузках, позволяет сохранить не только методическое единство, но и учесть общие характерные особенности деформирования

бетона, наблюдаемые в экспериментах, а именно: накопление остаточных деформаций с ростом числа циклов; изменение кривизны диаграммы на отрезках (ветвях) повторных нагружений (от выпуклости к оси деформаций на низких уровнях напряжений до выпуклости к оси напряжений с их увеличением); сохранение односторонней выпуклости на ветвях разгрузки в сторону оси деформаций; влияние циклического нагружения на прочность бетона как в сторону увеличения после циклического нагружения до средних уровней напряжений, так и снижения после высоких уровней.

Рассматривается двухветвевая диаграмма деформирования бетона при сжатии (эталонная [1]), которая строится при режиме испытаний с постоянными скоростями роста деформации (рис. 1а). Исходными параметрами для ее построения в рамках кратковременной модели являются:  $\hat{\sigma}_b$  – предельные напряжения в вершине диаграммы;  $\hat{\epsilon}_b$  – деформации в вершине диаграммы;  $E_b$  – модуль упругости бетона. Нисходящая ветвь ограничивается уровнем напряжений  $\sigma_{bn} = 0,6\hat{\sigma}_b$  и максимальными деформациями  $\epsilon_{bn}$ . Принимается, что после этого уровня напряжений нисходящая ветвь представляет ветвь деформирования отдельных частей раздробленного бетона. Можно допустить, что ветви диаграммы ограничивают область режимных диаграмм, изменяющихся по некоторым циклическим закономерностям с разрушением на нисходящей ветви. Однако экспериментальные исследования при циклических нагружениях свидетельствуют, что вблизи вершины диаграммы и особенно на нисходящей ветви процесс образования и развития микротрещин более значителен, на что оказывают влияние и предшествующие циклы нагружения.

