

УДК 624.012

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ НОРМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УСИЛЕННЫХ НАРАЩИВАНИЕМ СЖАТОЙ ЗОНЫ, НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМИРОВАННЫХ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА

РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ НОРМАЛЬНИХ ПЕРЕРІЗІВ ЗГІНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ПОСИЛЕНИХ НАРОЩУВАННЯМ СТИСНУТОЇ ЗОНИ, НА ОСНОВІ ТРАНСФОРМОВАНИХ ДІАГРАМ ДЕФОРМУВАННЯ БЕТОНУ

THE BENDING REINFORCED CONCRETE NORMAL SECTION ELEMENTS STRENGTH CALCULATION WITH REINFORCED COMPRESSED ZONE BASED ON THE TRANSFORMED STRAIN CONCRETE DIAGRAMS

Болошенко Ю.Г. (Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь)

Болошенко Ю.Г. (Білорусько-Російський університет, м. Могильов, Республіка Білорусь)

Boloshenko Y.G. (Belarusian-Russian University, Mogilev, the Republic of Belarus)

В статье представлены алгоритмы расчета прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, с учетом малоциклового характера нагрузки на основе трансформированных диаграмм деформирования бетона.

У статті представлені алгоритми розрахунку міцності нормальних перерізів згинальних залізобетонних елементів, підсиленних нарощуванням стиснутої зони, з урахуванням малоциклового характеру навантаження на основі трансформованих діаграм деформування бетону.

The article presents the algorithms for calculating the normal sections strength of the bending reinforced concrete elements with the compressed zone reinforced taking into account the nature of low-cycle load with concrete transformed strain diagram at the heart of calculating.

Ключевые слова:

Железобетон, малоцикловой, нагружение, трансформирование, диаграмма деформирования, изгибаемый, усиление, наращивание.

Залізобетон, малоциклової, навантаженне, трансформування, діаграма деформування, згинальний, підсилення, нарощування.

Concrete, low-cycle, loading, transformation, strain diagram, bending, strengthening, capacity.

Исследования работы изгибаемых железобетонных элементов при повторной нагрузке низкой частоты проводились с 1960-х годов и продолжают-ся до сегодняшнего дня. Частным случаем таких режимов нагружения являются нагрузки малоциклового характера. Первыми учеными, исследовавшими работу железобетонных элементов при изгибе и растяжении в условиях действия действия циклического нагружения были De Toli и Consider [1]. В результате более поздних исследований ряда авторов [2-6] были выявлены некоторые особенности работы железобетонных конструкций при малоцикловом нагружении по сравнению с однократным статическим и длительным видами нагружения.

К настоящему времени разработано большое количество теоретических предложений по расчету железобетонных конструкций с учетом нелинейности деформирования бетона, авторами которых предлагается выражать зависимость между напряжениями и деформациями в бетоне в виде различных функций. Фактически закон распределения нормальных напряжений в сжатой зоне изгибаемого железобетонного элемента находится между треугольной и прямоугольной эпюрами, которые соответствуют упругой и пластической работе бетона. Установлению истинной зависимости « $\sigma_c - \varepsilon_c$ » для бетона на сжатие посвящены работы [3-14].

Прочность бетона изменяется 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 [15, 16] 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_{cr}^V и, соответственно, более высокий уровень малоцикловой приспособляемости. Если при определении $\gamma_{c,cyc}$ учесть верхний уровень микротрещинообразования η_{cr}^V , тогда 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 $\eta_{top} < 1.0$:

$$\gamma_{c,cyc} = 0.97 \sqrt{\eta_{cre}^v} - 0.3 \ln \eta_{top} \cdot \quad (1)$$

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

Предложенная зависимость дает достаточную сходимость с экспериментальными данными (максимальное отклонение до 15 %, среднее отклонение до 3 %).

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 могут быть определены относительные деформации $\epsilon_{c1,cyc}$, соответствующие пиковой точке трансформированной диаграммы деформирования бетона (рисунки 1).

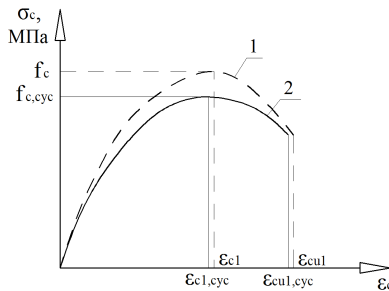


Рис. 1. Трансформированная диаграмма деформирования бетона при малоцикловом нагружении: 1 – диаграмма деформирования бетона при статическом нагружении; 2 – трансформированная диаграмма деформирования бетона при малоцикловом нагружении

В качестве нормативной диаграммы бетона, устанавливающей зависимость между напряжениями и деформациями, принимается нелинейная диа-

грамма 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 [17-20]:

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

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

ε_{c1} – относительная деформация, соответствующая пиковой точке диаграммы деформирования [19, 20];

$$k = \frac{1.1E_{cm} \cdot |\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}}. \quad (3)$$

Автором предложено при действии малоциклового нагружения диаграмму деформирования бетона описывать той же зависимостью с корректировкой значений прочности бетона и относительных деформаций.

