

ТРАНСФОРМИРОВАННЫЕ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ МАЛОЦИКЛОВЫХ НАГРУЗОК

Семенюк С.Д., Болошенко Ю.Г.

Белорусско-Российский университет
г. Могилев, Республика Беларусь

АНОТАЦІЯ: В статті представлено опис трансформованих діаграм деформування при дії мало циклових навантажень для важкого бетону, сталевібробетону та бетону з використанням відходів ливарно-металургійних виробництв в якості мілкового заповнювача (ВМВ-бетону).

АННОТАЦИЯ: В статье представлены описания трансформированных диаграмм деформирования при действии малоцикловых нагрузок для тяжелого бетона, сталефибробетона и бетона с использованием отходов литейно-металлургических производств в качестве мелкого заполнителя (ОМП-бетона).

ABSTRACT: The article presents the description of the transformed strain diagrams the action low-cycle loads for heavy concrete, steelfibreconcrete and concrete with using as fine aggregate a metallurgical industries wastes.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бетон, сталевібробетон, відходи производств, нагужение, діаграма деформирования.

В качестве нормативной диаграммы бетона, устанавливающей зависимость между напряжениями и деформациями, принимается нелинейная диаграмма состояния бетона с ниспадающей ветвью с учетом переменности относительной деформации бетона на сжатие в вершине диаграммы. Для описания диаграммы деформирования тяжелого бетона в условиях осевого кратковременного сжатия допускается использовать следующую аналитическую зависимость [1-4]:

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2) \cdot \eta}, \quad (1)$$

где $\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$ ($\varepsilon_{c1} < 0$);

ε_{c1} – относительная деформация, соответствующая пиковой точке диаграммы деформирования [3, 4];

$$k = \frac{1.1E_{cm} \cdot |\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}}. \quad (2)$$

Величины относительных деформаций ε_{c1} и ε_{cu} в параметрических точках не остаются постоянными. Нормативные документы предлагают принимать для бетонов классов по прочности до C50/60 включительно, постоянные значения относительных деформаций ε_{c1} . Для описания изменения продольной относительной деформации ε_{c1} с ростом класса бетона по прочности при сжатии используют, как правило, простые линейные зависимости. Например, для определения параметрической точки диаграммы деформирования, соответствующей относительным деформациям ε_{c1} (в ‰), А. Томашевича была предложена формула [2]:

$$\varepsilon_{c1} = 0.7 \cdot (f_c)^{0.31}. \quad (3)$$

Большинство нормативных документов предлагают определять предельную относительную деформацию ε_{cu} для бетонов, в том числе и для высокопрочных, при $\sigma_{cu} = 0.5f_c$.

На основании эмпирических данных Саргин, Попович была предложена зависимость для установления соотношения между относительными деформациями $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{c1}$ [2]:

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} = 1 + \frac{20}{f_c}. \quad (4)$$

Г.В. Нестеровым была предложена следующая зависимость:

$$\varepsilon_{cu} = \left(\frac{2.5}{\lambda_R} - 1.5 \right) \frac{f_c}{E_{c0}} < 3.5 ‰. \quad (5)$$

Согласно [4] предельные относительные деформации, $\varepsilon_{cu} = 3,5 ‰$, относительные деформации ε_{c1} , соответствующие пиковой точке диаграммы деформирования бетона, определяются по формуле:

$$\varepsilon_{c1} = 0,7 f_{c,cyc}^{0.31} \leq 2,8 ‰. \quad (6)$$

Напряжения при разрушающей нагрузке при низких и средних уровнях загрузки не изменяются и даже могут увеличиваться, то есть несущая способность элемента может быть несколько выше (до 5 ‰), чем для образцов, испытанных монотонным нагружением. Однако при высоких уровнях нагрузки (выше критической границы) несущая способность

образцов снижается вследствие развития пластических деформаций и нарушения структурных связей в бетонной матрице.

Сталефибробетон за счет дисперсного армирования металлической фиброй, скрученной вдоль продольной оси и имеющей анкерные зацепы на концах, лучше работает в условиях малоциклового нагружения по сравнению с тяжелым бетоном. В частности, сталефибробетон имеет более высокие границы микротрещинообразования (верхняя и нижняя), меньшие деформации быстроснатекающей ползучести. Введение в состав тела бетона металлической фибры оказывает существенное влияние на процесс деформирования сталефибробетона: несущая способность в результате действия малоцикловых нагружений не снижается, а несколько увеличивается (на 5...10 %). Это явление можно объяснить развитием в стали явления наклепа и, как следствие, увеличение несущей способности сталефибробетона.

