

УДК: 624.012.3; 624.012.4

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-4\(27\)-148-159](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-4(27)-148-159)

# ОЦЕНКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПО УСТАЛОСТИ

## EVALUATION OF METHODS FOR CALCULATING REINFORCED CONCRETE STRUCTURAL MEMBERS FOR THE FATIGUE LIMIT STATE

Р. Ш. ШАРИПОВ, канд. техн. наук

С. А. ЗЕНИН, канд. техн. наук

С. Б. КРЫЛОВ, д-р техн. наук

Ю. С. ВОЛКОВ, канд. техн. наук

*В нормах по проектированию железобетонных конструкций зданий и сооружений (начиная с 1962 г. и по настоящее время) содержится методика расчета на выносливость, которая была составлена с учетом обобщения и анализа данных многочисленных экспериментально-теоретических исследований. Последующее использование данной методики в практике проектирования железобетонных конструкций показало, что при эксплуатации конструкций, рассчитанных с учетом требований по выносливости, разрушений не происходило. Вместе с тем, анализ показал отличие отечественной методики от подходов иностранных норм в части расчета по растянутой арматуре. Дальнейшие исследования показали некоторые несовершенства нормативной методики расчета по растянутой арматуре (как ненапрягаемой, так и предварительно напряженной).*

*Contained in the design codes of reinforced concrete structures, since 1962 and to the present, the method of calculating the endurance was compiled taking into account the generalization and analysis of data from numerous experimental and theoretical studies. Subsequent use of this method in the practice of designing reinforced concrete structural members has shown that during the operation of structural members properly designed with the requirements for fatigue destructions did not occur. At the same time, the analysis showed the difference between the domestic method and the approaches of foreign standards in terms of fatigue verification for reinforcing and prestressing steel. Further research has shown some imperfections in the method of design for fatigue of steel (both reinforcing and prestressing steel).*

*Taking into account the data of the conducted computational and theoretical studies,*

С учетом данных проведенных расчетно-теоретических исследований, а также в целях гармонизации с основными положениями расчета на усталость, принятого в нормах проектирования ряда ведущих стран, представляется полезным в расчете на усталость по растянутой арматуре наряду с максимальным напряжением в пределах цикла нагрузки учитывать и предельную амплитуду напряжений. В этой связи предполагается проведение актуализации существующей методики расчета на выносливость, которая будет дополнена новыми положениями расчета по растянутой арматуре. При актуализации методики наиболее правильным будет максимально учесть другие положения существующей методики. В частности, будет сохранен прежний подход к определению действующих напряжений в бетоне и арматуре, а также расчет на усталость по сжатому бетону.

#### Ключевые слова:

Железобетонные конструкции, метод расчета, предельное состояние, выносливость, усталость, ненапрягаемая арматура, предварительно напряженная арматура, напряжения, амплитуда напряжений, класс арматуры

as well as in order to harmonize with the main provisions of the fatigue calculation adopted in the design standards of a number of leading countries, it is useful to take into account the ultimate stress range along with the maximum stress within the load cycle. In this regard, it is planned to update the existing methodology for calculating for fatigue, which will be supplemented with new provisions for calculating of reinforcing and prestressing steel for fatigue. When updating the methodology, it is most appropriate to take into account other provisions of the existing methodology as much as possible. In particular, the previous approach to determining the internal stresses in concrete and reinforcing steel, as well as the calculation of fatigue for concrete under compression, will be maintained.

#### Key words:

Reinforced concrete members, calculation method, limit state, fatigue strength, reinforcing steel, prestressing steel, stresses, stress range, reinforcing and prestressing steel class

Существующий метод расчета на выносливость железобетонных элементов предусматривает расчет по сжатому бетону и по растянутой арматуре. Метод расчета впервые был введен в нормы проектирования железобетонных конструкций в 1962г. (СНиП II-В.1-62) [1]. После этого включение данного метода продолжалось в нормативные документы последующих лет (в частности, в СНиП II-21-75 [2], СНиП 2.03.01-84\* [3], Пособие [4]) и вплоть до настоящего времени (СП 35.13330.2011 [5], СП 41.13330.2011 [6] и СП 63.13330.2018 [7]).

В соответствии с СП 63.13330 расчет железобетонных конструкций на выносливость следует выполнять при действии многократно повторяющейся (регулярной) нагрузки. Проверка сопротивления при расчете на выносливость выполняется отдельно для бетона и арматуры. В документе указывается, что расчет на выносливость выполняют по упругой стадии с трещинами. Работу растянутого бетона и сжатой арматуры не учитывают, соответственно их прочность на выносливость не рассчитывается. При этом расчет

на выносливость необходимо производить из условий, при которых максимальные напряжения в сжатом бетоне и растянутой арматуре от повторяющейся нагрузки не превышают расчетных сопротивлений по выносливости бетона на сжатие и арматуры на растяжение соответственно.