Согласно [20] предельные относительные деформации, $\varepsilon_{cu} = 3.5$ ‰, относительные деформации ε_{c1} , соответствующие пиковой точке диаграммы деформирования бетона, автором предложено определять с учетом действия малоциклового характера нагружения по формуле:

$$\varepsilon_{c1} = 0,7 f_{c,cyc}^{0.31} \leq 2,8 \text{ ‰}. \quad (4)$$

Напряжения при разрушающей нагрузке при низких и средних уровнях нагружения 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.

В рекомендациях, разработанных НИИСК [21], связь между напряжениями и деформациями бетона принимается в виде двухлинейной диаграммы, в соответствии с которой эпюра нормальных напряжений в бетоне сжатой зоны в виде прямоугольной трапеции с высотой участка постоянных напряжений равной $\lambda \cdot x$, где x – среднее значение высоты сжатой зоны, λ – коэффициент пластичности бетона (рисунок 2).

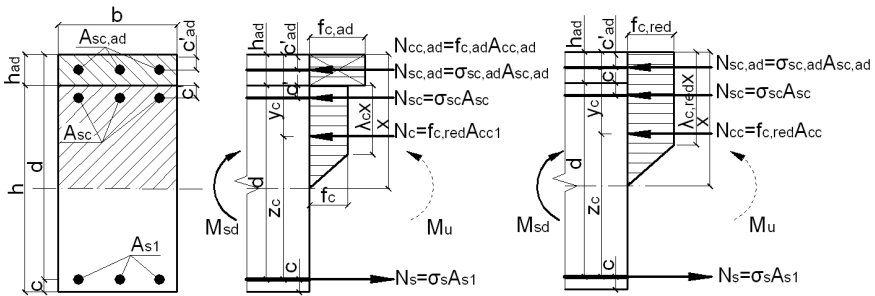


Рис. 2. Схема усилий и эпюра напряжений в нормальном сечении изгибаемого железобетонного элемента при расчете по упругопластической модели

Расчет усиленных наращиванием сжатой зоны железобетонных изгибаемых элементов по упругопластической модели имеет некоторые особенности.

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:

$$f_{c,cyc,red} = f_{c,cyc} \left(1 - \frac{S_{ad}}{S}\right) + f_{c,cyc,ad} \cdot \frac{S_{ad}}{S}. \quad (5)$$

В этом случае модуль упругости бетона приведенной прочности рассчитывается по формуле:

$$E_{c,cyc,red} = \frac{55 f_{c,cyc,red}}{19 + \eta_{top1} f_{c,cyc,red}}. \quad (6)$$

Величина коэффициентов пластичности для бетона усиливаемой конструкции λ_c и бетона усиления $\lambda_{c,ad}$ рассчитываются в зависимости от значений прочности. Величина приведенного коэффициента пластичности λ_{red} для бетона может быть определена по формуле (4) при расчете по результатам испытаний и по формуле (5) при расчете по проектным данным:

$$\lambda_{c,red} = 0,97 - 0,0077 f_{c,cyc,red}, \quad (7)$$

$$\lambda_{c,red} = 0,93 - 0,014 f_{c,cyc,red}. \quad (8)$$

В связи с тем, что в упругопластической модели при расчете нормальных сечений квадратное уравнение типа $A_1 \cdot x^2 + A_2 \cdot x + A_3 = 0$ получено путем замены значений напряжений в растянутой σ_s и сжатой σ_{sc} арматуре, результаты для образцов, испытанных малоцикловым нагружением, могут оказаться некорректными, так как явление наклепа в стали компенсирует действие малоциклового нагружения, что отмечено также в работах [22, 23]. В связи с этим для перearмированных базовых образцов в случае, если расчетное напряжение в арматуре превышает предел текучести ($\sigma_s > f_s$) лучше использовать прямой расчет, принимая $\sigma_s = f_s$:

$$N_c + N_{sc} = N_s \Rightarrow f_{c,red} b x_{eff} \frac{1 + \lambda_{c,red}}{2} + \sigma_{sc} A_{sc} = f_s A_{s1} \Rightarrow x_{eff} = \frac{f_s A_{s1} - \sigma_{sc} A_{sc}}{0.5 f_{c,red} b \cdot (1 + \lambda_{c,red})}. \quad (9)$$

Для усиленных образцов, запроектированных таким образом, чтобы разрушение произошло по растянутой арматуре, если расчет производится по «приведенным» характеристикам в указанной мере необходимости нет.

