

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ ОБЫЧНОГО И ЛЕГКОГО БЕТОНОВ ПРИ УСИЛЕНИИ
НАБЕТОНКОЙ В УСЛОВИЯХ СТАТИЧЕСКОГО
МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ**

**ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
КОНСТРУКЦІЙ ЗІ ЗВИЧАЙНОГО І ЛЕГКОГО БЕТОНІВ ПРИ
ПОСИЛЕННІ НАБЕТОНКОЮ В УМОВАХ СТАТИЧНОГО
МАЛОЦИКЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

**CALCULATION FEATURES FOR FLEXURAL REINFORCED
CONCRETE STRUCTURES STRENGTHED USING NORMAL AND
LIGHTWEIGHT CONCRETE UNDER LOW-
CYCLE LOADING CONDITIONS**

Москалькова Ю.Г., к. т. н., доц. (Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь)

Moskalkova Yu. G., PhD, associate professor (Belarusian-Russian University, Mogilev, Republic of Belarus)

***Аннотация.** В представленной статье приведены новые зависимости для определения уровней нагрузок, соответствующих образованию микротрещин и формированию макротрещин. В расчет введен параметр, который позволяет охарактеризовать способность бетона сопротивляться действию статических малоцикловых нагрузок. Предлагаемая методика расчета гармонизирована с положениями Eurocode 2. Предложено описание трансформированной диаграммы деформирования при малоцикловом нагружении, отражающей влияние малоцикловых нагрузок на прочностные и деформативные свойства бетона.*

***Анотація.** У представленій статті наведені нові залежності для визначення рівнів навантажень, що відповідають утворенню мікротріщин і формуванню макротріщин. У розрахунок введено параметр, який дозволяє характеризувати можливість бетону протидіяти статичним мало цикловим навантаженням. Запропонована методика розрахунку узгоджена з положеннями Eurocode 2. Запропоновано опис трансформованої діаграми деформування бетону при малоцикловому навантаженні, що відображає вплив мало циклових навантажень на міцнісні та деформаційні властивості бетону.*

***Summary.** Reconstruction of old buildings and structures is relevant in connection with the great physical and moral deterioration of their building structures. The consideration of low-cycle loading is relevant for public and industrial buildings, where the level of load on load-bearing building structures does not remain constant over time.*

From literary sources it is known that loading with a number of cycles up to $2 \cdot 10^6$ refers to low-cycle loading.

This article presents new dependences are given for determining the load levels corresponding to the microcracks and macrocracks formation. The proposed formulas can be applied to concretes of various classes in terms of compressive strength, as well as for concrete of various types with their corresponding modification.

The parameter k_{cr} was introduced into the calculation, which allows us to characterize the ability of concrete to resist the action of static low-cycle loads: the higher the coefficient k_{cr} , the less the effect of static low-cycle loading on the strength and deformation characteristics of concrete. The proposed calculation procedure is harmonized with the provisions of Eurocode 2.

According to the results of empirical studies the coefficient $k_{c,p}$ for claydite concrete was introduced for the first time. The one establishes the effect of the density of claydite concrete on the crack formation limits values.

A description of the transformed strain diagram under low-cycle loading is proposed. The transformed strain diagram takes into account the effect of low-cycle loads on the strength and deformation properties of concrete.

In the case of calculating the strengthened bending elements the negative effect of low-cycle loading on the compressed zone concrete strength in stage before strengthening can be taken into account.

Ключевые слова: *изгибаемый элемент, железобетон, малоцикловое нагружение, пределы микротрещинообразования, трансформированная диаграмма*

Ключові слова: *елемент, що згинається, залізобетон, малоциклове навантаження, межі мікротріщиноутворення, трансформована діаграма.*

Keywords: *flexible element, reinforced concrete, low-cycle loading, microcracking limits, transformed diagram.*

Постановка проблемы и критический обзор литературных источников

Реконструкция зданий и сооружений старой застройки актуальна в связи с их физическим и моральным износом. В случае необходимости усиления изгибаемых железобетонных элементов часто применяемым методом является усиление набетонкой в сжатой зоне, поскольку это способ прост в технологическом исполнении и не требует больших трудовых и финансовых затрат. Возможность применения данного способа обоснована также тем фактом, что колонны и стены реконструируемых зданий имеют, как правило, значительный запас по несущей способности и могут воспринять дополнительную нагрузку [1–4].

