

**ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ,  
УСИЛЕННЫХ НАБЕТОНКОЙ В СЖАТОЙ ЗОНЕ,  
ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ**

**Семенюк С.Д.**, д.т.н., профессор,  
**Москалькова Ю.Г.**, к.т.н., доцент,  
*Белорусско-Российский университет*  
julia43@tut.by

**Аннотация.** В статье приведены основные положения методики расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных увеличением поперечного сечения в сжатой зоне, с учетом действия статических малоцикловых нагрузок разных уровней с использованием трансформированных диаграмм деформирования бетона сжатой зоны. Трансформированные диаграммы деформирования получены по результатам экспериментальных исследований, проводимых на базе Белорусско-Российского университета в рамках государственной программы. Расчет основан на методе предельных усилий с использованием билинейной диаграммы деформирования бетона сжатой зоны (эпюра напряжений в сжатой зоне принимается в виде прямоугольной трапеции).

**Ключевые слова:** поверочный расчет, усиление, изгибаемый элемент, малоцикловое нагружение.

**ПЕРЕВІРОЧНИЙ РОЗРАХУНОК ЗГІНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ,  
ПІДСИЛЕНИХ НАБЕТОНКОЮ В СТИСНУТІЙ ЗОНІ,  
ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

**Семенюк С.Д.**, д.т.н., професор,  
**Маскалькова Ю.Г.**, к.т.н., доцент,  
*Білорусько-Російський університет*  
julia43@tut.by

**Анотація.** У статті наведені основні положення методики розрахунку згинальних залізобетонних елементів, підсилених збільшенням поперечного перерізу в стиснутій зоні, з урахуванням дії статичних малоциклових навантажень різних рівнів з використанням трансформованих діаграм деформування бетону стиснутої зони. Трансформовані діаграми деформування отримані за результатами експериментальних досліджень, проведених на базі Білорусько-Російського університету в рамках державної програми. Розрахунок заснований на методі граничних зусиль з використанням білінійної діаграми деформування бетону стиснутої зони (епюра напружень у стиснутій зоні приймається у вигляді прямокутної трапеції).

**Ключові слова:** перевірочний розрахунок, посилення, згинальний елемент, малоциклове навантаження.

**STRUCTURAL RE-ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE  
FLEXURAL STRUCTURES, STRENGTHENING BY ADDITION OF CONCRETE  
LAYER, UNDER LOW-CYCLE LOADING**

**Semenyuk S.D.**, Doctor of Engineering, Professor,  
**Maskalkova Yu.G.**, PhD., Assistant Professor,  
*Belorussian-Russian University*



**Abstract.** Studies of concrete behavior for normal concrete, steel fiber concrete and expanded clay concrete (in view of the increasing importance of structural lightweight concrete) under static loading (single and low cycle loading) are conducted within the framework of the state program of scientific research in the field of “Building Materials and Technologies” at the Belarusian-Russian University. The purpose of the research is to develop the National Annex to Eurocode 2 and recommendations for reconstruction of buildings and structures. The research director is S. D. Semenyuk, Doctor of Engineering Science, Professor, the responsible person is Yu. G. Maskalkova, Ph.D. (Engineering), Associate Professor (the authors of the article).

The paper presents the basic principles of design of the reinforced concrete flexural structure, strengthening by addition of concrete layer, taking into account the static low-cycle loading of different levels using the transformed stress-strain relation for concrete in compressive zone. The calculation is based on limit stress method using bi-linear stress-strain relation for concrete in compression (rectangular trapezoid stress distribution across the compression zone of cross-section).

**Keywords:** structural re-analysis, strengthening, flexural structure, low-cycle loading.

**Введение.** Железобетонные элементы зданий и сооружений существующей застройки зачастую перестают удовлетворять предъявляемым к ним эксплуатационным требованиям. Общей тенденцией на сегодняшний день является сокращение объемов нового строительства и увеличение работ по реконструкции, что позволяет снизить долю капитальных вложений. Вопрос восстановления дефектных конструкций может быть решен путем их ремонта или усиления [1, 2]. При этом мероприятия по усилению должны быть простыми и экономичными, с минимальными трудозатратами.

Широко распространенным способом усиления плитных конструкций является наращивание сечений набетонкой в сжатой зоне. Этот простой метод применяется очень давно. Его эффективность заключается в использовании поверхности усиливаемой конструкции в виде несъемной опалубки, что уменьшает трудоемкость работ и позволяет сократить сроки проведения реконструкции на действующих объектах.

