

УДК 624.012

**ТРАНСФОРМИРОВАННАЯ ДИАГРАММА ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ОМП-БЕТОНА ПРИ СЖАТИИ В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВОГО
НАГРУЖЕНИЯ**

**TRANSFORM THE STRESS-STRAIN DIAGRAM OF WMI-CONCRETE
COMPRESSION UNDER LOW-CYCLE LOADING**

Семенюк С.Д., Москалькова Ю.Г. (Белорусско-Российский университет,
г. Могилев, Республика Беларусь)

Semenyuk S.D., Moskalkova Y.G. (Belarusian-Russian University, Mogilev, the
Republic of Belarus)

В статье представлены результаты исследования влияния малоцикловых нагрузок на прочностные и деформативные свойства бетона на основе отходов литейно-металлургических производств (ОМП-бетона).

The article presents the results of investigation of low-cycle loads on the strength and deformation properties of concrete on the basis of waste foundry and metallurgical industries (WMI-concrete).

Ключевые слова:

Бетон, диаграмма деформирования, сжатие, малоцикловой, нагружение, отходы производств.

Concrete stress-strain diagram, compression, low cycle, loading, waste production.

Заводы Могилевской области уже сегодня испытывают серьезные затруднения с мелким заполнителем бетонов. Этот дефицит можно ликвидировать, использовав в качестве мелкого заполнителя пески отработанных формовочных смесей литейно-металлургических производств. Промышленные предприятия Могилева, имеющие литейные производства, ежегодно вывозят в отвалы около 80 тыс. м³ отработанных формовочных смесей.

Для оценки возможности использования отработанных формовочных смесей и гранулированного ваграночного шлака в бетонах различных марок проанализирован их состав [1, 2, 3]. Для анализа взяты формовочные смеси промышленных предприятий г. Могилева: литейного цеха завода «Стромавтолиния», чугунолитейного производства (ЧЛП) лифтостроительного завода, литейного цеха металлургического завода им. Мясникова, сталелитейного и чугунолитейного цехов автозавода им. Кирова.

Расчет железобетонных конструкций, подверженных действию малоцикловых нагрузок, при простых и сложных видах деформирования следует производить на основе трансформированных диаграмм деформирования при сжатии, которые основаны на введении частного коэффициента $\gamma_{с,сус}$, учитывающего влияние малоцикловой нагрузки.

Для ОМП-бетона критическая граница (верхняя граница микротрещинообразования η_{crc}^v определяется по опытным данным как пиковая точка зависимости «Уровень нагружения – объёмная деформация».

Значения коэффициентов упругости ν_c и пластичности λ_c , включая их граничные значения ν_{cR} и λ_{cR} , а также другие деформативные характеристики, полученные с помощью линейного корреляционного анализа [4]. Основные характеристики бетонов, используемых для изготовления опытных образцов, сведены в таблицу.

Таблица

Прочностные и деформативные характеристики бетонов, используемых для изготовления опытных образцов

| Прочность бетона | | Возраст бетона, сут. | Модуль упругости и $E_{см}$, ГПа | Граничное значение коэффициента | | Предел микротрещинообразования | | Коэффициент $k_{crc} = \frac{\eta_{crc}^0}{\eta_{crc}^v}$ |
|------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|---|
| f_{cm} , МПа | $f_{c,cube,m}$, МПа | | | упругости ν_{cR} | пластичности λ_{cR} | верхний η_{crc}^v | нижний η_{crc}^0 | |
| 18,8 | 24,5 | 35 | 23,22 | 0,338 | 0,662 | 0,849 | 0,610 | 0,719 |
| 26,6 | 32,8 | 32 | 31,57 | 0,419 | 0,581 | 0,888 | 0,655 | 0,737 |

Анализ опытных данных свидетельствует о том, что между верхним и нижним пределами микротрещинообразования существует линейная зависимость. Коэффициент k_{crc} не зависит от класса бетона и для ОМП-бетона может быть принят равным 0,73 [5].