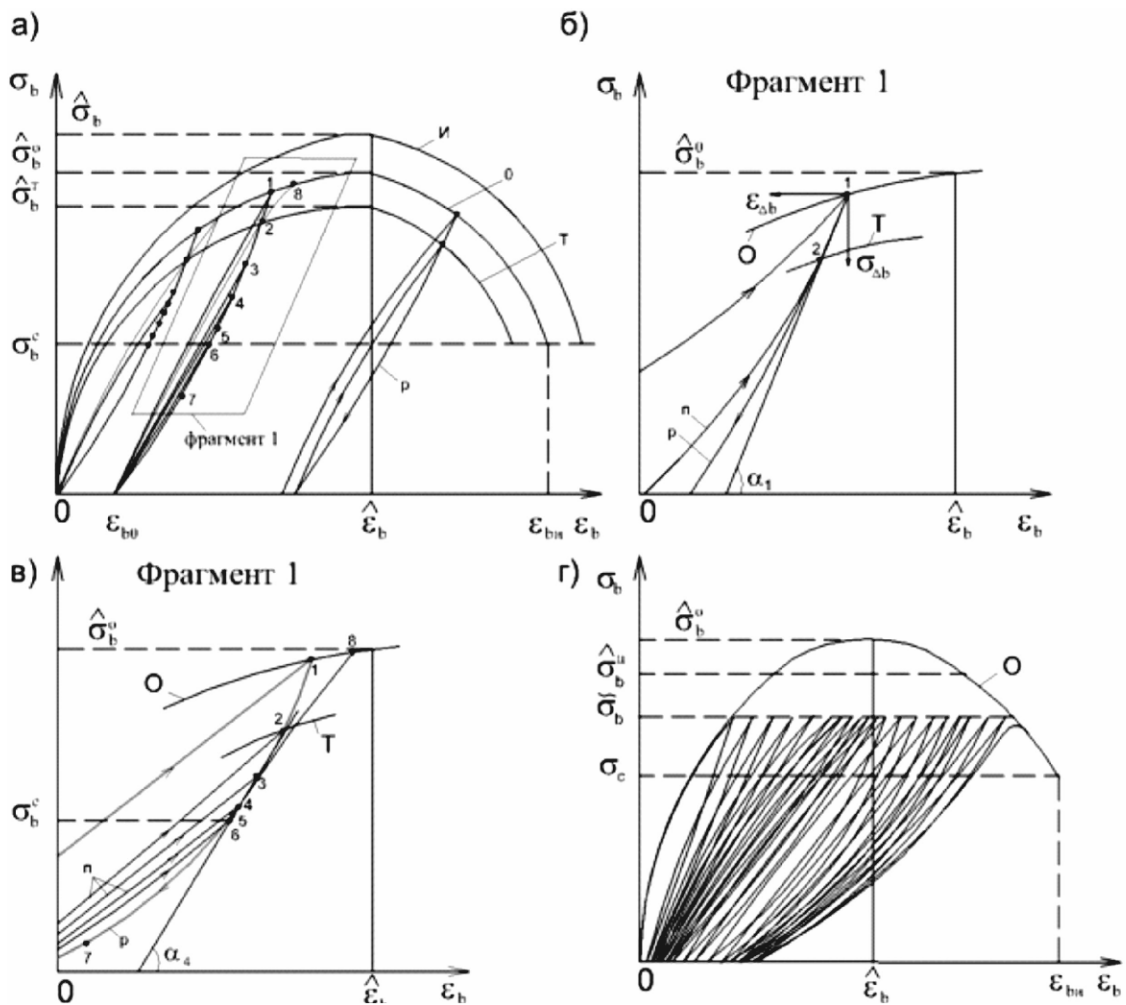


Рис. 1. К построению диаграмм деформирования бетона при циклических нагружениях напряжениями сжатия; И – исходная диаграмма статического напряжения бетона на сжатие; О – обобщенная огибающая кривая; Т – кривая предела общих точек; р – ветви разгрузки; п – ветви повторных нагружений

Многие зарубежные авторы (Sinha, Horishima, Karsan, Tanigawa и другие) единодушно утверждают, что независимо от истории нагружения, существует некоторая обобщенная огибающая кривая, которая связывает начальные точки кривых разгрузки и концы кривых повторного нагружения диаграммы « $\varepsilon_{bu} - \sigma_{bu}$ » и по форме соответствует монотонной диаграмме статического нагружения, однако уменьшаются напряжения в вершине диаграммы  $\hat{\sigma}_b^0$ , а нисходящая ветвь становится значительно круче и  $\varepsilon_{bu}$  уменьшаются (по некоторым данным  $\hat{\sigma}_b^0 = (0,85 \div 0,9)\hat{\sigma}_b$ ;  $\varepsilon_{bu} = 1,5\varepsilon_b$ ). Утверждение не соответствует опытным данным об упрочнении бетона после циклических нагрузок на низких уровнях напряжений, однако при описании реального деформирования «волокон» бетона в конструкциях с учетом нарушения структуры ближе к поверхности, усадке бетона и т.д. огибающую кривую можно использовать в расчетах, а эффект упрочнения учитывать дополнительно. Связь между напряжениями и деформациями при этом представляется в виде (1), корректируется в редакции [1] значения  $\nu_b$ , где вместо  $\hat{\sigma}_b$  представляется  $\hat{\sigma}_b^0$ , значение  $\hat{\varepsilon}_b$  и  $E_b$  остаются без изменения. Отметим, что, изменяя параметры в вершине диаграммы по этой методике можно построить любую огибающую кривую (принцип подобия).

Рассматривается два типа режимных диаграмм [1] кратковременных циклов одноосного сжатия: с непрерывными изменяющимися от цикла к циклу уровнями напряжений (рис. 1а, б, в) с полной разгрузкой (веревочная диаграмма) и постоянными уровнями напряжений с полной разгрузкой (рис. 1г). Могут быть различные комбинации режимов нагружения двух типов или группа циклов одного уровня сменяется на группу циклов более высокого уровня или более низкого уровня и т.д.