Усиление наращиванием в сжатой зоне имеет ряд особенностей: реконструируемые элементы состоят из бетонов с различными прочностными и деформационными характеристиками, работающих совместно; усиливаемый элемент имеет собственное напряженно-деформированное состояние, обусловленное предысторией его эксплуатации; напряженно-деформированное состояние усиливаемых конструкций зависит от режимов нагружения и реологических свойств материалов.

**Анализ последних исследований.** Неодновременное вступление в работу различных бетонов, составляющих поперечное сечение усиленных элементов, приводит к изменению области совместного деформирования, что отражается на дальнейшей работе конструкции под нагрузкой. Прочность и деформативность усиленных железобетонных изгибаемых конструкций зависит от знака, уровня, режима, продолжительности предшествующего нагружения и нагружения после усиления [3-6].

Среди силовых воздействий на железобетонные конструкции в отдельную группу можно выделить статические малоцикловые многократно повторяющиеся нагрузки, которые возникают в процессе эксплуатации практически всех конструкций. К малоцикловым относятся нагружения с количеством циклов  $n < 2 \cdot 10^6$  (в том числе с количеством циклов 10–500) [7].

**Цель и задачи исследования.** Исследования проведены в Белорусско-Российском университете в рамках государственной программы научных исследований по направлению «Строительные материалы и технологии» на тему «Разработка методики расчета и конструирования железобетонных конструкций при статическом малоцикловом нагружении из обычного и легкого бетонов, усиленных набетонкой, в соответствии с ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250) и рекомендаций при реконструкции зданий и сооружений» (ГБ 1621ф).



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

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: разработаны методика, программа и проведены испытания опытных балок, усиленных наращиванием сжатой зоны, при малоцикловом нагружении, в результате которых установлено влияние режима нагружения на несущую способность балок, учтено влияние малоциклового нагружения в предыстории работы конструкции; 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.

**Научные результаты.** На основании экспериментальных данных установлено, что между значениями относительных нагрузок для верхнего и нижнего пределов микротрещинообразования существует линейная зависимость. Отношение значения уровня нагрузки, соответствующего нижней границе микротрещинообразования, к значению уровня нагрузки, соответствующего верхней границе, остается постоянным независимо от класса бетона [8]:

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

Величина отношения  $\frac{\eta_{\text{crc}}^0}{\eta_{\text{crc}}^{\text{v}}}$  может быть принята для традиционного тяжелого<sup>1</sup> бетона

$$\frac{\eta_{\text{crc}}^0}{\eta_{\text{crc}}^{\text{v}}} \approx 0,67.$$

Эмпирический коэффициент  $k_{\text{crc}}$ , принятый на основании значения  $\frac{\eta_{\text{crc}}^0}{\eta_{\text{crc}}^{\text{v}}}$ , может быть использован при расчете сопротивления сечений бетонных и железобетонных конструкций:

$$k_{\text{crc}} = k_{\text{c1}} \cdot \frac{\eta_{\text{crc}}^0}{\eta_{\text{crc}}^{\text{v}}}. \quad (2)$$

В формулу (2) введен коэффициент  $k_{\text{c1}}$ , значение которого для обычного бетона  $k_{\text{c1}} = 1,0$  (этот эмпирический коэффициент введен для того, чтобы сделать формулу универсальной и применимой для бетонов разных видов: например, согласно полученным экспериментальным данным для керамзитобетона  $k_{\text{c1}} \approx 1,2$ ).

Таким образом, согласно формуле (1) получаем для обычного бетона:  $k_{\text{crc}} = 1,0 \cdot 0,67 = 0,67$ .

Определение относительных значений нагрузок, соответствующих верхнему и нижнему пределам микротрещинообразования, производится по формулам (3) и (4), в которых помимо прочности бетона учтен также вид бетона (в отличие от зависимостей, предложенных О. Я. Бергом [9]):

$$\eta_{\text{crc}}^0 = \frac{f_{\text{crc}}^0}{f_{\text{cm}}} = 0,33k_{\text{crc}} \ln \frac{f_{\text{cm}}}{f_{\text{cm},0}} - 0,15; \quad (3)$$

$$\eta_{\text{crc}}^{\text{v}} = \frac{f_{\text{crc}}^{\text{v}}}{f_{\text{cm}}} = 0,33k_{\text{crc}} \ln \frac{f_{\text{cm}}}{f_{\text{cm},0}} + 0,1, \quad (4)$$

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

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

<sup>1</sup> Для нормального бетона согласно классификации EN 206-1.