Содержащаяся в нормах методика расчета на выносливость была составлена с учетом обобщения данных многочисленных экспериментально-теоретических исследований. Последующее ее использование в практике проектирования зданий и сооружений из железобетонных конструкций показало, что в запроектированных конструкциях разрушения от исчерпания выносливости не происходило. Следовательно, с позиций опыта применения данная методика доказала свою надежность и поэтому может быть взята за основу при разработке дополненной методики расчета на усталость для действующих норм проектирования железобетонных конструкций.

В этой связи представляется правильным максимально бережно учесть положения отечественных нормативных документов при составлении актуализированной, дополненной новыми положениями, методики. В частности, целесообразно сохранить прежний подход к определению действующих напряжений в бетоне и арматуре. Также можно принять без изменений расчет на усталость по сжатому бетону (по максимальному напряжению в пределах цикла нагрузки с учетом снижения расчетного сопротивления бетона в зависимости от коэффициента асимметрии цикла нагружения), который отвечает принципу расчета, принятому в нормах проектирования ведущих стран.

В качестве расчетного критерия для растянутой арматуры в отечественных нормах установлены максимальные напряжения растяжения в арматуре в пределах цикла нагрузки. Максимальные напряжения не должны превосходить соответствующих расчетных сопротивлений арматуры, определяемых по ограниченному пределу выносливости. Расчетные сопротивления устанавливаются в зависимости от режима нагрузок, характеризуемого коэффициентом асимметрии цикла, и класса арматуры.

В иностранных нормативно-технических документах [8...19] в качестве расчетного критерия для растянутой арматуры принимают амплитуду напряжений, которая представляет собой разницу (размах) между максимальным и минимальным напряжениями в пределах цикла нагрузки. Амплитуда напряжений не должна превосходить предельных величин, которые определяют расчетом. Таким образом, принципиальный подход отечественных норм в части расчетов по растянутой арматуре имеет определенное различие с подходом, принятым в большинстве иностранных норм.

Для установления возможных преимуществ и недостатков каждого из принципиальных подходов рассмотрим данные таблицы 25 СНиП 2.03.01-84\* по коэффициентам условий работы арматуры при действии многократно повторяющейся нагрузки (рис. 1).

По имеющимся в таблице данным, разделив арматуру условно на ненапрягаемую стержневую арматуру, напрягаемую стержневую арматуру и напрягаемую проволочную и канатную арматуру (за исключением классов арматуры, которые уже не производятся в настоящее время или имеют ограниченное применение), создадим рабочие таблицы 1, 2 и 3 соответственно. С целью включения данных по напряжениям в арматуре в таблицах 1-3 предусмотрим дополнительные строки.

Таблица 36 (25)

Класс арматуры	Коэффициент условий работы арматуры $\gamma_{s3}$ при коэффициенте асимметрии цикла $\rho_s$ , равном								
	-1,0	-0,2	0	0,2	0,4	0,7	0,8	0,9	1,0
A-I	0,41	0,63	0,70	0,77	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00
A-II	0,42	0,51	0,55	0,60	0,69	0,93	1,00	1,00	1,00
A-III диаметром, мм:									
6-8	0,33	0,38	0,42	0,47	0,57	0,85	0,95	1,00	1,00
10-40	0,31	0,36	0,40	0,45	0,55	0,81	0,91	0,95	1,00
A-IV	-	-	-	0,00	0,38	0,72	0,91	0,96	1,00
A-V	-	-	-	0,00	0,27	0,55	0,69	0,87	1,00
A-VI	-	-	-	0,00	0,19	0,53	0,67	0,87	1,00
Bp-II	-	-	-	-	0,00	0,67	0,82	0,91	1,00
B-II	-	-	-	-	0,00	0,77	0,97	1,00	1,00
K-7 диаметром, мм:									
6 и 9	-	-	-	-	0,00	0,77	0,92	1,00	1,00
12 и 15	-	-	-	-	0,00	0,68	0,84	1,00	1,00
K-19 диаметром 14 мм	-	-	-	-	0,00	0,63	0,77	0,96	1,00
Bp-I	-	0,00	0,56	0,71	0,85	0,94	1,00	1,00	1,00
A-III с контролем: удлинений и напряжений только удлинений	-	-	-	0,00	0,41	0,66	0,84	1,00	1,00
	-	-	-	0,00	0,46	0,73	0,93	1,00	1,00

Примечание. При значениях  $\rho_s$ , для которых в табл. 36 не даны значения коэффициента  $\gamma_{s3}$ , применение соответствующей арматуры не допускается.