Согласно исследованиям Н.А. Рака [5] относительные деформации ε_{fc1} , соответствующие максимальным напряжениям на диаграмме, могут быть определены по зависимости:

$$\varepsilon_{fc1} = \varepsilon_{c1} \cdot \left(\frac{f_{fc}}{f_c} \right)^2. \quad (7)$$

В отличие от тяжелого бетона малоцикловые воздействия на сталефибробетон не приводят к изменению конечных деформаций по сравнению с однократным нагружением. Учитывая также тот факт, что малоциклового характер нагрузки не влияет на изменение прочностных характеристик сталефибробетона, можно сделать предположение, что данная зависимость может быть применена для определения пиковой точки диаграммы деформирования при действии малоцикловых нагрузок различных уровней без корректировки. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований, проведенных авторами. Данная особенность обусловлена дисперсным армированием тела бетона стальными фибрами.

Для бетона на основе ОМП характерны те же особенности работы в условиях малоциклового нагружения, что и для традиционного тяжелого бетона: при высоких уровнях нагружения происходит стабилизация прироста деформаций; при изменении эксплуатационного уровня на более высокий на протяжении последующих десяти циклов прирост деформаций также стабилизируется; при внезапном увеличении уровня нагрузки деформации бетона растут, однако при возвращении к эксплуатационному уровню они стабилизируются, при этом имеет место «эффект Баушингера», когда граница ползучести при разгрузке уменьшается под влиянием пластических деформаций, возникших при нагружении [6, 7].

Ввиду высокого значения критической границы η_{cr}^V особенностью работы ОМП-бетона является очень быстрый рост пластических деформа-

ций при превышении уровня η_{crc}^v и, как следствие, хрупкий характер разрушения структуры ОМП-бетона, что накладывает определенные ограничения при его использовании в сжатой зоне конструкций: режим работы конструкции должен быть строго ограничен нагрузками низких и средних уровней, то есть не превышающих критическую границу η_{crc}^v .

На основании проведенных авторами экспериментальных исследований для ОМП-бетона была предложена эмпирическая зависимость для определения пиковой точки диаграммы деформирования ε_{c1} :

$$\varepsilon_{c1}^{ОМП} = 0,5 \cdot f_{c,cyc}^{1,07 - \eta_{crc}^0} \leq 2,8 \text{ \%}. \quad (8)$$

Даная зависимость хорошо согласуется с опытными данными.

Прочность бетона снижается в результате воздействия на него нагружения малоциклового характера по сравнению с однократным нагружением. Чем выше уровень нагружения, тем значительнее снижение прочности бетонной матрицы. В связи с этим целесообразно для значения прочности бетона в условиях малоциклового нагружения использовать понижающий коэффициент условий работы $\gamma_{c,cyc}$, учитывающий неблагоприятное воздействие малоциклового нагружения. В [8, 9] предложены эмпирические зависимости для определения коэффициента $\gamma_{c,cyc}$ в зависимости от уровня нагружения, однако они применимы только для тяжелого бетона средних классов и не учитывают тот факт, что для бетонов более высоких классов снижение прочности может быть меньше, чем для бетонов низких классов. Чем выше класс бетона, тем выше критическая граница η_{crc}^v и, соответственно, более высокий уровень малоциклового приспособляемости. Если при определении $\gamma_{c,cyc}$ учесть верхний уровень микро-трещинообразования η_{crc}^v , то формула для расчета данного коэффициента может быть универсальной и применимой для бетонов различных видов и классов. Исключение составляют материалы, которые остаются стабильными при воздействии малоциклового нагружения. В частности, для сталефибробетона коэффициент условий работы можно принять равным 1,0 ($\gamma_{c,cyc}=1,0$) в связи с тем, что, как сказано выше, прочность сталефибробетона ввиду наличия металлической фибры не снижается, а несколько увеличивается, однако это увеличение незначительно и может быть отнесено в запас прочности и не учитываться при расчете.

По результатам проведенных экспериментальных исследований для определения коэффициента, учитывающего изменение прочности бетона, авторами была получена следующая зависимость при $\eta_{top} < 1,0$:

$$\gamma_{c,cyc} = 0,97 \sqrt{\eta_{crc}^v} - 0,3 \ln \eta_{top}. \quad (9)$$

Коэффициент условий работы $\gamma_{c, cyc}$ может быть понижающим или повышающим в зависимости от режима нагружения: при низких ($\eta_{top} \leq \eta_{cr}^0$) и средних ($\eta_{cr}^0 < \eta_{top} < \eta_{cr}^v$) режимах нагружения данный коэффициент является повышающим и принимает значения больше 1; при высоких ($\eta_{top} \geq \eta_{cr}^v$) режимах нагружения данный коэффициент является понижающим и принимает значения меньше 1.