Использование в формулах (3), (4) натурального логарифма вместо десятичного [9] позволяет рассчитывать  $\eta_{cr}^v$  и  $\eta_{cr}^0$  в более широком диапазоне прочностей, а введение эмпирического коэффициента  $k_{cr}$  делает предложенные зависимости универсальными и применимыми для бетонов разных видов (помимо обычного бетона были исследованы также керамзитобетон [10], сталефибробетон, бетон с использованием ваграночного шлака в качестве мелкого заполнителя [8]).

Расчет сопротивления сечений, нормальных к продольной оси железобетонного изгибаемого элемента (усиленного и без усиления), может быть произведен на основании трансформированной диаграммы деформирования бетона, отражающей влияние малоциклового нагружения на прочностные и деформативные свойства бетона (рис. 1).

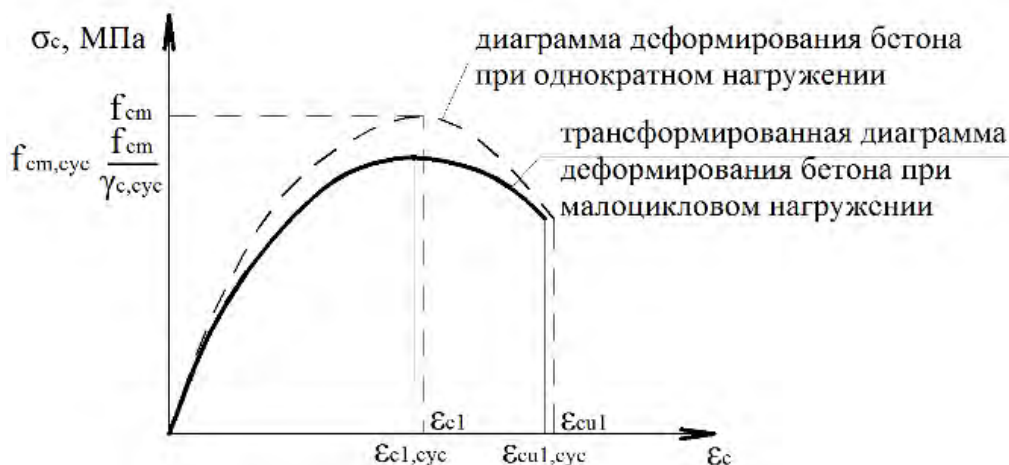


Рис. 1. Трансформированная диаграмма деформирования бетона при малоцикловом нагружении

Описание трансформированных диаграмм деформирования бетона основано на следующем подходе: характер диаграммы деформирования бетона не изменяется, а возникает необходимость корректировки ее базовых параметрических точек ( $f_{cm}$ ,  $\epsilon_{c1}$ ,  $\epsilon_{cu}$ ) путем введения частных коэффициентов, полученных эмпирическим путем [11]. Для корректировки значения прочности бетона предложен частный коэффициент  $\gamma_{c,сус}$ , учитывающий неблагоприятное воздействие малоциклового нагружения:

$$\gamma_{c,сус} = \frac{1}{0,97\sqrt{\eta_{cr}^v} - 0,3\ln\eta_{top}}. \quad (5)$$

Данная зависимость обеспечивает удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными (в пределах 15 %).

Соответственно, малоцикловая прочность бетона определяется по формуле:

$$f_{cm,сус} = \frac{f_{cm}}{\gamma_{c,сус}}. \quad (6)$$

Относительные деформации  $\epsilon_{c1,сус}$ , соответствующие пиковой точке трансформированной диаграммы деформирования бетона:

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

При анализе эмпирических данных различных исследователей в работе [12] зависимость для определения предельных деформаций бетона представлена исходя из соотношения между относительными деформациями  $\epsilon_{cu}/\epsilon_{c1}$  в виде:

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

Модуль упругости бетона зависит от верхнего уровня нагружения  $\eta_{top1}$ , имевшего место на первых 1–3 циклах, и малоциклового прочностного бетонной матрицы:

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

Среднее отклонение расчетных значений, полученных по формуле (5), от опытных находится в пределах 15 %.

