

**К вопросу контроля усталостных изменений прочности
изгибаемых железобетонных элементов**

© Борис Израилевич Пинус, Инна Геннадьевна Корнеева

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Корнеева Инна Геннадьевна, kornee-inna@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена сравнительному анализу возможности оценки усталостных последствий с применением нормативных методов расчета прочности железобетонных элементов при действии изгибающих моментов и продольных сил. Проведен численный эксперимент по вероятностному прогнозу изменения прочности балок различного уровня армирования после циклических воздействий умеренной интенсивности. Приведены результаты расчетов по методам предельных усилий и нелинейным деформационным моделям с использованием статистически представительных опытных данных прочностных и деформативных свойств бетона до и после 50 циклов механических воздействий амплитудой 0,8 и с нулевой асимметрией. Испытывались 2 серии призматических образцов (100 × 100 × 400 мм), изготовленных из бетона. Использован комплекс *Instron 5989*, позволяющий вести в автоматическом режиме нагружения с постоянством скорости деформирования и непрерывной записью контролируемых параметров во всех направлениях. Результаты численного эксперимента получены для балок прямоугольного сечения ($b \times h = 100 \times 200$ мм) с различным уровнем одностороннего армирования (A400, $\mu = 1...6\%$). Установлена предпочтительность прогноза и контроля последствий усталостных процессов с использованием критериев методов нелинейных деформационных моделей.

Ключевые слова: усталость, железобетон, изгиб, циклические воздействия

Для цитирования: Пинус Б. И., Корнеева И. Г. К вопросу контроля усталостных изменений прочности изгибаемых железобетонных элементов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 1. С. 98–103. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-1-98-103>.

Original article**Fatigue strength control of flexural reinforced concrete members****Boris I. Pinus, Inna G. Korneeva**

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Inna G. Korneeva, kornee-inna@yandex.ru

Abstract. The article compares approaches to fatigue effect assessment using standard methods of calculating the strength of reinforced concrete members under the action of bending moments and longitudinal forces. A numerical experiment was carried out using the probabilistic forecast of the change in the strength of variously reinforced beams after cyclic effects of moderate intensity. The calculations performed according to ultimate force methods and nonlinear deformation models are provided using statistically representative experimental data on the concrete strength and deformation properties prior to and following 50 cycles of mechanical impacts with a 0.8 amplitude and zero asymmetry. Two series of concrete prismatic samples (100 × 100 × 400 mm) were tested. The *Instron 5989* complex was used for automated loading of samples with the constant deformation rate and continuous recording of controlled parameters along all directions. A numerical experiment was conducted for beams of a rectangular cross-section ($b \times h = 100 \times 200$ mm) with a various level of one-sided reinforcement (A400, $\mu = 1-6\%$). It is established that predicting and controlling the effects of fatigue processes should be carried out using the criteria of nonlinear deformation models.

Keywords: fatigue, reinforced concrete, bending, cyclic effects

For citation: Pinus B. I., Korneeva I. G. Fatigue strength control of flexural reinforced concrete members. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2022;12(1):98-103. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-1-98-103>.

Введение

Свод правил проектирования бетонных и железобетонных конструкций¹ регламентирует на паритетных условиях два метода расчета прочности нормальных сечений элементов при действии изгибающих моментов и продольных сил: по предельным усилиям (ПУ) и нелинейным деформационным моделям (НДМ). Их практическая реализация сопряжена с коррекцией фактического отклика конструкций на внешние усилия, позволяющей упростить функциональные зависимости параметров внутреннего сопротивления с приемлемой погрешностью прогнозов.

В частности, определение предельных усилий ведется в предположении прямоугольного (равномерного) распределения напряжений в сжатой зоне бетона с ординатой его расчетного сопротивления. Одновременно предполагается (по умолчанию), что потенциал ее сопротивления ограничен по условиям достижения текучести в растянутой арматуре. Подобные предпосылки ведут к уменьшению фактической высоты сжатой зоны, увеличению плеча внутренней пары сил и неопределенности фактических напряжений в арматуре при граничном армировании.