Учет действия малоциклового нагружения актуален для общественных и промышленных зданий, где уровень нагрузки на несущие строительные конструкции не остается постоянным во времени. К малоцикловым относятся нагрузки, вызывающие в элементе ступенчатое изменение во времени усилий, включая полную разгрузку, в том числе возникновение знакопеременных напряжений. Такая нагрузка считается

статической, однако длительность каждой фазы цикла исчисляется в сутках, что достаточно для ощутимого влияния на работу бетона и железобетонной конструкции в целом. В частности, малоцикловыми считаются нагружения с числом циклов до $2 \cdot 10^6$ [5].

Одним из параметров, характеризующим работу бетона под нагрузкой, является формирование микро- и макротрещин. Важно с достаточной достоверностью определить верхнюю границу микротрещинообразования (т. н. критическую границу), т. к. при превышении этой границы образуются макротрещины и начинается необратимый процесс разрушения даже при сохранении текущего уровня нагрузки (третья стадия напряженно-деформированного состояния). Для несущих конструкций достижение критической границы приводит не только к исчерпанию несущей способности, но влечет изменение некоторых других параметров. Например, в [6] доказано, что при превышении верхнего предела образования микротрещин стойкость бетона к воздействию хлоридов резко уменьшается, но практически не изменяется при уровне нагружения, близком к критической границе, но не превышающем ее.

Однако в настоящее время расчетными методиками не учтено влияние малоцикловых нагрузок на работу усиленных набетонкой изгибаемых элементов.

Цель и задачи исследования

Целью проводимых исследований является усовершенствование методики расчета изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных набетонкой в сжатой зоне, с учетом действия статических малоцикловых нагрузок.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- проведены испытания опытных образцов в виде цилиндров, призм и кубов для определения прочностных и деформативных характеристик исследуемых видов бетона (традиционный бетон на плотных заполнителях, керамзитобетон);

- выведены эмпирические зависимости для определения пределов микротрещинообразования для исследованных видов бетона;

- проведены испытания опытных образцов в виде балок, усиленных набетонкой в сжатой зоне, при статическом однократном и малоцикловом нагружениях;

- установлено влияние режима нагружения на несущую способность балок, учтено влияние малоциклового нагружения в предыстории работы конструкции (до усиления);

- получены трансформированные диаграммы деформирования бетона (обычного бетона, сталефибробетона, керамзитобетона), отражающие изменение прочностных и деформативных характеристик бетона при статических малоцикловых нагрузках различных уровней;

– на основе трансформированных диаграмм усовершенствована модель расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных набетонкой в сжатой зоне, при малоцикловом нагружении.

Основные научные результаты

Эмпирически установлено, что между относительными значениями нижнего (η_{crc}^0) и верхнего (η_{crc}^v) пределов микротрещинообразования существует линейная зависимость. Отношение значения уровня нагрузки, соответствующего образованию микротрещин (η_{crc}^0), к значению уровня нагрузки, соответствующего формированию макротрещин (η_{crc}^v), является величиной постоянной и не зависит от вида бетона и его класса по прочности на сжатие [7]:

$$\eta_{\text{crc}}^0 / \eta_{\text{crc}}^v = \text{const.} \quad (1)$$

Величина отношения $\eta_{\text{crc}}^0 / \eta_{\text{crc}}^v$ для исследованных видов бетона может быть принята [8]:

– 0,67 – для обычного бетона;

– 0,70 – для сталефибробетона (с применением фибры «Vulkan Narex»);

– 0,73 – для бетона на основе отходов литейно-металлургических производств (ОМП-бетона).

На основании величины $\eta_{\text{crc}}^0 / \eta_{\text{crc}}^v$ впервые введен эмпирический коэффициент k_{crc} , учитывающий вид бетона и плотность заполнителей:

$$k_{\text{crc}} = k_{\text{c,p}} \cdot \frac{\eta_{\text{crc}}^0}{\eta_{\text{crc}}^v}, \quad (2)$$

где $k_{\text{c,p}}$ – коэффициент, учитывающий плотность бетона:

– для бетонов на плотных заполнителях $k_{\text{c1}} = 1$;

– для керамзитобетона на основе проведенных экспериментальных исследований выведена формула для расчета коэффициента k_{c1} в зависимости от параметра ($\rho/2200$) [9]:

$$k_{\text{c,p}} = 2,075 - 1,1 \cdot \frac{\rho}{2200}, \quad (3)$$

где ρ – расчетная плотность легкого бетона, принимаемая по классу плотности [9, таблица 11.1], в кг/м^3 .