Таким образом, трансформированная диаграмма деформирования бетона (рис. 1) описывается уравнением:

$$\frac{\sigma_{c,cyc}}{f_{cm,cyc}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}, \quad (10)$$

где

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

Все предложенные зависимости хорошо согласуются с опытными данными и по мере накопления экспериментальных данных могут уточняться.

Несущая способность железобетонных изгибаемых элементов, усиленных набетонкой, зависит от предыстории нагружения.

Если до усиления конструкция была подвержена воздействию внешних нагрузок, то прочностные и деформативные характеристики бетона сжатой зоны усиливаемой конструкции могут измениться.

Сопротивление нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, может быть с достаточной точностью рассчитано по упругопластической модели (трапецеидальная эпюра напряжений в бетоне сжатой зоны) с учетом изменения прочностных характеристик бетона при действии малоциклового нагружения: напряжения в бетоне сжатой зоны определяются с учетом частного коэффициента  $\gamma_{c,cyc}$ , вид бетона учитывается коэффициентом  $k_{срс}$ .

Переход от среднего значения прочностных характеристик бетона  $f_{cm}$  к расчетной прочностной характеристике  $f_{cd}$  осуществляется согласно [13].

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

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

где  $f'_{cd}$  – расчетное сопротивление бетона усиливаемой конструкции до усиления (согласно проектным данным);

$f'_{cd,cyc}$  – расчетное 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 [14].

Однако в некоторых случаях при усилении под нагрузкой ее необходимо учитывать. Так, следует учитывать собственный вес  $g_k$  усиливаемой конструкции и, например, вес технологического оборудования  $p_k$ . Т. е. к моменту усиления на усиливаемую конструкцию действует нагрузка  $p_0 = g_k + p_k$ , и в бетоне сжатой зоны возникают напряжения  $\sigma_{c0}$ . Тогда расчетное сопротивление бетона усиливаемой конструкции после усиления на границе контакта:





$$f'_{cd,cyc} = \frac{f'_{cd}}{\gamma_{c,cyc}} + \sigma_{c0}. \quad (13)$$

Начальные напряжения  $\sigma_{c0}$  определяются из условия равновесия внешних и внутренних усилий (эпюра в сжатой зоне от нагрузки  $p_0$  принимается в виде треугольника) и могут быть определены по формуле:

$$\sigma_{c0} = \frac{M_{Ed0}}{A_{st} \alpha_m \left( d - \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha_m A_{st}}{b} \right)}. \quad (14)$$

Расчет усиленной наращиванием конструкции производится по следующим характеристикам:

$$\text{– для бетона усиливаемой конструкции: } f_{cd,cyc} = \frac{f'_{cd,cyc}}{\gamma_{c,cyc}}, \quad E_{cd,cyc} = \frac{55f_{cd,cyc}}{19 + \eta_{top1} f_{cd,cyc}};$$

$$\text{– для бетона усиления: } f_{cd,ad,cyc} = \frac{f_{cd,ad}}{\gamma_{c,cyc}}, \quad E_{cd,ad,cyc} = \frac{55f_{cd,ad,cyc}}{19 + \eta_{top1} f_{cd,ad,cyc}}.$$

В случае, если нейтральная линия проходит в бетоне усиления, элемент рассчитывается как состоящий из бетона одного вида и класса (бетона усиления с прочностью  $f_{c,cyc,ad}$ ), если в бетоне основной конструкции – по приведенной прочности  $f_{c,cyc,red}$ , вычисляемой по формуле:

$$f_{cd,cyc,red} = f_{cd,cyc} \left( 1 - \frac{S_{ad}}{S} \right) + f_{cd,cyc,ad} \frac{S_{ad}}{S}. \quad (15)$$

В этом случае модуль упругости бетона:

$$E_{cd,cyc,red} = \frac{55f_{cd,cyc,red}}{19 + \eta_{top1} f_{cd,cyc,red}}. \quad (16)$$