Значение уровня нагрузки, соответствующей критической границы, определяется по формуле

$$\eta_{crc}^v = 0,33k_{crc} \cdot \ln f_{cm} + 0,1. \quad (1)$$

Значение уровня нагрузки, соответствующей нижней границы микротрещинообразования:

$$\eta_{crc}^0 = 0,33k_{crc} \cdot \ln f_{cm} - 0,15. \quad (2)$$

Для получения средних значений малоцикловой прочности ОМП-бетона $f_{см,сус}$ используется эмпирический частный коэффициент $\gamma_{с,сус}$, учитывающий значение критической границы и верхний уровень малоциклового нагружения η_{top} :

$$\gamma_{c,cyc} = \frac{1}{0,97\sqrt{\eta_{crc}^v} - 0,3 \ln \eta_{top}}, \quad (2)$$

$$f_{cm,cyc} = \frac{f_{cm}}{\gamma_{c,cyc}}. \quad (3)$$

Относительные деформации $\varepsilon_{c1,cyc}$, соответствующие пиковой точке диаграммы деформирования ОМП-бетона при сжатии, могут быть определены по эмпирической формуле

$$\varepsilon_{c1,cyc}^{ОМП} = 0,5 \cdot f_{cm,cyc}^{1,07-\eta_{crc}^0} \leq 2,8 \text{ ‰}. \quad (4)$$

Особенностью работы ОМП-бетона при кратковременном нагружении является хрупкий характер разрушения образцов: после достижения уровня η_{crc}^v рост деформаций быстронатекающей ползучести становится очень интенсивным. 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, чем для тяжелого бетона, и значение предельных деформаций будет меньшим.

Предельные деформации бетона можно определить исходя из положений энергетической теории. Согласно [6] потенциальные возможности бетона предлагается оценивать величиной работы A_p , которая необходима для разрушения материала единичного объема:

$$A_p = \int_0^{\varepsilon_{cu}} f_{cm} d\varepsilon = \alpha_1 f_{cm} \varepsilon_{cu}, \quad (5)$$

где α_1 – коэффициент, характеризующий отношение площади под диаграммой « $\sigma_c - \varepsilon_c$ » к площади прямоугольника со сторонами f_{cm} и ε_{cu} . Для удобства в расчетах α принимается равным единице [6].

В работе [7] было обосновано, что, так как исчерпание прочности наступает в случае, если полная энергия разрушения W_u равна критическому значению суммарной энергии циклической прочности бетона, величину полной энергии можно определить следующим образом:

$$W_u = \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^\alpha \right] d\varepsilon_c = f_{cm} \varepsilon_{c1} \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha} \right), \quad (6)$$

где $\alpha = 1/\nu_{CR}$.

Предельные деформации бетона при малоцикловом нагружении $\varepsilon_{cu,cyc}$ можно определить исходя из положений энергетической теории: $W_1 = W_2$ (рис. 1).

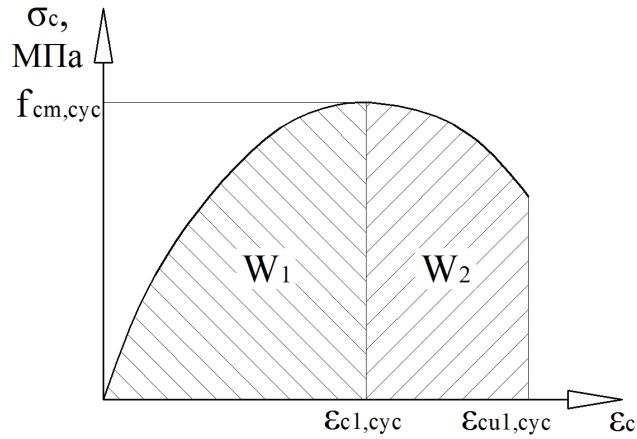


Рис. 1. К расчёту предельных деформаций ОМП-бетона

Таким образом, исходя из положений энергетической теории, получаем:

$$W_1 = \int_0^{\varepsilon_{c1}} \sigma_c d\varepsilon = W_2 = \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} \sigma_c d\varepsilon \quad (7)$$

Согласно [8] напряжения в бетоне σ_c определяются по формуле

$$\sigma_c = f_{cm} \cdot \left[\frac{k\eta - \eta^2}{1 + \eta(k-2)} \right] = f_{cm} \cdot \left[\frac{k \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}(k-2)} \right], \quad (8)$$

где $k = 1,05 E_{cm} \frac{|\varepsilon_c|}{f_{cm}}$.

Используя программный комплекс Mathematica 6.0 при некоторых упрощениях получили, что для ОМП-бетона предельные деформации $\varepsilon_{cu}^{OMP} \approx 3,2 \%$.

Таким образом, трансформированная диаграмма деформирования ОМП-бетона при сжатии в условиях малоциклового нагружения описывается уравнением

$$\frac{\sigma_{c,cyc}}{f_{cm,cyc}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2) \cdot \eta}, \quad (9)$$

где модуль упругости (в ГПа)

$$E_{cm,cyc}^{OMP} = \frac{45 f_{cm,cyc}}{19 + \eta_{top1} \cdot f_{cm,cyc}}. \quad (10)$$

Расчет железобетонных элементов при статическом нагружении производится с использованием диаграммы 1, при малоцикловом – трансформированной диаграммы 2 (рис. 2).