Прочность нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны при помощи бетонов разных видов, может быть с достаточной точностью рассчитана по упругопластической модели (УПМ) с учетом изменения прочности сжатого бетона при действии малоцикловых нагружений различных уровней и режимов: напряжения в бетоне сжатой зоны определяются с учетом коэффициента $\gamma_{c,cyc}$, вид бетона учитывается коэффициентом k_{cr} [24-26].

При расчете нормальных сечений усиленных наращиванием сжатой зоны железобетонных изгибаемых элементов предыстория загрузки учитывается уточнением прочностных характеристик бетона усиливаемого образца в зависимости от режима предварительного нагружения: $f'_{cd,cyc} = \gamma_{c,cyc} f'_{cd}$.

Расчет усиленной наращиванием конструкции производится по следующим характеристикам:

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

- для бетона усиления: $f_{cd,ad,cyc} = \gamma_{c,cyc} f'_{cd,ad}$; $E_{c,ad,cyc} = \frac{55 f_{cd,ad,cyc}}{19 + \eta_{top1} f_{cd,ad,cyc}}$.

На основании проведенных экспериментальных исследований было выявлено, что при расчете изгибаемых железобетонных элементов, подверженных действию малоцикловых нагрузок, коэффициенты пластичности λ_c и $\lambda_{c,ad}$ следует определять по скорректированным значениям относительных деформаций ϵ_{c1} в связи с более высокой деформативностью бетона сжатой зоны, а для полученного по упругопластической модели расчетного значения разрушающего момента M_{Rd}^{pac} использовать понижающий коэффициент $\gamma_{M,cyc}$: для бетона класса C20/25 и ниже $\gamma_{M,cyc}=0,95$, для более высокого класса $\gamma_{M,cyc}=0,9$. Таким образом, $M_{Rd} = \gamma_{M,cyc} \cdot M_{Rd}^{pac}$:

$$M_{Rd} = \gamma_{M,cyc} \cdot \left\{ 0.5 f_{cd,red,cyc} b x_{eff} \left[(1 + \lambda_{c,red}) d - 0.33 x_{eff} (1 + \lambda_{c,red} + \lambda_{c,red}^2) \right] + \left[\sigma_{sc} A_{sc} (d - c') \right] \right\}. \quad (10)$$

Сравнение опытных и расчетных значений разрушающего момента M_{Rd} для сборных и сборно-монолитных балок с учетом действия малоциклового нагружения показало, что максимальное отклонение составляет не более 15 %, среднее отклонение до 7 %.

Выводы. По результатам проведенных авторами экспериментально-теоретических исследований предложена эмпирическая зависимость для определения коэффициента условий работы $\gamma_{c,cyc}$, 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.

Расчет нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов предложено производить на основе уточненной упругопластической модели, которая позволяет учесть влияние повторных нагрузок на несущую способность усиленной конструкции с учетом влияния предыстории нагружения путем введения коэффициента условий работы $\gamma_{с,ус}$ для значений прочности бетона усиливаемой конструкции и бетона усиления, а также производить расчет модуля упругости для бетона усиливаемой конструкции и бетона усиления с учетом режима нагружения.