Рис. 1. Коэффициенты условий работы арматуры согласно таблицы 25 СНиП 2.03.01-84\*

Таблица 1

**Сравнение предельных амплитуд напряжений, принимаемых в разных странах, для ненапрягаемой арматуры**

Класс арматуры	Напряжения, МПа, при $\gamma_{s3}$	Коэффициент условий работы арматуры $\gamma_{s3}$ при коэффициенте асимметрии цикла $\rho_s$ , равном								
		-1,0	-0,2	0	0,2	0,4	0,7	0,8	0,9	1,0
A240 ( $R_s = 210$ МПа)	$\gamma_{s3}$	0,41	0,63	0,70	0,77	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00
	$\sigma_{s,max}$	86	132	147	162	189	210	210	210	210
	$\sigma_{s,min}$	-86	-26	0	32	76	147	168	189	210
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (СНиП)	172	158	147	130	113	63	42	21	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (EC2)	129	129	129	129	126	63	42	21	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (США)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A400 ( $d = 6-8$ мм, $R_s = 350$ МПа)	$\gamma_{s3}$	0,33	0,38	0,42	0,47	0,57	0,85	0,95	1,00	1,00
	$\sigma_{s,max}$	116	133	147	165	200	298	333	350	350
	$\sigma_{s,min}$	-116	-27	0	33	80	209	266	315	350
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (СНиП)	232	160	147	132	120	89	67	35	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (EC2)	129	129	129	129	129	105	70	35	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (США)	277	184	161	138	138	105	70	35	-
A400 ( $d = 10-40$ мм, $R_s = 350$ МПа)	$\gamma_{s3}$	0,31	0,36	0,40	0,45	0,55	0,81	0,91	0,95	1,00
	$\sigma_{s,max}$	109	126	140	158	193	284	319	333	350
	$\sigma_{s,min}$	-109	-25	0	32	77	199	255	300	350
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (СНиП)	218	151	140	126	116	85	64	33	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (EC2)	129	129	129	129	129	105	70	35	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (США)	277	184	161	138	138	105	70	35	-

Класс арматуры	Напряжения, МПа, при $\gamma_{s3}$	Коэффициент условий работы арматуры $\gamma_{s3}$ при коэффициенте асимметрии цикла $\rho_s$ , равном								
		-1,0	-0,2	0	0,2	0,4	0,7	0,8	0,9	1,0
А600 ( $R_s = 520$ МПа)	$\gamma_{s3}$	-	-	-	-	0,38	0,72	0,91	0,96	1,00
	$\sigma_{s,max}$	-	-	-	-	198	374	473	499	520
	$\sigma_{s,min}$	-	-	-	-	79	262	378	449	520
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (СНиП)	-	-	-	-	119	112	95	50	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (ЕС2)	-	-	-	-	129	129	104	52	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (США)	-	-	-	-	138	138	104	52	-

Указанные строки предназначены для включения в них максимальных напряжений  $\sigma_{s,max}$ , минимальных напряжений  $\sigma_{s,min}$  и отвечающих этим напряжениям предельных амплитуд напряжений  $\Delta\sigma_{sfu}$ , которые соответствуют принятым в таблице 25 СНиП 2.03.01-84\* коэффициентам асимметрии цикла нагрузки. Для различных величин коэффициентов асимметрии цикла и коэффициентов условий работы арматуры определим максимальные, а также минимальные напряжения в арматуре.