Предложенная зависимость дает достаточную сходимость с экспериментальными данными (максимально отклонение до 15 %, среднее отклонение до 3 %). Результаты сравнения опытных значений $\gamma_{c, cyc}$ с теоретическими, полученными при расчете по формуле (9), представлены на рис. 1.

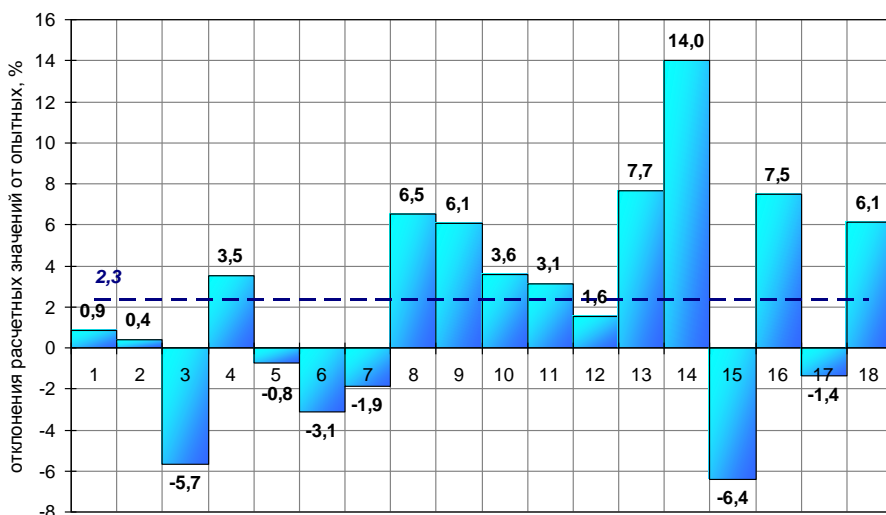


Рис. 1. Сравнение опытных и теоретических значений коэффициента условий работы $\gamma_{c, cyc}$: значения 1-10 – для тяжелого бетона; значения 11-18 – для ОМП-бетона

Введение данного коэффициента позволяет определить прочность бетона при действии малоцикловых нагружений различных уровней $f_{c, cyc}$. Расчет по уточненному значению прочности $f_{c, cyc}$ по вышеприведенным формулам позволяет определить относительные деформации $\epsilon_{c1, cyc}$, соответствующие пиковой точке трансформированной диаграммы деформирования бетона (рис. 2).

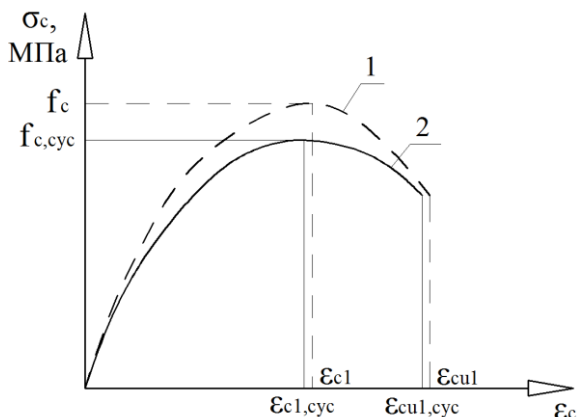


Рис. 2. Трансформированная диаграмма деформирования бетона при малоцикловом нагружении: 1 – диаграмма деформирования бетона при статическом нагружении; 2 – трансформированная диаграмма деформирования бетона при малоцикловом нагружении

На основании эмпирических данных Саргин, Попович в работе [2] зависимость для определения предельных деформаций тяжелого бетона представлена, исходя из соотношения между относительными деформациями $\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{c1}$ в виде:

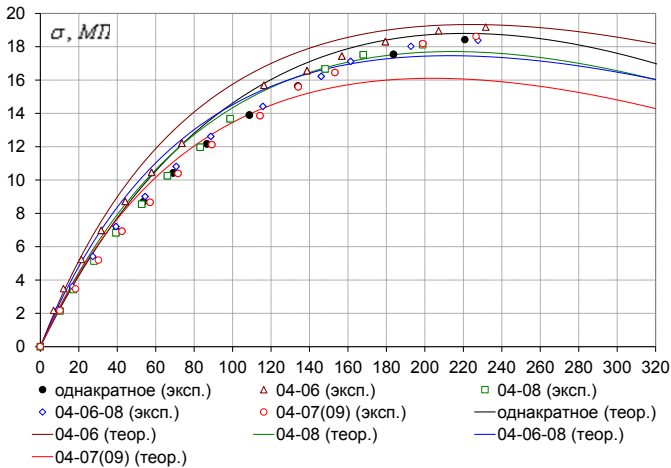
$$\varepsilon_{cu,cyc} = \left(1 + \frac{20}{f_{c,cyc}} \right) \cdot \varepsilon_{c1,cyc} \leq 3,5\% \quad (10)$$