Для определения относительных значений пределов микротрещинообразования предложены следующие эмпирические зависимости:

$$\eta_{\text{crc}}^0 = \frac{f_{\text{crc}}^0}{f_{\text{cm}}} = 0,33 k_{\text{crc}} \ln \frac{f_{\text{cm}}}{f_{\text{cm},0}} - 0,15; \quad (5)$$

$$\eta_{\text{крс}}^v = \frac{f_{\text{крс}}^v}{f_{\text{см}}} = 0,33k_{\text{крс}} \ln \frac{f_{\text{см}}}{f_{\text{см},0}} + 0,1, \quad (6)$$

где $f_{\text{см}}$ – средняя прочность бетона, МПа;

$f_{\text{см},0}$ – единичное значение средней прочности бетона, $f_{\text{см},0} = 1$ МПа.

Отличие предлагаемых формул от традиционно применяемых [10] заключается в использовании для расчета натурального логарифма вместо десятичного и введении эмпирического коэффициента $k_{\text{крс}}$, учитывающего вид бетона. Это делает формулы универсальными и применимыми для бетона разных видов и классов.

Коэффициент $k_{\text{крс}}$ может служить критерием малоциклового приспособляемости бетона: чем выше значение данного коэффициента, тем меньшее влияние оказывает действие статической малоцикловой нагрузки.

Для учета изменения прочностных и деформативных характеристик бетона при действии малоцикловой нагрузки предложено использовать полную трансформированную диаграмму деформирования бетона [11], на основании которой можно производить расчет сопротивления сечений, нормальных к продольной оси железобетонного изгибаемого элемента (без усиления или усиленного).

Трансформирование диаграммы основано на уточнении значений ее параметрических точек (рисунок 1).

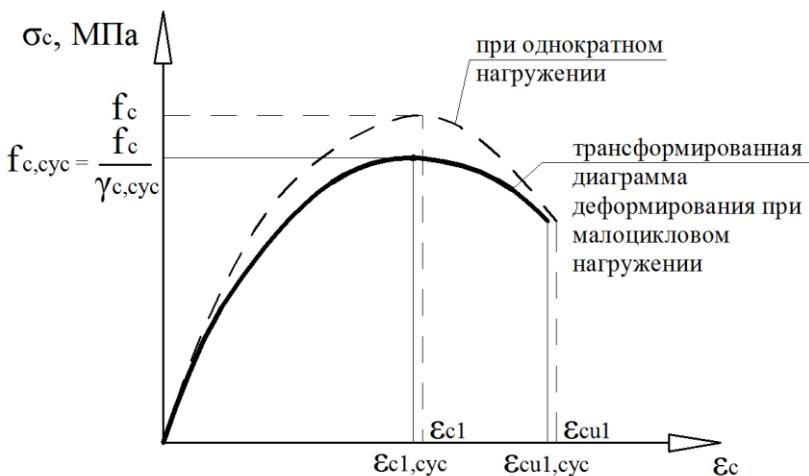


Рис. 1. Трансформированная диаграмма деформирования бетона при малоцикловом нагружении

Корректировки параметрических точек диаграммы (f_c , ϵ_{c1} , ϵ_{cu}) производится путем введения частных эмпирических коэффициентов.

Частный коэффициент $\gamma_{c,cyc}$, учитывающий изменение прочности бетона, определяется исходя из расчетных значений верхнего предела микротрещинообразования и прогнозируемого верхнего уровня нагружения η_{top} (при $\eta_{top} < 1,0$):

$$\gamma_{c,cyc} = \frac{1}{0,97\sqrt{\eta_{trc}^v} - 0,3\ln\eta_{top}}. \quad (7)$$

Тогда малоцикловая прочность бетона:

$$f_{c,cyc} = \frac{f_c}{\gamma_{c,cyc}}. \quad (8)$$

Относительные деформации $\epsilon_{c1,cyc}$, соответствующие пиковой точке трансформированной диаграммы деформирования, определяются по расчетному значению малоцикловой прочности бетона согласно методике [9]:

$$\epsilon_{c1,cyc} = 0,7f_{c,cyc}^{0,31} \leq 2,8\%. \quad (7)$$

Предельные деформаций бетона при малоцикловом нагружении $\epsilon_{cu,cyc}$ предложено определять следующим образом:

$$\epsilon_{cu,cyc} = \left(1 + \frac{20}{f_{c,cyc}}\right) \cdot \epsilon_{c1,cyc} \leq 3,5\%. \quad (8)$$

В формулах (7) и (8) $f_{c,cyc}$ – в МПа.