Таблица 2

**Сравнение предельных амплитуд напряжений, принимаемых в разных странах, для напрягаемой стержневой арматуры**

Класс арматуры	Напряжения, МПа, при $\gamma_{s3}$	Коэффициент условий работы арматуры $\gamma_{s3}$ при коэффициенте асимметрии цикла $\rho_s$ , равном								
		-1,0	-0,2	0	0,2	0,4	0,7	0,8	0,9	1,0
А600 ( $R_s = 520$ МПа)	$\gamma_{s3}$	-	-	-	-	0,38	0,72	0,91	0,96	1,00
	$\sigma_{s,max}$	-	-	-	-	198	374	473	499	520
	$\sigma_{s,min}$	-	-	-	-	79	262	378	449	520
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (СНиП)	-	-	-	-	119	112	95	50	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (ЕС2)	-	-	-	-	129	129	104	52	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (США)	-	-	-	-	50	50	50	-	-
А800 ( $R_s = 695$ МПа)	$\gamma_{s3}$	-	-	-	-	0,27	0,55	0,69	0,87	1,00
	$\sigma_{s,max}$	-	-	-	-	188	382	480	605	695
	$\sigma_{s,min}$	-	-	-	-	75	267	384	545	695
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (СНиП)	-	-	-	-	113	115	96	60	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (ЕС2)	-	-	-	-	129	129	129	70	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (США)	-	-	-	-	62	62	62	-	-
А1000 ( $R_s = 870$ МПа)	$\gamma_{s3}$	-	-	-	-	0,19	0,53	0,67	0,87	1,00
	$\sigma_{s,max}$	-	-	-	-	165	461	583	757	870
	$\sigma_{s,min}$	-	-	-	-	66	323	466	681	870
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (СНиП)	-	-	-	-	99	138	117	76	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (ЕС2)	-	-	-	-	129	129	129	87	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (США)	-	-	-	-	74	74	74	-	-

Кроме того, в таблицах 1, 2, 3 были введены еще две дополнительные строки для включения предельных амплитуд напряжений по нормам Евросоюза (Еврокод-2) и США (ACI 215R-97) соответственно. Данные по амплитудам напряжений, полученные по СНиП 2.03.01-84\*, Еврокод-2 и нормам США для краткости в графе 2 таблиц 1...3 указаны как СНиП, EC2 и США соответственно. При составлении таблиц учитывали, что нормы США не дают указаний по предельным амплитудам напряжений для стержневой арматуры гладкого профиля (класса А240). Поэтому для класса арматуры А240 данные по нормам США не приведены.

С целью получения корректно сопоставимых значений по предельным амплитудам напряжений в арматуре, которые получаются из расчета по нормам России, Еврокода-2 и США, приводим все получаемые данные к одному количеству циклов многократно повторяющейся нагрузки, равного  $2 \times 10^6$ , которое было принято в СНиП 2.03.01-84\* (в данном документе не применяется дифференцированный подход к расчету в зависимости от количества циклов многократно повторяющейся нагрузки).

Таблица 3

**Сравнение предельных амплитуд напряжений, допускаемых в разных странах, для напрягаемой проволочной и канатной арматуры**

Класс арматуры	Напряжения, МПа, при $\gamma_{s3}$	Коэффициент условий работы арматуры $\gamma_{s3}$ при коэффициенте асимметрии цикла $\rho_s$ , равном								
		-1,0	-0,2	0	0,2	0,4	0,7	0,8	0,9	1,0
Вр1400 ( $d = 4-6$ мм, $R_s = 1215$ МПа)	$\gamma_{s3}$	-	-	-	-	-	0,67	0,82	0,91	1,00
	$\sigma_{s,max}$	-	-	-	-	-	814	996	1106	1215
	$\sigma_{s,min}$	-	-	-	-	-	570	797	995	1215
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (СНиП)	-	-	-	-	-	244	199	111	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (EC2)	-	-	-	-	145	145	145	122	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (США)	-	-	-	-	106	106	106	-	-
К1500 ( $d = 6,9$ мм, $R_s = 1300$ МПа)	$\gamma_{s3}$	-	-	-	-	-	0,77	0,92	1,00	1,00
	$\sigma_{s,max}$	-	-	-	-	-	1001	1196	1300	1300
	$\sigma_{s,min}$	-	-	-	-	-	701	957	1170	1300
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (СНиП)	-	-	-	-	-	300	239	130	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (EC2)	-	-	-	-	145	145	145	130	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (США)	-	-	-	-	106	106	106	-	-
К1500 ( $d = 12,15$ мм, $R_s = 1300$ МПа)	$\gamma_{s3}$	-	-	-	-	-	0,68	0,84	1,00	1,00
	$\sigma_{s,max}$	-	-	-	-	-	884	1092	1300	1300
	$\sigma_{s,min}$	-	-	-	-	-	619	874	1170	1300
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (СНиП)	-	-	-	-	-	265	218	130	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (EC2)	-	-	-	-	145	145	145	130	-
	$\Delta\sigma_{sfu}$ (США)	-	-	-	-	106	106	106	-	-