Однако очевидно, что ввиду особенностей деформирования ОМП-бетона, о которых говорилось выше, данная зависимость будет давать значительную погрешность. Это связано с высоким значением верхней границы микротрещинообразования ОМП-бетона, что обуславливает быстрый рост пластических деформаций при переходе через пиковую точку диаграммы и хрупкий характер разрушения бетонного образца. В связи с этим очертание кривой на участке ниспадающей ветви будет более пологим, и значение предельных деформаций будет меньше по сравнению с тяжелым бетоном.

Особенности корректировки пиковой точки диаграммы деформирования для ОМП-бетона отражают форму кривой на ниспадающей ветви диаграммы, однако из положений энергетической теории очевидно, что значения предельных деформаций будут меньше, чем для тяжелого бетона [10]. Авторами рекомендовано граничное значение ε_{cu} для ОМП-бетона принимать не более 3,2 ‰. Тогда формула для расчета ε_{cu}^{OMP} с учетом корректировки принимает вид:

$$\varepsilon_{сш,сус}^{ОМП} = \left(1 + \frac{16}{f_{с,сус}^{ОМП}} \right) \cdot \varepsilon_{сш,сус}^{ОМП} \leq 3,2\% \cdot \quad (11)$$

а)



б)

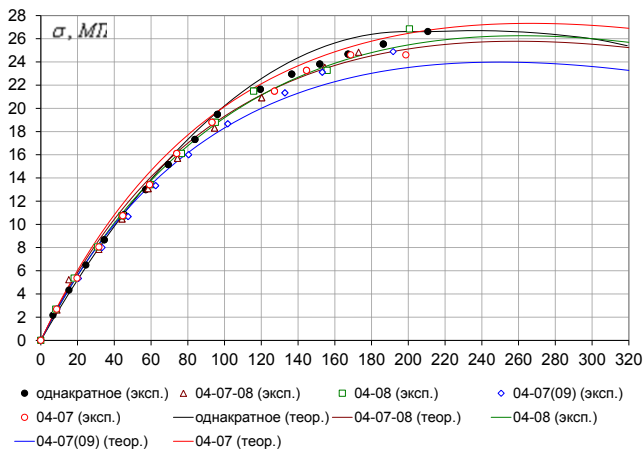
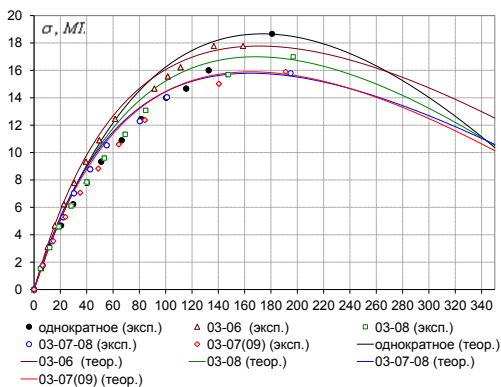


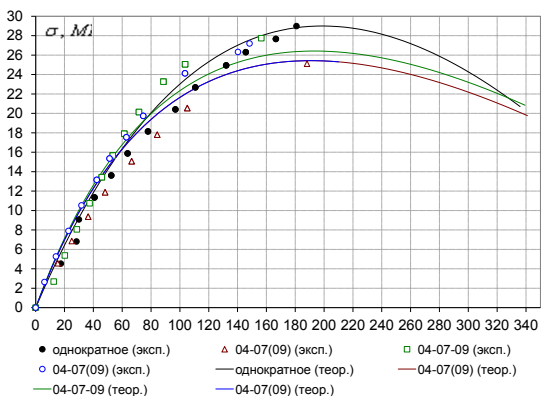
Рис. 3. Теоретические кривые и опытные точки диаграмм деформирования ОМП-бетона при малоцикловом нагружении различных уровней: а) $f_{cm}=18,8$ МПа; $f_{fc,cube,m}=24,5$ МПа; б) $f_{cm}=26,6$ МПа; $f_{fc,cube,m}=32,8$ МПа

На рис. 3, 4 показаны опытные точки восходящей ветви диаграмм деформирования и теоретические кривые полных диаграмм деформирования тяжелого бетона и ОМП-бетона при малоцикловом нагружении различных уровней. Теоретические кривые построены по методике Eurocode-2, изложенной в [1, 3, 4].