Использование нелинейных деформационных моделей основано на справедливости закона плоских сечений, приемлемость которого в расчетной стадии НДС является проблематичной [1, 2]. Но метод позволяет более адекватно фактическому состоянию учитывать стесненность деформирования бетона изгибаемых и внецентренно нагруженных элементов и, как следствие, повышение потенциала сопротивления.

Принципиальной особенностью обоих методов является принятая (по умолчанию) гипотеза о постоянстве параметров внутреннего сопротивления бетона и арматуры в расчетный срок эксплуатации. Это не соответствует реальности и требованиям ГОСТ Р ИСО 2394-2016², что подтверждается усталостной трансформацией структуры, со-

путствующими изменениями прочности и деформативности материалов при нестационарных термомеханических воздействиях умеренной (ниже расчетной) интенсивности³ [3–14]. Ввиду неоднозначности и разнонаправленности методов закономерен вопрос о возможности учета возникающих последствий в рамках существующих нормативных подходов.

Методы

Ниже приводятся результаты вероятностного прогноза прочности изгибаемых элементов, основанного на статистически представительных экспериментальных данных прочностных и деформативных свойств бетона с различной предысторией нагружения. Испытаны призматические образцы (100 × 100 × 400 мм), изготовленные из бетона (Ц:П:Щ:В = 1:1,42:3,57:0,55, Ц = 380 кг/м³), после 2-месячного твердения в стандартных условиях (серия СН) и после 50 циклов воздействий с амплитудой $\eta = 0,8$ и нулевой асимметрией (серия СН_Ц). Использован комплекс *Instron 5989*, позволяющий вести в автоматическом режиме нагружения с постоянством скорости деформирования и непрерывной записью контролируемых параметров во всех направлениях. Их выборочные значения при различном уровне обеспеченности представлены в табл. 1.

Для анализа ожидаемых изменений прочности изгибаемых железобетонных элементов с различным армированием был разработан алгоритм, позволяющий использовать экспериментальные диаграммы « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » и учитывать фактическое (неравномерное и неоднородное) распределение напряжений по высоте сечения. Использована нормативная методика (пп. 8.1.20–8.1.30 СП 63.13330.2012) многослойной аппроксимации сечений, при которой момент внутреннего сопротивления элемента рассматривается как аналитическая сумма:

$$M = \sum \sigma_{bi}(\varepsilon_i) \cdot A_{bi} \cdot Z_{bxi} + \sum \sigma_{sj}(\varepsilon_j) \cdot A_{sj} \cdot Z_{sxj}, \quad (1)$$

¹СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения: актуал. ред. СНиП 52-01-2003. М., 2012. 155 с.

²ГОСТ Р 2394-2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности. М.: Стандартинформ, 2016. 72 с.

³Корчинский И. Л., Беченева Г. В. Прочность строительных материалов при динамических нагружениях: пособ. для проектировщиков. М.: Стройиздат, 1966. 212 с.

где Z_{xbi} и Z_{xsj} – расстояние от нейтральной оси до i -го (j -го) слоя сечения, м.

В качестве критериального условия разрушения используется неравенство:

$$\varepsilon_b \leq \varepsilon_{b,ult} \quad (2)$$

где ε_b – деформации крайних волокон сечения; $\varepsilon_{b,ult}$ – экспериментально установленная

деформация, соответствующая напряжению $0,8\sigma_u$ на постпиковом участке диаграмм « $\sigma_b - \varepsilon_b$ ».

Одновременно определялись значения прочности элементов по нормативной методике предельных усилий.

Таблица 1. Расчетные значения параметров численного моделирования

Table 1. Calculated values of numerical simulation parameters

Контрольный параметр	Значения с обеспеченностью, %						$R_{bц} / R_{b0}$ при обеспеченности		
	Исходное состояние			Постциклическое состояние					
	50	95	99	50	95	99	50	95	99
R_b , МПа	43,6	41,0	39,8	37,4	33,5	31,6	0,86	0,82	0,80
$\varepsilon_{b,ult}$, ‰	3,13	2,77	2,58	2,38	1,82	1,53	0,76	0,66	0,59
ξ_R	0,518	0,496	0,486	0,402	0,365	0,344	0,78	0,74	0,71
E_b , ГПа	–		30,2	–		22,7	–		0,75

Результаты и их обсуждение

Результаты численного эксперимента для балок прямоугольного сечения ($b \times h = 100 \times 200$ мм) с различным уровнем одностороннего армирования (A400, $\mu = 1...6$ %) приведены в табл. 2 и на рисунке. Они характеризуются высоким (99 %) уровнем статистической обеспеченности и подтверждают возрастающее влияние усталостных последствий на переармированные конструкции. Это проявляется в ощутимом снижении уровня стабилизации несущей способности и различий показателей средних и нормативно ожидаемых значений.