Для установления предельных амплитуд напряжений

$\Delta\sigma_{sfu}$  по нормам СНиП 2.03.01-84\* определяем максимальные напряжения в пределах цикла, пользуясь формулой (121) СНиП 2.03.01-84\*:

$$\sigma_{s,max} = \gamma_{s3} \cdot R_s \quad (1)$$

Минимальные напряжения определяем с учетом коэффициента асимметрии цикла по формуле:

$$\sigma_{s,min} = \rho_s \cdot \sigma_{s,max} \quad (2)$$

Величины предельных амплитуд напряжений  $\Delta\sigma_{sfu}$  вычисляем как разницу между максимальными и минимальными напряжениями:

$$\Delta\sigma_{sfu} = \sigma_{s,max} - \sigma_{s,min} \quad (3)$$

Результаты расчетов вносим в соответствующие строки таблиц 1-3 (эти строки в графе 2 обозначены как  $\Delta\sigma_{sfu}$  (СНиП)).

После этого в таблицы 1-3 в дополнительные строки внесем данные по предельным амплитудам напряжений в арматуре, которые получаем из расчетов по нормам Еврокод-2 [7] и по нормам АСІ 215R-97 [13], принимая во внимание данные таблиц 1-3 по коэффициентам асимметрии цикла. Эти данные вносим без учета коэффициента условий работы арматуры  $\gamma_{s3}$ , который используется только в отечественных нормах.

Расчет предельных амплитуд напряжений по Еврокоду-2 для каждого вида (класса) арматуры выполняем по представленному соотношению для логарифмических кривых  $S-N$  (амплитуда напряжений – количество циклов нагрузки) из следующего соотношения:

$$(\Delta\sigma_{sfu})^m \cdot N = const \quad (4)$$

или

$$(\Delta\sigma_{sfu})^m \cdot N = (\Delta\sigma_{sfu}^*)^m \cdot N^* \quad (5)$$

где  $\Delta\sigma_{sfu}$  – нормативное значение амплитуды напряжений для рассматриваемого количества  $N$  циклов нагрузки;

$\Delta\sigma_{sfu}^*$  – нормативное значение амплитуды напряжений для базового количества  $N^*$  циклов нагрузки,

$N$  – рассматриваемое количество циклов нагрузки,

$N^*$  – базовое количество циклов нагрузки,

$m$  – экспонента напряжений в арматуре.

Запишем соотношение (5) в виде:

$$\Delta\sigma_{sfu} = \Delta\sigma_{sfu}^* \left(\frac{N^*}{N}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (6)$$

Тогда с учетом данным таблиц 6.3N и 6.4N Еврокода-2 рассчитываем нормативные значения предельных амплитуд для  $2 \times 10^6$  циклов нагрузки. Предельные (расчетные) величины амплитуд получаем путем деления нормативных значений на коэффициент надежности по напряжению (в Еврокоде-2 данный коэффициент рекомендуется принять равным 1,15). Полученные данные вносим в таблицы 1-3, в те строки, которые включают данные по Еврокоду-2 (в графе 2 эти строки обозначены как  $\Delta\sigma_{sfu}$  (EC2)).

Расчет данных по предельным амплитудам напряжений согласно АСІ 215R-97 для не-напрягаемой арматуры выполняют по формуле:

$$S_r = 161 - 0,33S_{min}, \quad (7)$$

где  $S_r$  – предельная амплитуда напряжений, МПа;

$S_{min}$  – алгебраическое минимальное напряжение, со знаком + при растяжении, со знаком – при сжатии, в МПа.

При этом  $S_r$  допускается принимать не менее 138 МПа.

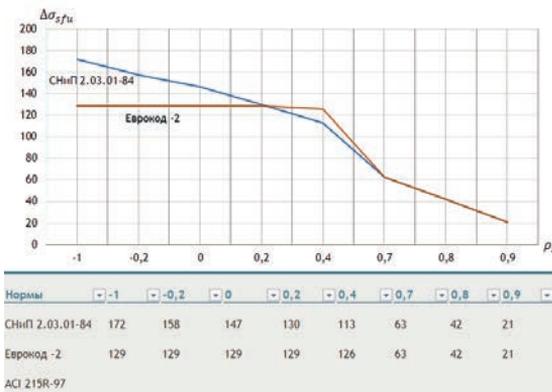
Для предварительно напряженной арматуры предельные амплитуды напряжений согласно ACI 215R-97 рассчитывают по формуле:

$$S_r = 0,06f_{pu} \tag{8}$$

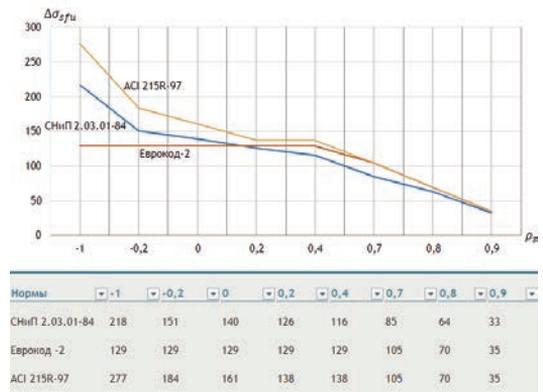
где  $f_{pu}$  – установленное значение временного сопротивления разрыву, МПа. При этом минимальные напряжения в арматуре не должны превышать  $0,6f_{pu}$ .