Величина коэффициентов пластичности для бетона усиливаемой конструкции  $\lambda_c$  и бетона усиления  $\lambda_{c,ad}$  рассчитываются в зависимости от значений расчетных сопротивлений  $f_{cd,cyc}$  и  $f_{cd,cyc,ad}$ . Величина приведенного коэффициента пластичности  $\lambda_{c,red}$  для бетона может быть определена по формуле:

$$\lambda_{c,red} = 0,97 - 0,0077f_{cd,cyc,red}. \quad (17)$$

В упругопластической модели при расчете сечений, нормальных к продольной оси элемента, квадратное уравнение типа  $A_1 \cdot X_c^2 + A_2 \cdot X_c + A_3 = 0$  получено путем расчета напряжений в растянутой  $\sigma_s$  и сжатой  $\sigma_{sc}$  арматуре по формулам, приведенным в [15, 16]. При этом результаты расчета балок, испытанных малоцикловым нагружением, могут оказаться некорректными, т. к. явление наклепа, возникающее в рабочей арматуре, компенсирует действие малоциклового нагружения [17, 18]. Поэтому для переармированных сечений в случае, если расчетное напряжение в арматуре превышает предел текучести ( $\sigma_s > f_{yd}$ ), лучше использовать прямой расчет, принимая  $\sigma_s = f_{yd}$ :

$$N_c + N_{sc} = N_s \Rightarrow X_c = \frac{f_{yd} A_{st} - \sigma_{sc} A_{sc}}{0,5f_{cd,red} b(1 + \lambda_{c,red})}. \quad (18)$$

На рис. 2 представлена схема внутренних усилий в сечении изгибаемого элемента, усиленного наращиванием сечения в сжатой зоне.



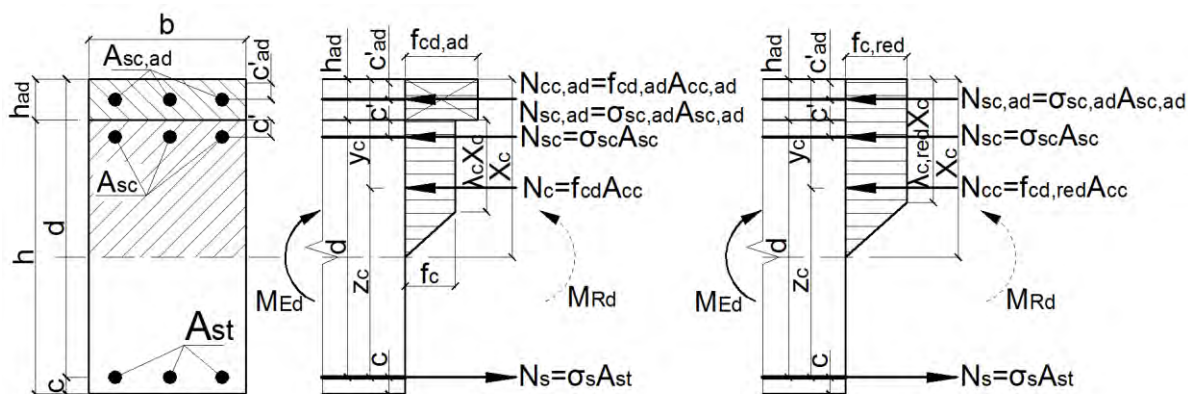


Рис. 2. Схема внутренних усилий в сечении, нормальном к продольной оси элемента, усиленного набетонкой, по методу замещающего (эквивалентного) сечения

Расчетное значение разрушающего момента  $M_{Rd}$ :

– если нейтральная ось проходит в пределах усиления (при  $X_c \leq h_{ad}$ ):

$$M_{Rd} = 0,5f_{cd,ad,cyc} bX_c[(1 + \lambda_{c,ad})d - 0,33X_c(1 + \lambda_{c,ad} + \lambda_{c,ad}^2)] + \sigma_{sc,ad} A_{sc,ad} (d - c'_{ad}), \quad (19)$$

– если нейтральная ось проходит в теле усиливаемой конструкции (при  $X_c > h_{ad}$ ):

$$M_{Rd} = 0,5f_{cd,red,cyc} bX_c[(1 + \lambda_{c,red})d - 0,33X_c(1 + \lambda_{c,red} + \lambda_{c,red}^2)] + \sigma_{sc} A_{sc} (d - h_{ad} - c') + \sigma_{sc,ad} A_{sc,ad} (d - c'_{ad}). \quad (20)$$

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Предложенная методика расчета позволяет производить расчет изгибаемых железобетонных элементов, усиливаемых увеличением поперечного сечения в сжатой зоне, при действии малоцикловых нагрузок различных уровней с применением трансформированных диаграмм деформирования бетона. Расчет основан на методе предельных усилий с использованием билинейной диаграммы деформирования бетона сжатой зоны (эпюра напряжений в сжатой зоне принимается в виде прямоугольной трапеции).