Несомненный интерес представляет собой динамика прочности изгибаемых элементов. На базе проведенных циклических воздействий довольно высокой интенсивности сохраняется стабильность сопротивления балок рассматри-

ваемого диапазона нормального армирования при одновременном 20-процентном снижении призмной прочности бетона, 40-процентном уменьшении граничной высоты сжатой зоны и предельных деформаций бетона.

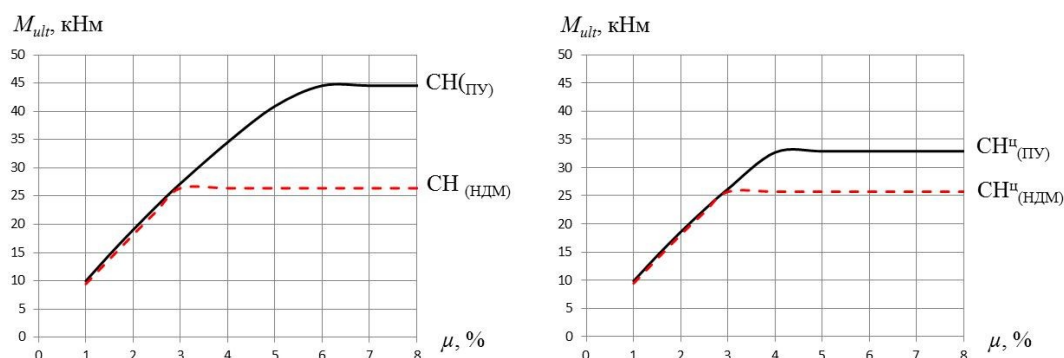
Учитывая, что результаты расчетов по разным методам практически совпадают при существенных различиях исходных предпосылок, закономерно проанализировать соотношение значимых расчетных параметров сопротивления. С учетом ожидаемых усталостных последствий в качестве таковых рассматриваются высота и площадь сжатой зоны сечений (табл. 3).

Сопоставимость значений параметров прочности элементов и площади сжатых зон при одновременном кратном различии их высоты косвенно свидетельствует о неоднозначности методов в оценке реализуемого потенциала прочности бетона.

Таблица 2. Изменения расчетных параметров прочности сечений

Table 2. Changes in the calculated parameters of cross-section strength

Процент армирования μ , %	По предельным усилиям				По деформационной модели			
	Высота сжатой части x , см	Площадь эпюры A_s , МПа*см	Предельный момент M_{ult} , кНм	Реализация прочности бетона R_b , МПа	Высота сжатой части x , см	Площадь эпюры A_s , МПа*см	Предельный момент M_{ult} , кНм	Реализация прочности бетона R_b , МПа
СН								
1	1,5	59,5	9,97	40,3	6,26	66,34	9,44	11,0
1,5	2,24	89,25	14,62	40,8	7,22	97,07	13,82	14,3
2	2,99	119	19,04	40,9	8,03	128,82	18,15	17,4
2,5	3,74	148,75	23,25	40,9	8,69	160,72	22,38	20,4
3	4,49	178,5	27,23	40,9	9,21	189,4	26,41	23,1
СНц								
1	1,88	59,5	9,85	32,7	6,01	65,18	9,44	11,2
1,5	2,83	89,25	14,36	32,5	6,95	94,64	13,79	14,7
2	3,77	119	18,58	32,6	7,25	125,93	18,08	18,6
2,5	4,71	148,75	22,53	32,6	8,42	154,21	22,04	20,4
3	5,62	178,5	26,19	32,8	11,41	181,71	25,7	21,3