Полученные по расчету величины предельных амплитуд напряжений согласно ACI 215R-97 вносим в таблицы 1-3, в строки, которые относятся к данным по нормам США (в графе 2 эти строки обозначены как  $\Delta\sigma_{sfi}$  (США)).

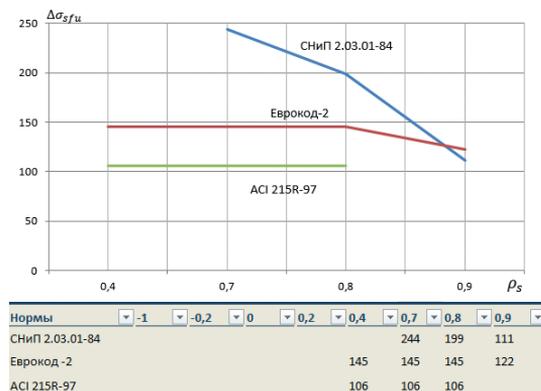
По табличным данным для каждого класса ненапрягаемой арматуры были построены графики предельных амплитуд напряжений для всех установленных в СНиП 2.03.01-84\* коэффициентов асимметрии цикла. Примеры некоторых из них представлены на рис. 2 и 3.



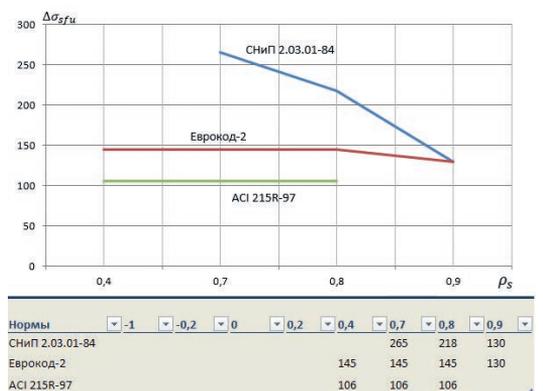
**Рис. 2.** Предельные амплитуды напряжений, полученные по нормам СНиП 2.03.01-84\* и Еврокод-2 для арматуры класса А240



**Рис. 3.** Предельные амплитуды напряжений, полученные по нормам СНиП 2.03.01-84\*, Еврокод-2 и АСИ 215R-97 для арматуры класса А400 (d=10-40мм)



**Рис. 4.** Предельные амплитуды напряжений, полученные по нормам СНиП 2.03.01-84\*, Еврокод-2 и АСИ 215R-97 для арматуры класса Bp1400



**Рис. 5.** Предельные амплитуды напряжений, полученные по нормам СНиП 2.03.01-84\*, Еврокод-2 и АСИ 215R-97 для арматуры класса K1500 (d=12, 15мм)

Аналогично для каждого класса предварительно напряженной арматуры были построены графики предельных амплитуд напряжений для всех установленных в СНиП 2.03.01-84\* диапазонов коэффициента асимметрии цикла. Примеры некоторых из них представлены на рис. 4 и 5.

Сравнение производили по предельным значениям амплитуд, которые устанавливаем по всему ряду коэффициентов асимметрии, которые были приняты в СНиП 2.03.01-84. Анализ полученных данных по предельным амплитудам для высоких значений коэффициента асимметрии цикла (см. рис. 2-5) показывает, что амплитуды напряжений в них достаточно небольшие и далеки от предельных амплитуд, полученных из расчетов по формулам (6-8). Т. е. это не предельные амплитуды, получаемые из условий работы арматуры, а амплитуды, которые обусловлены небольшим размахом напряжений в пределах цикла нагрузки. Ясно, что при высоких коэффициентах асимметрии цикла предельные амплитуды могут быть ограничены амплитудой действующих напряжений в пределах цикла нагрузки, если последние оказываются ниже предельных значений, получаемых по расчету из эмпирических зависимостей.