Для описания режимных диаграмм отметим следующее свойство бетона: если бетон нагружать при постоянном уровне деформаций, то с каждым последующим циклом уровни напряжений при достижении этих деформаций уменьшаются (свойство стабильности). На этом свойстве основывается принцип «общих точек», который можно сформулировать следующим образом: каждая ветвь разгрузки может иметь хотя бы одну точку пересечения с ветвью нагрузки следующего цикла. У веревочной диаграммы (рис. 1а), точки разгрузки которой находятся на огибающей кривой, массив общих точек можно объединить одной огибающей [3] кривой с вершиной при  $\hat{\sigma}_b^m$  ( $\varepsilon_b = \hat{\varepsilon}_b$ ) и нисходящей ветвью (по опытным данным  $\hat{\sigma}_b^m = 0,8 \hat{\sigma}_b$ ). Для каждой ветви разгрузки этой веревочной диаграммы общая точка принимает возможное максимальное значение, поэтому обобщенная огибающая кривая общих точек является верхним пределом общих точек. Диаграмма общих точек строится по аналогии с исходной диаграммой с назначением для выражений  $\nu_b$  в редакции [1] напряжений в вершине диаграммы: вместо  $\hat{\sigma}_b$ , соответственно,  $\hat{\sigma}_b^m$ . Для построения методики описания ветвей разгрузок и повторных нагружений принимаются некоторые допущения, которые согласуются с опытными данными.

Кривая разгрузки первого и последующих циклов с любого уровня напряжений строится в приращении напряжений  $\Delta\hat{\sigma}_b$  и деформаций  $\Delta\hat{\varepsilon}_b$  с учетом ее нелинейности [2] в новой системе координат, начало координат которой находится в вершине цикла, а оси  $\varepsilon_{\Delta b}$  и  $\sigma_{\Delta b}$  направляются в противоположном направлении исходным осям  $\varepsilon_b$   $0\sigma_b$  (например,  $\varepsilon_{\Delta b}$   $1\sigma_{\Delta b}$  рис. 1б, фрагмент 1). Форма кривой разгрузки определяется величиной остаточных деформаций при полной разгрузке. Если разгрузка неполная, то задается минимальный уровень напряжений  $\hat{\sigma}_b$  (например, т. 7 рис. 1а, в) и по формуле (1) вычисляется соответствующее значение деформаций  $\hat{\varepsilon}_b$ . Выражение для  $\nu_b$  конструируется таким образом, чтобы кривая разгрузки прошла через три точки: вершину диаграммы (максимальный уровень напряжений на начало разгрузки), общую точку и остаточные деформации  $\varepsilon_{b0}$  при полной разгрузке. Величина остаточных деформаций определяется из выражения (2), начальный модуль деформаций  $\hat{E}_{b0}$  находится через угол наклона прямой к оси  $\varepsilon_{\Delta b}$ , проходящей через две точки: в вершине диаграммы и общую точку. Исходя из принципа «общих точек», такое построение обеспечивает уменьшение жесткости элемента с ростом числа циклов и увеличения уровня напряжения.

Принимается, что координаты общей точки не зависят от уровня минимальных напряжений в цикле (линии 7-2 и  $\varepsilon_{\Delta b} - 2$  на рис. 1б, фрагмент 1 проходят через одну т. 2).

На основании свойства стабильности и принципа «общих точек» каждая кривая разгрузки может иметь не одну, а массив общих точек (2, 3, 4, 5, 6 рис. 1 а, в), которые

являются вершинами последующих циклов. С каждым последующим циклом, если деформации не превышают их значений, ограниченные кривой разгрузки, максимальные напряжения уменьшаются и достигают предела с уровнем напряжений  $\sigma_b^c$  (предела стабильности). Принимается, что величина остаточных деформаций при полной разгрузке  $\varepsilon_{b0}$  не зависит от уровня напряжений в общих точках на кривой разгрузки (принцип максимальной повреждаемости).