Среднее значение секущего модуля деформаций бетона при малоцикловом нагружении $E_{cm,cyc}$ (в ГПа) зависит от верхнего уровня нагружения η_{top1} , имевшего место на начальном этапе нагружения (на 1–3 циклах), и малоцикловой прочности бетона $f_{c,cyc}$ (в МПа):

$$E_{cm,cyc} = \frac{55f_{c,cyc}}{19 + \eta_{top1}f_{c,cyc}}. \quad (9)$$

Таким образом, трансформированная диаграмма деформирования бетона описывается уравнением, приведенным в действующих ТНПА:

$$\frac{\sigma_{c,cyc}}{f_{c,cyc}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}, \quad (7)$$

где

$$k = 1,05E_{cm,cyc} \frac{\epsilon_{c1,cyc}}{f_{c,cyc}}. \quad (11)$$

Несущая способность железобетонных изгибаемых элементов, усиленных набетонкой, зависит от предыстории нагружения (режима нагружения до усиления).

При расчете сопротивления сечений, нормальных к продольной оси железобетонного элемента, усиленного набетонкой, предыстория нагружения учитывается уточнением прочностных характеристик бетона усиливаемого образца в зависимости от режима предварительного нагружения:

$$f'_{c,cyc} = \frac{f'_c}{\gamma_{c,cyc}}, \quad (12)$$

где f'_c – сопротивление бетона усиливаемой конструкции до усиления (согласно результатам инструментального обследования или проектным данным);

$f'_{c,cyc}$ – сопротивление бетона усиливаемой конструкции до усиления с учетом влияния малоциклового нагружения.

Если усиление производится под нагрузкой, необходимо учитывать тот факт, что при проценте армирования, близком к проценту армирования большинства используемых на практике плит покрытий и перекрытий, нагрузка, действующая на конструкцию к моменту усиления, практически не влияет на несущую способность усиленной конструкции [12]. Однако в некоторых случаях при усилении под нагрузкой ее необходимо учитывать. К моменту усиления конструкция находится в определенном напряженно-деформированном состоянии, и в бетоне сжатой зоны имеют место начальные напряжения σ_{c0} , определяемые из условия равновесия внешних и внутренних усилий (эпюра в сжатой зоне принимается в виде треугольника):

$$\sigma_{c0} = \frac{M_{Ed0}}{A_{st} \alpha_m \left(d - \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha_m A_{st}}{b} \right)}. \quad (13)$$

Выводы

1. В результате исследования предложены новые зависимости для определения уровней нагрузок, соответствующих образованию микротрещин и формированию макротрещин. Предложенные формулы могут быть применены для бетонов различных классов по прочности на сжатие, а также для бетонов разных видов при соответствующей их модификации.

2 Коэффициент $k_{cr,c}$ может использоваться для характеристики малоциклового приспособляемости бетона: чем выше значение коэффициента $k_{cr,c}$, тем выше малоцикловая приспособляемость (т. е. менее существенно влияние малоциклового нагружения на прочность и деформативность бетона).

2. Для керамзитобетона по результатам эмпирических исследований впервые введен коэффициент $k_{c,p}$, устанавливающий влияние плотности керамзитобетона на величины пределов трещинообразования.

3. Трансформированная диаграмма деформирования позволяет учитывать влияние малоциклового нагружения на прочностные и деформативные свойства бетона.

4. Расчет на основе трансформированных диаграмм деформирования может быть произведен по любой расчетной модели согласно предпочтениям проектировщика. В случае расчета изгибаемых элементов, усиленных методом набетонки, может быть учтено негативное влияние малоциклового нагружения на прочность бетона сжатой зоны в процессе эксплуатации до усиления.

5. Предлагаемая методика расчета гармонизирована с положениями Eurocode 2.

References

1. Rekonstrukciya i obnovlenie slozhivshejsya zastrojki goroda / Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov. Pod obshch. red. P. G. Grabovogo, V. A. Haritonova. – M.: Izd-va «ASV» i «Realproekt», 2006. – 623 s., s ill.

2. Afanas'ev, A. A. Rekonstrukciya zhilyh zdaniy. CHast' I. Tekhnologii vosstanovleniya ekspluatacionnoj nadezhnosti zhilyh zdaniy / A. A. Afanas'ev, E. P. Matveev. – Moskva: OAO «СPP», 2008. – 234 s.

3. Kustikova, YU. O. Priemy rekonstrukcii sohranyaemogo zhilogo fonda / YU. O. Kustikova, A. S. Matushkina // Vestnik MGSU. – T. 12, vyp. 10 (109). – 2017. – S. 1090–1095.