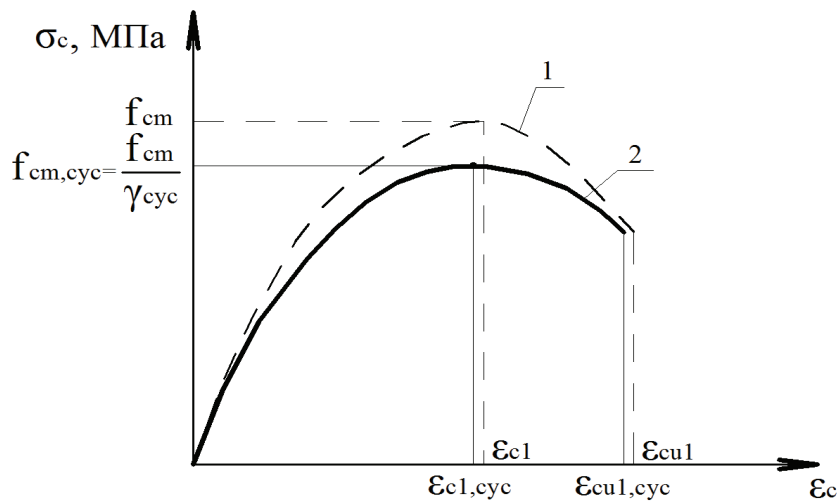


Рис. 2. Диаграммы деформирования ОМП-бетона при сжатии:
 1 – диаграмма деформирования бетона при статическом нагружении;
 2 – трансформированная диаграмма деформирования бетона при малоцикловом нагружении

На рис. 3 показаны опытные точки восходящей ветви диаграмм деформирования и теоретические кривые полных диаграмм деформирования ОМП-бетона при малоцикловом нагружении различных уровней. Теоретические кривые построены по предложенной методике, основанной на положениях Eurocode-2 [8].