Массив общих точек на кривой разгрузки является местом перегиба кривых повторного нагружения: до этих уровней напряжений, после многократных циклов, кривая повторного нагружения текущего цикла имеет выпуклость к оси деформаций (модуль деформаций весьма мал, теряется физический смысл  $\nu_b$ ) с увеличением уровня напряжений этого же цикла – выпуклость в сторону оси напряжений. В указанных точках тангенс угла наклона к оси деформаций достигает максимального значения. По мнению автора работы [4], целесообразно в расчетах принимать значение модуля деформаций  $\vec{E}_b$  численно равным тангенсу угла наклона касательной именно в точке перегиба кривой повторного нагружения. В этих точках, во-первых, обе части кривой – как нижняя, так и верхняя – имеют общую касательную, и, во-вторых, значение модуля деформаций максимально. Например, на четвертом цикле при  $\sigma_b > \sigma_{b4}$  ветвь нагрузки имеет общую касательную в т. 4, угол наклона которой  $\alpha_4$  определяет модуль деформаций для участка ветви 4-8. Если важно подчеркнуть падение жесткости в начале нагружения, то до точек перегиба участки ветвей нагрузок и разгрузок совпадают, а затем вводится новый модуль деформаций и восходящая ветвь описывается известным образом.

Рассмотрим циклические циклы нагружения с постоянными уровнями напряжений (рис. 1г) и полной разгрузкой в циклах как частный случай режимных нагружений с коэффициентом асимметрии в циклах  $\rho = 0$  ( $\rho = \tilde{\sigma}_{mi}/\tilde{\sigma}_{max}$ , где при полной разгрузке  $\tilde{\sigma}_{min} = 0$ ).

Устанавливается уровень напряжений  $\sigma_b^c$  (по аналогии с пределом стабильности для общих точек), в пределах которого при любых режимах нагружения происходит стабилизация роста деформаций в вершинах циклов  $\tilde{\varepsilon}_b$  и остаточных  $\varepsilon_{b0}$ . Это максимальный уровень напряжений, который вызывает разрушение образца при базовом числе циклов и назначается на основании характеристик цикла. Так, в работе [5] за базовое число циклов рекомендуется принимать 2 млн. циклов, промышленных и транспортных железобетонных конструкций, а при  $\rho = 0$ , соответственно,  $\sigma_b^c = 0,6 \tilde{\sigma}_b$  (при  $\rho = 1$  многие авторы приравнивают  $\sigma_b^c$  к длительной прочности бетона и принимают  $\sigma_b^c = 0,85 \hat{\sigma}_b$ ).

С ростом уровня напряжений при  $\sigma_b > \sigma_b^c$  количество циклов нагружения до разрушения уменьшается и оно наступает при достижении максимальных деформаций на ниспадающей ветви огибающей диаграммы (рис. 1г). Допускается, что при режимах нагружения с постоянными скоростями существует максимальный уровень циклических напряжений (предел циклического нагружения)  $\hat{\sigma}_b^c$ , когда бетон еще оказывает сопротивление до достижения деформаций на ниспадающей ветви (по некоторым данным  $\hat{\sigma}_b^u = 0,83 \hat{\sigma}_b$ ). Следует отметить, что если изменить режим нагружения на режим с постоянными скоростями роста напряжений, то разрушение наступит на восходящей ветви диаграммы, причем значение предельных напряжений зависит от уровня циклических нагружений [2].

Для построения диаграмм циклического нагружения с постоянной амплитудой напряжений  $\tilde{\sigma}_b$  используется принцип подобия для огибающих кривых: для уровня напряжений  $\tilde{\sigma}_b$  назначается вершина кривой общих точек ( $\tilde{\sigma}_b^m = 0,8 \tilde{\sigma}_b$ ), которая описывается уравнением (1). Методике описания диаграммы в такой конструкции соответствует закономерность: до  $\varepsilon_b \leq \tilde{\varepsilon}_b$  приращения деформаций с количеством циклов уменьшаются  $\Delta\varepsilon_{bi} < \Delta\varepsilon_{bi-1}$  (бетон уплотняется), при  $\varepsilon_b > \tilde{\varepsilon}_b$  наоборот  $\Delta\varepsilon_{bi} > \Delta\varepsilon_{bi-1}$ . Величина остаточных деформаций при полной разгрузке определяется как функция суммы деформаций в вершине цикла  $\tilde{\varepsilon}_{b1}$  на первом цикле и приращений деформаций  $\Delta\varepsilon_{bi}$  на последующих циклах в виде:

$$\varepsilon_{b0} = \kappa_y (\tilde{\varepsilon}_{b1} + \sum_{i=2}^n \Delta\varepsilon_{bi}), \quad (2)$$

где коэффициент  $\kappa_y$  зависит от режимов нагружения.