По предложенной методике был выполнен поверочный расчет плиты пустотного настила ПК 60.12-4АтVI (серия 1.141-1.63), усиленной наращиванием сжатой зоны, на действие малоцикловых нагрузок высоких уровней в реконструированном здании неустановленного назначения под торгово-гостиничный комплекс «Измуруд» по ул. Терновского в г. п. Круглое.

## Литература

1. Литвинов И.М. Усиление и восстановление железобетонных конструкций / И. М. Литвинов. – М.-Л.: Стройиздат Наркомстроя, 1942. – 96 с.
2. Семенюк С.Д. Усиление сжатой зоны железобетонных изгибаемых элементов / С. Д. Семенюк, Ю. Г. Болошенко // Проблемы современного бетона и железобетона : сборник трудов. В 2 ч. Ч. 1. Бетонные и железобетонные конструкции. – Мн.: Стринко, 2007. – С. 306 – 321.
3. Астафьев Д.О. Теория и расчет реконструируемых железобетонных конструкций : Автореф. дис... докт. техн. наук : 05.23.01 / Д. О. Астафьев. – С.-Петербург, 1995. – 40 с.
4. Бондаренко В. М. Предыстория и конструктивная безопасность зданий и сооружений / В. М. Бондаренко // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. – 2000. – № 11. – С. 5–59.
5. Колчунов В. И. Расчетная модель для определения трещиностойкости составных железобетонных балок с податливым швом сдвига / В. И. Колчунов, А. И. Никулин // Известия вузов. Строительство. – 2000. – № 10. – С. 8–13.
6. Сапожников П. В. Деформативность и трещиностойкость контактной зоны многослойных бетонных и железобетонных конструкций : Автореф. дисс. ... канд. техн. наук :

05.23.01 / П. В. Сапожников. – Курск, 2002. – 20 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. Москалькова Ю. Г. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при статическом и малоцикловом нагружении : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Ю. Г. Москалькова; Белорусско-Российский университет. – Могилев, 2013. – 199 с.

9. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – М.: Госстройиздат, 1962. – 96 с.

10. Семенюк С. Д. Определение относительных значений нагрузок, соответствующих верхнему и нижнему пределам микротрещинообразования керамзитобетона / С. Д. Семенюк, Ю. Г. Москалькова, И. И. Мельянцова // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: сб. тр. XIX Междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 23–25 октяб. 2014 г. / БрГТУ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест, 2014. – С. 200–205.

11. Семенюк С. Д. Особенности деформирования бетона на основе отходов литейно-металлургических производств при малоцикловом нагружении / С. Д. Семенюк, Ю. Г. Москалькова // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. научн. тр. / Институт БелНИИС; редкол.: М. Ф. Марковский [и др.]. – Минск: СтройМедиаПроект, 2014. – Вып. 8. – С. 283–297.

12. Тур В. В. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций: моногр. / В. В. Тур, Н. А. Рак. – Брест: Изд. БрГТУ, 2003. – 252 с.

13. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250). – Введ. 01.01.2010. – Минск: М-во архит. и строит. РБ, 2010. – 191 с.

14. 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.

15. Голишев О. Б. Курс лекцій з основ розрахунку конструкцій і з опору залізобетону / О. Б. Голишев, А. Н. Бамбура. – К.: Логос, 2004. – 340 с.

16. Семенюк С. Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформируемом основании / С. Д. Семенюк. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2003. – 269 с.

17. Дробышинець С. Я. Вплив повторних малоциклових навантажень на механічні характеристики сталевібробетону та роботу згинальних елементів на його основі: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / С. Я. Дробышинець. – Луцк, 2005. – 174 с.

18. Кухнюк О. М. Вплив малоциклових навантажень на механічні характеристики бетону та роботу згинальних залізобетонних елементів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / О. М. Кухнюк; Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Львів, 2001. – 16 с.

Стаття надійшла 17.10.2017