4. CHazova, O. L. Problema snosa zhil'ya pervyh massovyh serij pri kompleksnoj rekonstrukcii zhiloy zastrojki / O. L. CHazova // Tavricheskij nauchnyj obozrevatel'. – № 4. – 2015. – S. 95–97.

5. Babich E. M. Betonni ta zalizobetonni elementi v umovah malociklovih navantazhen': monografiya / E. M. Babich, YU. O. Krus'. – Rivne : Vid-vo RDTU, 1999. – 119 s.

6. Lim, C. C. Microcracking and chloride permeability of concrete under uniaxial compression / C. C. Lim, N. Gowripalan, V. Sirivivatnanon / Cement and Concrete Composites. – Vol. 22, Issue 5. – 2000. – Pp. 353–360.

7. Semenyuk, S. D. Prochnost' i deformativnost' izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov, usilennyh narashchivaniem szhatoy zony, pri staticheskom i malociklovom nagruzheniyah: monografiya / S. D. Semenyuk, YU. G. Moskal'kova. – Mogilev: Belarus.-Ros. un-t, 2017. – 274 s.

8. Semenyuk, S. D. Svravnenie raznyh metodik opredeleniya granic mikrotreshchinoobrazovaniya / S. D. Semenyuk, YU. G. Moskal'kova // Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij. Construction of Unique Buildings and Structures. – Sankt-Peterburg, 2018. – № 7 (70). – S. 22–30.

9. Evrokod 2. Proektirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij. CH. 1-1. Obshchie pravila i pravila dlya zdaniy: TKP EN 1992-1-1-2009. – Vved. 01.01.10. – Minsk: Minstrojarhitektury RB, 2015. – 206 s.

10. Berg O. YA. Fizicheskie osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona / O. YA. Berg. – М.: Gosstrojizdat, 1962. – 96 s.
11. Tur V. V. Prochnost' i deformacii betona v raschetah konstrukcij: monogr. / V. V. Tur, N. A. Rak. – Brest: Izd. BrGTU, 2003. – 252 s.
12. Kremneva E. G. Prochnost' normal'nyh sechenij izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov, usilennyh namonolichivaniem pod nagruzkoy: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.01 / E. G. Kremneva; CNIIpromzdaniy.– М., 1996. – 22 s.

Список использованной литературы

1. Реконструкция и обновление сложившейся застройки города / Учебное пособие для студентов вузов. Под общ. ред. П. Г. Грабового, В. А. Харитоновой. – М.: Изд-ва «АСВ» и «Реалпроект», 2006. – 623 с., с илл.
2. Афанасьев, А. А. Реконструкция жилых зданий. Часть I. Технологии восстановления эксплуатационной надежности жилых зданий / А. А. Афанасьев, Е. П. Матвеев. – Москва: ОАО «ЦПП», 2008. – 234 с.
3. Кустикова, Ю. О. Приемы реконструкции сохраняемого жилого фонда / Ю. О. Кустикова, А. С. Матушкина // Вестник МГСУ. – Т. 12, вып. 10 (109). – 2017. – С. 1090–1095.
4. Чазова, О. Л. Проблема сноса жилья первых массовых серий при комплексной реконструкции жилой застройки / О. Л. Чазова // Таврический научный обозреватель. – № 4. – 2015. – С. 95–97.
5. 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.
6. Lim, C. C. Microcracking and chloride permeability of concrete under uniaxial compression / C. C. Lim, N. Gowripalan, V. Sirivivatnanon / Cement and Concrete Composites. – Vol. 22, Issue 5. – 2000. – Pp. 353–360.
7. Семенюк, С. Д. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при статическом и малоцикловом нагружении: монография / С. Д. Семенюк, Ю. Г. Москалькова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 274 с.
8. Семенюк, С. Д. Сравнение разных методик определения границ микротрещинообразования / С. Д. Семенюк, Ю. Г. Москалькова // Строительство уникальных зданий и сооружений. Construction of Unique Buildings and Structures. – Санкт-Петербург, 2018. – № 7 (70). – С. 22–30.
9. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1-2009. – Введ. 01.01.10. – Минск: Минстройархитектуры РБ, 2015. – 206 с.
10. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – М.: Госстройиздат, 1962. – 96 с.
11. Тур В. В. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций: моногр. / В. В. Тур, Н. А. Рак. – Брест: Изд. БрГТУ, 2003. – 252 с.
12. Кремнева Е. Г. Прочность нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных намоноличиванием под нагрузкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Е. Г. Кремнева; ЦНИИПромзданий.– М., 1996. – 22 с.