Для кратковременной модели по опытным данным  $\kappa_y = 0,2 \div 0,25$ . Если принять  $\tilde{\varepsilon}_b = 200 \times 10^{-5}$  и  $\varepsilon_{bu} = 300 \times 10^{-5}$ , то значения относительных деформаций  $\varepsilon_{b0}$ , соответственно, составят:  $\varepsilon_{b0} = (44 \div 50) \times 10^{-5}$  и  $\varepsilon_{b0} = (66 \div 75) \times 10^{-5}$ .

**Вывод:**

В рамках кратковременной модели предложена методика описания диаграмм циклического нагружения бетона напряжениями сжатия, которая учитывает основные закономерности изменения параметров в циклах, а результаты расчета соответствуют опытным данным.

**Список литературы**

1. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 412 с.
2. Ерышев В.А., Тошин Д.С. Диаграмма деформирования бетона при многократных повторных нагружениях // Известия вузов. Строительство, 2005, № 10. – С. 109-114.
3. Ерышев В.А., Латышев Д.И., Бондаренко А.С. К методике описания диаграммы малоциклового нагружения // Известия ОрелГТУ, 2009, № 1. – С. 22-28.
4. Маилян Л.Р., Беккиев М.Ю., Силь Г.Р. Работа бетона и арматуры при многократно повторных нагружениях. – Нальчик: Кабардино-Балкарский агромилиоративный институт, 1984. – 55 с.
5. Берг О.Я., Щербakov Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.

Eryshev V.A. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: gsx@tltsu.ru

Latysheva E.V. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: p-tata@mail.ru

Klyuchnikov S.V. – magistrate

Gray N.S. – magistrate

Tolyatti State University

Address of organization: 445667, Russia, Tolyatti, Belorusskaia st., 14

**To creation of charts of cyclic loading of concrete at monoaxial compression****Resume**

In real conditions of reinforced concrete structures in the process of exploitation are subjected to re-loads, which qualitatively alter the character of the stress – strain state structures. Such kind of loading can be seen in the wind, snow, transport and technological construction and should be taken into account in the reconstruction of buildings and structures. If the modern theory of the calculation of reinforced concrete with cracks allows you to define deformative properties of the structures in a single loading up to destruction, the question of their change in not multiple re-loading is currently poorly understood and is not reflected in the normative documents. Lack of methods for description of the diagrams of deformation of concrete under cyclic loads restrains the development of methods of calculation of constructions under operating loads. In the present work the technique of description of the diagrams cyclic loading of concrete compression stresses, which takes into account the basic regularities of changes of parameters in cycles, and the results of calculations correspond to the experimental data.

**Keywords:** chart cyclic loading, stresses, deformation, envelope curve, the limit of common points.

**References**

1. Karpenko N.I. General models of mechanics of reinforced concrete. – M.: Stroyizdat, 1996. – 412 p.
2. Eryshev V.A., Toshin D.S. The chart of deformation of concrete at not repeated repeated loadings // News of HEI. Construction, 2005, № 10. – P. 109-114.
3. Eryshev V.A., Latyshev D.I., Bondarenko A.S. To the description of the diagram of low-cycle loading // proceedings of Voronezh state University, 2009, № 1. – P. 22-28.
4. Mailyan L.R., Bekkiyev M.Iu., Sil G.R. The work of the concrete and reinforcement when not repeatedly re-loading. – Nalchik: Kabardino-Balkar the agromeliorative Institute, 1984. – 55 p.
5. Berg O.Ia., Shcherbakov E.N., Pisanko G.N. High-strength concrete. – M.: Stroyizdat, 1971. – 208 p.