Анализ приведенных данных показывает следующее. В соответствии с методикой СНиП 2.03.01-84\* максимальные напряжения в арматуре принимают при коэффициентах асимметрии цикла, равных 0,9 и менее, почти всегда ниже расчетных сопротивлений арматуры (вплоть до 0,19 от расчетного сопротивления). Например, для арматуры класса А400 (см. рис. 1) при коэффициенте асимметрии цикла  $\rho_s = 0,4$  необходимо снизить максимальное напряжение до 0,57 от расчетного сопротивления. Согласно иностранным нормам максимальные напряжения могут варьироваться вплоть до величин, равных расчетным сопротивлениям арматуры, но при условии не превышения предельной амплитуды напряжений.

Следовательно, методика СНиП 2.03.01-84\* может быть уточнена с учетом данных иностранных нормативных документов. Поэтому представляется, что использование в отечественной методике расчета на усталость по растянутой арматуре данных иностранных норм по предельным амплитудам напряжений было бы полезным. Также было бы полезным ввести дифференцированный подход к расчету на усталость в зависимости от количества циклов нагрузки [20].

В ходе проведенных расчетно-теоретических исследований из данных таблиц 1...3 и графиков на рис. 2...5 установлены некоторые другие различия требований норм СНиП 2.03.01-84\* и положений норм других стран:

- по нормам СНиП 2.03.01-84\* существует зависимость коэффициентов условий работы от класса арматуры, в то время как согласно нормам Еврокод-2 и АСІ 215R-97 влияние класса арматуры по прочности на растяжение на предельные амплитуды напряжений не учитывают;
- существует зависимость коэффициентов условий работы от диаметров арматуры для классов арматуры А400 и К1500 по нормам СНиП 2.03.01-84\*, а нормы Еврокод-2 и АСІ 215R-97 положений по учету диаметров в расчете на усталость не содержат.

Кроме того, СНиП 2.03.01-84\* разрешает применение ненапрягаемой проволочной арматуры при соответствующем ее недопущении нормами других стран. Одновременно в анализируемых отечественных нормах не учитывается влияние на усталость арматуры ее соединений (нахлесточных, механических), а также участков изгиба гнутых стержней.

Анализ данных таблиц 2, 3 и графиков на рис. 4, 5 по предварительно напряженной арматуре показывает те же различия, что были отмечены и для арматуры без предварительного напряжения, но здесь имеются свои особенности. Первая особенность состоит в том, что в нормах США предельные амплитуды напряжений установлены более жесткими по сравнению с Еврокодом-2 (примерно на 30%). Разница с данными СНиП 2.03.01-84\* еще больше (в 2 и более раз – см. рис. 3, 4). Такой подход был принят в США в 1997 г., а до этого времени предельные амплитуды были на 80-100% выше и примерно близкими к данным Еврокода-2. В АСІ 215R-97 такое ужесточение связывают с результатами испытаний преднапряженных балок, проведенных в 1986 г., которые показали сниженную усталостную прочность по сравнению с требуемой по расчету.

Другая особенность заключается в том, что в СНиП 2.03.01-84\* для проволочной и канатной арматуры разрешаются гораздо более значительные амплитуды напряжений, чем это допускают нормы Еврокод-2 и АСІ 215R-97. Разница доходит до 83% в сравнении с Еврокодом-2 и до 2,65 раз в сопоставлении с нормами США. Этот факт можно объяснить, вероятно, менее обширными данными отечественных исследований усталости высокопрочной предварительно напряженной арматуры в сравнении с ненапрягаемой арматурой в период составления методики отечественных норм по расчетам на выносливость.

С учетом изложенного представляется целесообразным принять уточненный подход в методике отечественных норм в части расчета на усталость по растянутой арматуре с нормированием по максимальным напряжениям цикла с учетом данных по предельным амплитудам напряжений в пределах цикла многократно повторяющейся нагрузки. Представляется, что введение такого подхода в отечественной методике расчета на усталость является полезным, т.к. позволит устранить выявленные несовершенства.

## **Выводы**

1. Содержащаяся в нормах проектирования железобетонных конструкций методика расчета на выносливость была составлена с учетом обобщения данных многочисленных экспериментально-теоретических исследований. Последующее ее использование в практике проектирования железобетонных конструкций зданий и сооружений показало, что в запроектированных конструкциях разрушения от исчерпания выносливости не происходило. Следовательно, с позиций опыта применения данная методика доказала свою надежность и поэтому может быть взята за основу при разработке дополненной методики расчета на усталость для действующих норм проектирования железобетонных конструкций.