1. Consider, M. Influence des armatures metalligues sur. les. moprictes des mortiers et betons, lomte Rendue // M. Consider // L. Academie, 127. – pp. 992 – 995.
2. Бранцевич, В.П. Деформативность железобетонных изгибаемых элементов при циклических нагружениях низкой частоты : Дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Бранцевич Владимир Петрович / Брестский политехнический институт. – Брест, 1993. – 193 с.
3. Гордеева, Т.Ф. Исследование изгибаемых железобетонных элементов при повторных статических нагружениях : Автореф. дис... канд. техн. наук / Т.Ф. Гордеева. – Киев, 1970. – 20 с.
4. Казанков, А.П. Влияние режимов нагружения на развитие деформаций железобетонных балок : Автореф. дис... канд. техн. наук / А.П. Казанков. – М., 1977. – 21 с.
5. Левчич, В.В. Исследование напряженно-деформируемого состояния изгибаемых элементов при многократно повторяющихся нагрузках : Автореф. дис... канд. техн. наук / В.В. Левчич. – Львов, 1974. – 25 с.
6. Цискрели, Г.Д. Исследование деформативных характеристик бетона при малочисленных повторных нагружениях / Г.Д. Цискрели, А.Д. ГНадирадзе // Строительство и архитектура: Информационный сборник Гостроя СССР. – М., 1963. – С. 4-5.
7. Байков, В.Н. О дальнейшем развитии общей теории железобетона / В.Н.Байков // Бетон и железобетон. – 1979. – № 7. – С. 27–29.
8. Бамбура, А.М. До аналітичного описання діаграми механічного стану бетону при одноразовому короткочасному деформуванню / А.М. Бамбура // Будівельні конструкції : збірник наукових праць. – Київ : НДІБК, 2002. – Вип. 57. – С. 31–34.
9. Бамбура, А.Н. Диаграмма «напряжения-деформации» для бетона при центральном сжатии / А.Н. Бамбура // Вопросы прочности, деформативности и трещиностойкости железобетона. – Ростов н/Д : РИСИ. – 1980. – С. 19–22.
10. Бамбура, А.Н. К построению деформационной теории железобетона стержневых систем на экспериментальной основе / А.Н. Бамбура, А.Б. Гурковский // Будівельні конструкції : Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Київ : НДІБК, 2003. – Вип. 59. – Книга 1. – С. 121–130.
11. Бамбура, А.Н. Развитие методов оценки напряженно-деформированного состояния и несущей способности конструкций на основе реальных диаграмм деформирования материалов / А.Н. Бамбура // Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону: збірник Першої всеукраїнської наук.-техн. конф. – Київ : НДІБК, 1996. – С. 36–39.
12. Голишев, О.Б. Курс лекцій з основ розрахунку конструкцій і з опору залізобетону / О.Б. Голишев, А.Н. Бамбура. – К.: Логос, 2004. – 340 с.
13. Меркулов, С.И. Конструктивная безопасность железобетонных элементов реконструируемых зданий и сооружений : Автореф. дисс. ... доктор техн. наук : 05.23.01 / Меркулов Сергей Иванович. – Орел, 2006. – 36 с.
14. Мурашев, В.И. Трещиностойкость, жесткость и прочность железобетона / В.И. Мурашев ; М. : Машстройиздат, 1950. – 268 с.
15. Бабич, Є.М. До

питання побудови діаграми деформування бетону та визначення коефіцієнта повноти епюри напружень / Є.М. Бабич, Ю.О. Крись // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: Видавництво Національного університету водного господарства та природокористування, 2001. – Вип. 6. – С. 94–104. **16.** Тахтаї, Д.А. Прочность и деформативность бетона при внецентренном циклическом нагружении / Д.А. Тахтаї, В.И. Веретенников, А.А. Бармотин // Коммунальное хозяйство городов : науч.-технич. сб. – К., 2004. – № 60. – С. 53–65. **17.** prEN 1992-1 (Final draft, October 2001). Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings. – Brussels, 2002. – 230 p. **18.** Тур, В.В. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций : Монография / В.В. Тур, Н.А. Рак. – г. Брест: Издательство БГТУ, 2003. – 252 с. **19.** СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 2003. – 143 с. **20.** ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250) Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 2010. – 191 с. **21.** Рекомендации по оценке состояния и усилению строительных конструкций промышленных зданий и сооружений / НИИСК Госстроя СССР. – М. : Стройиздат, 1989. – 104 с. **22.** Дробышинцев, С.Я. Вплив повторних малоциклових навантажень на механічні характеристики сталевібробетону та роботу згинальних елементів на його основі : Дис... канд. техн. наук : 05.23.01 / Дробышинцев Сергій Ярославович. – Луцк, 2005. – 174 с. **23.** 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: – Львів : 2001. – 16 с. **24.** Семенюк, С.Д. Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при действии малоцикловых нагружений / С.Д. Семенюк, Ю.Г. Болошенко // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будовлі та споруди: збірник наукових праць.– Рівне, 2012. – Вип. 23. – С. 523–532. **25.** Болошенко, Ю.Г. Особенности работы бетонов различных видов в условиях малоциклового нагружения / Ю.Г. Болошенко // Інженерні системи та техногенна безпека : Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – Макіївка : ДонНАСА, 2011. – Вип. 5 (91). – С. 190–197. **26.** Болошенко, Ю.Г. Расчет прочности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при действии малоцикловых нагрузок / Ю.Г. Болошенко // Збірник III Міжнародної конференції «Науково-технічне та організаційно-економічне сприяння реформам у будівництві і житлово-комунальному господарстві». – Макіївка: ДонНАСА, 2012. – Ч. 1. – С. 16–18.