Изменение прочности балок серий CH (слева) и CH_c (справа)
Changing the strength of beams of the SN (on the left) and SN_c (on the right) series

Таблица 3. Соотношение расчетных параметров, определенных по методам предельных усилий и нелинейных деформационных моделей

Table 3. Ratio of calculated parameters determined by the "UE" / "NDM" methods (ultimate effort / nonlinear deformation model)

Процент армирования, μ	Исходное состояние			Постциклическое состояние		
	Предельный момент M_{ult} , кНм	Высота сжатой части x , см	Площадь эпюры A_c , МПа·см	Предельный момент M_{ult} , кНм	Высота сжатой части x , см	Площадь эпюры A_c , МПа·см
1	1,06	0,24	0,9	1,04	0,31	0,91
1,5	0,95	0,31	0,92	1,04	0,41	0,94
2	1,05	0,37	0,92	1,03	0,52	0,94
2,5	1,04	0,43	0,92	1,02	0,56	0,97
3	1,03	0,49	0,94	1,01	0,52	0,91

Напряженно-деформированное состояние сжатой зоны балок при действии изгибающих моментов, тождественных $M_{i,ult}$, в предположении равномерного распределения напряжений на установленной высоте x_i подтверждает эту мысль.

При использовании метода предельных усилий такой подход представляет обратную задачу с известным решением ($\sigma = R_b$). Аналогичный прогноз с параметрами метода НДМ показывает (см. табл. 2):

а) существенно меньший уровень усредненных напряжений в сжатой зоне, чем расчетное сопротивление бетона;

б) зависимость используемого потенциала от армирования элемента.

Следовательно, нормально армированные изгибаемые элементы исследуемого состава обладают повышенным потенциалом сопротивления сжатой зоны из-за неравномерности напряженного состояния и способности к перераспределению усилий.

Заключение

Нормативный метод расчета прочности изгибаемых элементов, реализующий ломаную аппроксимацию фактического криволинейного очертания напряжений, позволяет прогнозировать (оценивать) усталостные последствия нестационарных воздействий умеренной амплитуды и частоты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гвоздев А. А., Дмитриев С. А., Крылов С. М. Новое о прочности железобетона. М.: Стройиздат, 1977. 272 с.
2. Гвоздев А. А., Дмитриев С. А., Гуца Ю. П., Залесов А. С., Мулин Н. М., Чистяков Е. А. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1978. 202 с.
3. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.

4. Маилян Л. Р., Беккиев М. Ю., Силь Г. Р. Работа бетона и арматуры при многократно повторных нагружениях. Нальчик: КБАМИ, 1984. 55 с.
5. Москвитин В. В. Циклическое нагружение элементов конструкций. М.: Наука, 1981. 344 с.
6. Расторгуев Б. С., Цепелев С. В. Перераспределение усилий в железобетонных кон-

струкциях при малоцикловых воздействиях // Бетон и железобетон. 1989. № 10. С. 16–18.
 7. Рыков Г. В., Обедов В. П., Майоров Е. Ю., Абрамкина В. Т. Экспериментальные исследования процессов деформирования и разрушения бетонов при циклических динамических нагрузках // Строительная механика и расчет сооружений. 1992. № 1. С. 71–76.
 8. Беченева Г. В. Прочность бетона при немногочисленных повторных нагружениях // Исследования по сейсмостойкости зданий и сооружений: Труды ЦНИИСК. Вып. 6. 1961. С. 91–118.
 9. Кузовчикова Е. А., Яшин А. В. Исследование влияния малоцикловых сжимающих воздействий на деформативность, прочность, и структурные изменения бетона // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1976. № 10. С. 30–35.
 10. Ставров Г. Н., Руденко В. В., Федосеев А. А. Прочность и деформативность бетона

при повторно-статических нагружениях // Бетон и железобетон. 1985. № 1. С. 33–34.
 11. Яшин А. В. Некоторые данные о деформациях и структурных изменениях бетона при осевом сжатии // Новое о прочности железобетона. Москва: Стройиздат, 1977. С. 17–30.
 12. Попов Н. Н., Расторгуев Б. С. Расчет железобетонных конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок. Москва: Стройиздат, 1964. 151 с.
 13. Корчинский И. Л. Несущая способность материалов при немногочисленных повторных нагружениях // Методы расчета зданий и сооружений на сейсмостойкость: сб. статей / под ред. Гольденבלата И. И., Быховского В. А. Москва, 1958. С. 97–107.
 14. Сергеев С. М., Беккер В. А., Безделев В. В. Моделирование напряженного состояния растворной части вокруг гранул крупного заполнителя бетона при действии на него внешней сжимающей нагрузки // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1982. № 5. С. 21–25.