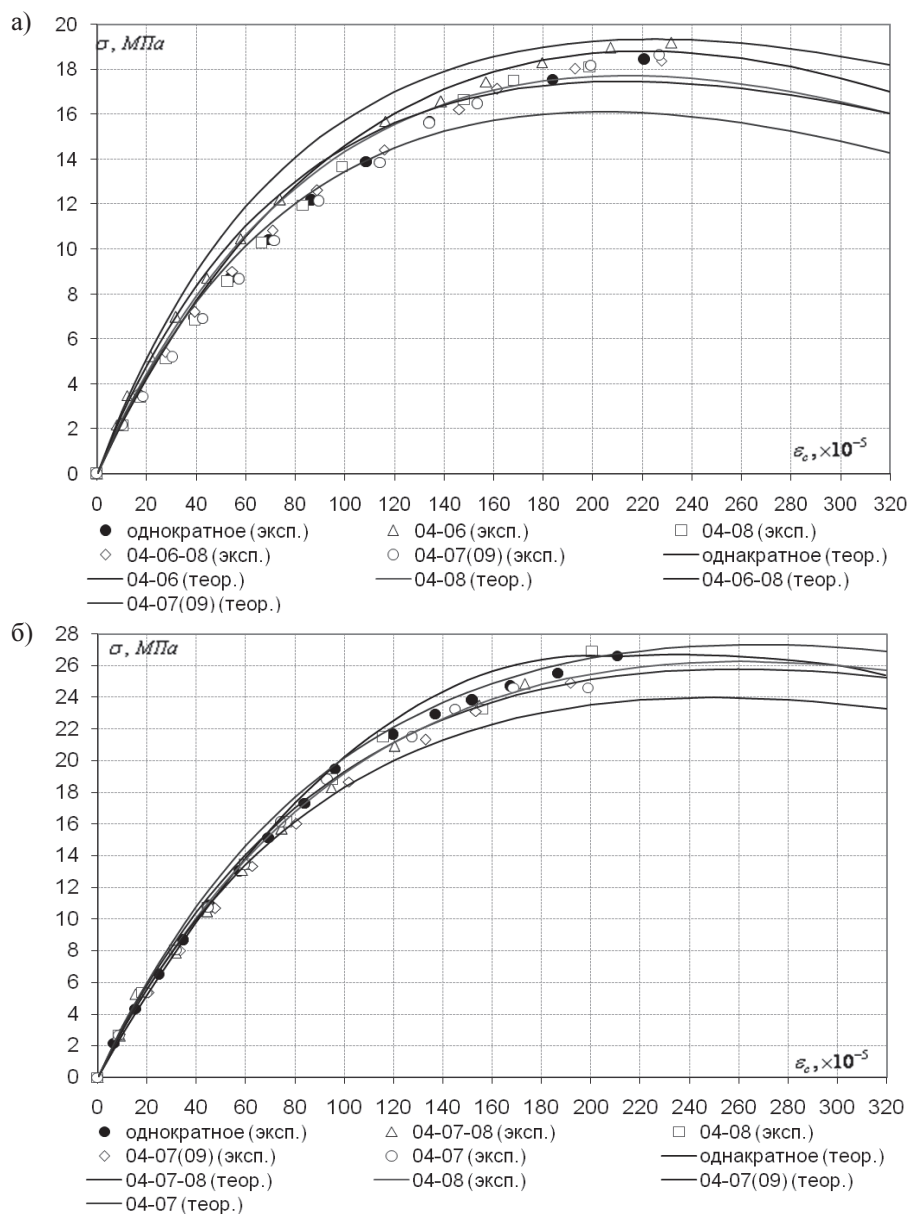


Рис. 3. Теоретические кривые и опытные точки диаграмм деформирования ОМП-бетона при малоцикловом нагружении различных уровней:
 а) $f_{cm}=18,8 \text{ МПа}$; $f_{c,cube,m}=24,5 \text{ МПа}$; б) $f_{cm}=26,6 \text{ МПа}$; $f_{c,cube,m}=32,8 \text{ МПа}$

Вывод. Получены трансформированные диаграммы деформирования ОМП-бетона при сжатии, применяемые в расчётных моделях сопротивления сечений, нормальных к продольной оси железобетонного элемента, при выполнении проверок предельных состояний по несущей способности в условиях действия малоцикловых нагрузок при уровнях нагружения $\eta \approx 0,4-0,6$; $0,4-0,8$ со скачком до $\eta \approx 0,9$ на одном из средних циклов. Трансформация диаграмм основана на введении частного коэффициента $\gamma_{с,сус}$, учитывающего влияние малоциклового нагружения.

1. Семенюк, С.Д. Исследование эффективности использования гранулированного ваграночного шлака в качестве заполнителя для жаростойкого бетона / С.Д. Семенюк, Д.А. Ковширко // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – Минск, 2003. – № 2 (12). – С. 64–73.
2. Семенюк, С.Д. Отработанные пески формовочных смесей – мелкий заполнитель бетонов / С.Д. Семенюк, Р.П. Семенюк // Бетон и железобетон. – Могилев, 1992. – № 7. – С. 29–30.
3. Семенюк, С.Д. Отходы литейно-металлургических производств в качестве мелкого заполнителя для бетонов / С.Д. Семенюк, Т.С. Бурко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будовлі та споруди : збірник наукових праць / Нац. ун-т водн. госп-ва та природокорист. ; редкол.: Є.М. Бабич (відп. за вид.) [та інш.]. – Рівне: НУВГП, 2010. – Вип. 20 – С. 223–231.
4. Блохин, А.В. Теория эксперимента: курс лекций в двух частях. Ч. 1. Научно-методический центр «Электронная книга БГУ» [Электронный ресурс]. Электрон. текст. дан. (1,1 Мб). – Минск, 2003. – Режим доступа: <http://anubis.bsu.by/publications/elresources/Chemistry/blohin1.pdf>. – Электрон. версия печ. публикации, 2002.
5. Семенюк, С.Д. Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при действии малоцикловых нагружений / С.Д. Семенюк, Ю.Г. Болошенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будовлі та споруди : зб. наук. праць / НУВГП ; редкол. : Є.М. Бабич [та інш.]. – Рівне, 2012. – Вип. 23. – С. 523–532.
6. Гладков, Д.И. Физико-химические основы прочности бетона и роль технологии в её обеспечении. – Белгород: БГТУ им. В.Т. Шухова, 2004. – 293 с.
7. Бабич, Є.М. Бетонні та залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень : Монографія / Є.М. Бабич, Ю.О. Крусь. – Рівне : Вид-во РДТУ, 1999. – 119 с.
8. Проектирование железобетонных конструкций. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250) Еврокод 2. – Введ. 01.01.2010. – Минск: М-во архит. и строит. РБ, 2010. – 191 с.