а)



б)



в)

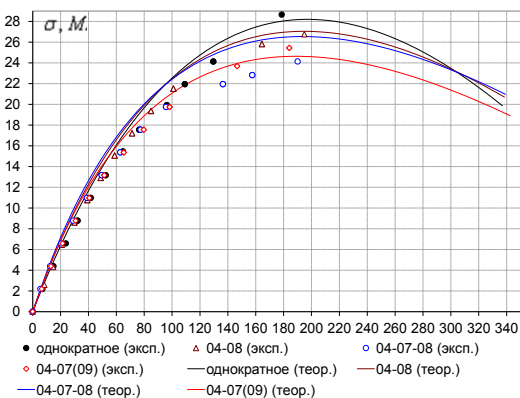


Рис. 4. Теоретические кривые и опытные точки диаграмм деформирования тяжелого бетона при малоцикловом нагружении различных уровней:

а) $f_{cm}=18,7$ МПа; $f_{c,cube,m}=23,3$ МПа; б) $f_{cm}=28,2$ МПа; $f_{c,cube,m}=36,1$ МПа;

в) $f_{cm}=29,0$ МПа; $f_{c,cube,m}=36,7$ МПа

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных авторами экспериментально-теоретических исследований предложена эмпирическая зависимость для определения *коэффициента* условий работы $\gamma_{c,сус}$, учитывающего изменение прочности бетона в результате действия малоциклового нагружения, а также вид бетона, что делает формулу универсальной и применимой для бетонов различных видов и классов. Также представлена трансформированная диаграмма бетона с учетом действия малоцикловых нагрузок различных уровней. Установлено, что для ОМП-бетона, так же, как и для тяжелого бетона и сталефибробетона, существует линейная зависимость между модулем упругости и уровнем нагрузки как при однократном нагружении, так и при малоцикловом. Установлено, что малоциклового характер нагрузки не оказывает влияния на прочностные и деформативные характеристики сталефибробетона.

Отсутствие необходимости корректировки диаграммы деформирования сталефибробетона обуславливает целесообразность его применения в конструкциях, работающих в условиях малоциклового нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings: prEN 1992-1 (Final draft, October 2001). Eurocode 2. – Brussels, 2002. – 230 p.
2. Тур В.В. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций : монография / В.В. Тур, Н.А. Рак. – Брест: БГТУ, 2003. – 252 с.
3. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 2003. – 143 с.
4. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250) Еврокод 2. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 2010. – 191 с.
5. Рак Н.А. Методика расчета сталефибробетонных конструкций с использованием диаграмм деформирования сталефибробетона и стержневой арматуры / Н.А. Рак // Проблемы современного бетона и железобетона: Материалы III Междунар. симпозиума в 2 т. - Т. 1. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск : Минсктиппроект, 2011. – С. 302 – 308.
6. Семенюк С.Д. Бетон с использованием отходов литейно-металлургических производств при однократном и малоцикловом нагружениях / С.Д. Семенюк, Ю.Г. Болошенко, Т.С. Бурко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Вип. 39. – Одесса, 2010. – С. 240–247.
7. Семенюк С.Д. Возможность использования бетонов на основе отходов литейно-металлургических производств (ОМП) для усиления сжатой зоны изгибаемых железобетонных элементов / С.Д. Семенюк, Ю.Г. Болошенко,

- Т.С. Бурко // Проблемы безопасности на транспорте : материалы V между-
нар. научн.-практич. конф. – Гомель : БелГУТ. – 2010. – С. 327–328.
8. Бабич Є.М. До питання побудови діаграми деформування бетону та визна-
чення коефіцієнта повноти епюри напружень / Є.М. Бабич, Ю.О. Крусь //
Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук.
праць. – Рівне: Національний університет водного господарства та приро-
докористування, 2001. – Вип. 6. – С. 94–104.
 9. Тахтай Д.А. Прочность и деформативность бетона при внецентренном цик-
лическом нагружении / Д.А. Тахтай, В.И. Веретенников, А.А. Бармотин //
Коммунальное хозяйство городов : науч.-техн. сб. – К., 2004. – № 60. – С.
53–65.
 10. Гладков Д.И. Физико-химические основы прочности бетона и роль техноло-
гии в ее обеспечении / Д.И. Гладков. – Белгород: БГТУ им. В.Т. Шухова,
2004. – 293 с.

Статья поступила в редакцию 29.01.2013 г.