REFERENCES

1. Gvozdev AA, Dmitriev SA, Krylov SM. New on the strength of reinforced concrete. Moscow: Stroyizdat; 1977. 272 p. (In Russ.).
 2. Gvozdev AA, Dmitriev SA, Gushcha YuP, Zalesov AS, Mulin NM, Chistyakov EA. New in the design of concrete and reinforced concrete structures. Moscow: Stroyizdat; 1978. 202 p. (In Russ.).
 3. Karpenko NI. General models of reinforced concrete mechanics. Moscow: Stroyizdat; 1996. 416 p. (In Russ.).
 4. Mailyan LR, Bekkiev MYu, Sil' GR. The work of concrete and reinforcement with slightly repeated loads. Nalchik: Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V. M. Kokov; 1984. 55 p. (In Russ.).
 5. Moskvitin VV. Cyclic loading of construction elements. Moscow: Nauka; 1987. 344 p. (In Russ.).
 6. Rastorguev BS, Tsepelev SV. Redistribution of efforts in reinforced concrete structures under low-cycle impacts. *Beton i zhelezobeton*. 1989;10:16-18. (In Russ.).
 7. Rykov GV, Obedov VP, Mayorov EYu, Abramkina VT. Experimental studies of the processes of deformation and destruction of concrete under cyclic dynamic loads. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii = Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 1992;1:71-76. (In Russ.).
 8. Becheneva GV. Concrete strength under few repeated loads. *Research on earthquake re-*

sistance of buildings and structures: Proceedings of the Central Research Institute. Vol. 6. 1961. p. 91-118. (In Russ.).
 9. Kuzovchikova EA, Yashin AV. Investigation of the influence of low-cycle compressive effects on deformability, strength, and structural changes of concrete. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1976;10:30-35. (In Russ.).
 10. Stavrov GN, Rudenko VV, Fedoseev AA. The strength and deformability of concrete under repeated static loading. *Beton i zhelezobeton*. 1985;1:33-34. (In Russ.).
 11. Yashin AV. Some information about the deformations and structural changes of concrete under axial compression. *Novoe o prochnosti zhelezobetona*. Moscow: Stroyizdat; 1977. p. 17-30. (In Russ.).
 12. Popov NN, Rastorguev BS. Calculation of reinforced concrete structures for the effect of short-term dynamic loads. Moscow: Stroyizdat; 1964. 151 p. (In Russ.).
 13. Korchinsky IL. Bearing capacity of materials with few repeated loadings. In: Goldenblat II, Bykhovsky VA (ed.). *Metody rascheta zdaniy i sooruzhenii na seismostoikost'*: collection of articles. Moscow, 1958. p. 97-107. (In Russ.).
 14. Sergeev SM, Becker VA, Bezdelev VV. Modeling of the stress state of the mortar part around the granules of a large aggregate of concrete under the action of an external compressive load on it. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1982;5:21-25. (In Russ.).

Информация об авторах

Б. И. Пинус,
доктор технических наук, профессор
кафедры строительного производства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: pinus@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-3067-9478>

И. Г. Корнеева,
старший преподаватель кафедры
строительного производства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: kornee-inna@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6130-0195>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 02.02.2022.
Одобрена после рецензирования 28.02.2022.
Принята к публикации 01.03.2022.

Information about the authors

Boris I. Pinus,
Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department
of Building Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: pinus@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-3067-9478>

Inna G. Korneeva,
Senior Lecturer of the Department of Building
Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: kornee-inna@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6130-0195>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

The article was submitted 02.02.2022.
Approved after reviewing 28.02.2022.
Accepted for publication 01.03.2022.