Представляется наиболее правильным максимально учесть положения методики расчета 1989 г. (СНиП 2.03.01-84\*) при составлении актуализированной методики, в которую необходимо включить существующий подход к определению действующих напряжений в бетоне и арматуре. Также правильным будет сохранить расчет на усталость по сжатому бетону (по максимальному напряжению в пределах цикла нагрузки), который отвечает принципу расчета, который принят в нормах проектирования ведущих стран.

2. В то же время с учетом данных проведенных расчетно-теоретических исследований, а также отдельных положений расчета на усталость, принятого в нормах проектирования ряда ведущих стран, представляется полезным в расчете на усталость по растянутой ар-

матуре принять нормирование по максимальным напряжениям цикла с учетом данных по предельным амплитудам напряжений, а также принять дифференцированный подход к расчету на усталость в зависимости от количества циклов многократно повторяющейся нагрузки.

## Библиографический список

1. Строительные нормы и правила, ч. II, разд. В, гл. 1. «Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования» (СНиП II-В.1-62\*). М., Стройиздат, 1962.
2. Строительные нормы и правила, ч. II, гл. 21. «Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования» (СНиП 11-21-75). М., Стройиздат, 1976.
3. СНиП 2.03.01.84\*. Бетонные и железобетонные конструкции. Госстрой СССР (Государственный комитет Совета Министров СССР по делам строительства), 1989. – 84 с.
4. Пособие по проектированию предварительно напряженных железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов (к СНиП 2.03.01-84). ЦНИИпромзданий, 1984, часть 1, с. 187.
5. СП 35.13330.2012. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84\*./ Минстрой России. – М.: 2012 – 214 с.
6. СП 41.13330.2011. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87./ Минрегион России. – М.: 2013-64с.
7. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2018. – 124 с.
8. European committee for standardisation. EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1 – 1, General rules and rules for buildings.
10. FIB Model Code for concrete structures 2010. International Federation for Structural Concrete (fib) Lausanne, Switzerland, 2013.
11. CEB Bulletin 188 «Fatigue of concrete structures. State-of-the-Art Report», CEB, 1988.
12. Manual for Railway Engineering, American Railway Engineering Association; Chapter 8-Concrete Structures and Foundations, 1990.
13. ACI Committee 301, “Specifications for Structural Concrete for Buildings,” (ACI 301), American Concrete Institute, Detroit, 2015.
14. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete,” (ACI 318-14), American Concrete Institute, Detroit, 2014.
15. ACI 215R-97 Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading (Revised 1992/Reapproved 1997).
16. Standard Specifications for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Fourteenth Edition, 1989.
17. Japanese National Railway Design Code for Reinforced Structures and Prestressed Concrete Railway Bridges (April 1983).
18. Japan Society of Civil Engineers, Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures -1986, Part I (Design).
19. West German Code for Prestressed Concrete (DIN 4227, Part I, July 1988).
20. West German Code for Reinforced Concrete (DIN 1045, 1988).

21. Шарипов Р.Ш., Волков Ю.С., Зенин С.А., Крылов С.Б. К вопросу разработки требований к методике расчета железобетонных конструкций при действии многократно повторяющейся нагрузки. Бюллетень строительной техники, №7, 2020, с. 53-56.

## Авторы:

Равиль Шамильевич ШАРИПОВ, канд. техн. наук, заместитель директора НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
Ravil SHARIPOV, Ph. D. (Engineering), Deputy Director of NIIZHB named after A. A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: lab01@mail.ru  
тел.: +7 (499) 174-75-10

Сергей Алексеевич ЗЕНИН, канд. техн. наук, заведующий лабораторией теории железобетона и конструктивных систем НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
Sergey ZENIN, Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory of the Theory of reinforced concrete and constructive systems of NIIZHB named after A. A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: lab01@mail.ru  
тел.: +7 (499) 174-75-17

Сергей Борисович КРЫЛОВ, д-р техн. наук, член-корреспондент РААСН, заведующий лабораторией механики железобетона НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
Sergey KRYLOV, D. Sci (Engineering), corresponding member of RAASN, Head of the laboratory of reinforced concrete mechanics of NIIZHB named after A. A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: niizhb\_lab8@mail.ru  
тел.: +7 (499) 174-74-07

Юрий Сергеевич ВОЛКОВ, канд. техн. наук, ученый секретарь НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», почетный член РААСН, Москва  
Yuri VOLKOV, Ph. D. (Engineering), Scientific Secretary of NIIZHB named after A. A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: volkov@cstroy.ru  
тел.: +7 (499) 174-76-77