

Всероссийское СМИ

«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»

Свидетельство о регистрации ЭЛ №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

*Мирсяпов И.Т. Современная теория выносливости железобетонных конструкций // Материалы по итогам I-ой Всероссийской научно-практической конференции «Современная наука в XXI веке: актуальные вопросы, достижения и инновации», 20 – 30 ноября 2018 г. – 0,3 п. л. – URL: [http://akademnova.ru/publications\\_on\\_the\\_results\\_of\\_the\\_conferences](http://akademnova.ru/publications_on_the_results_of_the_conferences)*

### **СЕКЦИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Ил.Т. Мирсяпов**  
заведующий кафедрой Железобетонные и каменные конструкции, д.т.н.,  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

## **СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ ВЫНОСЛИВОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

В настоящее время расчет ЖБК на выносливость нормами до сих пор предлагается производить на основе метода расчета по допускаемым напряжениям [1]. Это, несмотря на то, что уже в начале 30-х годов прошлого века были очевидны условность и противоречивость основ метода расчета ЖБК по допускаемым напряжениям. А.Ф.Лолейтом были выявлены и доказаны неэкономичность применения этого метода расчета для ЖБК, невозможность обеспечения одинаковой степени надежности элементов конструкций. Поэтому с 1936 г. в нашей стране полностью отказались от применения этого метода при расчете ЖБК.

В связи с этим уже давно ощущается острая необходимость в создании современных теории выносливости и методов расчёта ЖБК на выносливость, учитывающих режимы реального деформирования бетона и арматуры в составе железобетонного элемента, реальные механизмы и формы усталостного разрушения железобетонных элементов. Главной тенденцией разработки научных основ теории усталостного сопротивления железобетонных элементов при многократно повторяющихся нагрузках, как и при статическом нагружении, должна быть применение принципа Лолейта, т.е. разработка расчетных моделей усталостного сопротивления, которые дают ясное представление о работе элементов в процессе циклического нагружения,

действующих внутренних усилиях и природе их возникновения, характере деформирования и причинах усталостного разрушения. Затем на основе этих моделей необходимо разработать методы расчета применительно к конкретным формам усталостного разрушения, учитывающих, режимы реального деформирования бетона и арматуры в составе железобетонного элемента, учитывающие особенности НДС железобетонных элементов и его изменение в процессе циклического нагружения. В таком случае, как следствие, в явном виде учитываются все основные факторы, влияющие на выносливость и нет необходимости применять эмпирические коэффициенты, учитывающие те или иные особенности усталостного сопротивления ЖБК.

При многократно повторяющихся нагрузках с увеличением количества циклов нагружения происходит снижение уровня напряжений, при которых происходит усталостное разрушение, т.е. происходит снижение усталостной (остаточной) прочности бетона и арматуры. При этом происходит также интенсификация ползучести бетона (виброползучесть), приводящая к увеличению остаточных деформаций бетона. Как результат развития деформаций виброползучести бетона в стеснённых условиях, в процессе циклического нагружения происходит непрерывное изменение НДС, коэффициентов асимметрии цикла напряжений, а, следовательно, и пределов выносливости бетона и арматуры. В результате после  $N$  циклов нагружения мы имеем конструкцию с совершенно другими физико-механическими характеристиками составляющих материалов, по сравнению с первым циклом нагружения. Это уже не та конструкция, которая была при первом нагружении, а другая. Поэтому, в каждый момент времени или после каждого цикла нагружения мы имеем как бы новые конструкции, с новыми усталостными характеристиками бетона и арматуры. В этой связи в каждый момент времени мы должны одновременно оценивать внутренние усилия (напряжения) и состояние бетона и арматуры (остаточную прочность) в составе конструкции. В таких условиях наиболее рациональным является оценка состояния конструкций при повторных нагрузках, через записывание (проверку) условий выносливости.

Условия выносливости ЖБК в обобщенном виде представляем как

$$\sigma_i^{max}(t) < R_{i,rep}, \quad (1)$$

где  $\sigma_i^{max}(t)$  - текущие (максимальные) напряжения (в бетоне или арматуре), в зависимости от формы усталостного разрушения либо в каком-то локальном объеме либо в каком-то усредненном массиве;  $R_{i,rep}$  - пределы выносливости бетона или арматуры.

При этом и правые стороны, и левые стороны условий выносливости не статичны, с увеличением количества циклов нагружения происходит непрерывное изменение и левой и правой сторон этих условий выносливости. Поэтому при оценке выносливости элементов необходимо рассчитывать НДС в бетоне и арматуре и их пределов выносливости на протяжении всего циклического нагружения. В целях упрощения оценки НДС железобетонных элементов в процессе циклического нагружения, действие многократно повторяющейся нагрузки целесообразно разделить на два этапа и поэтому работу элемента удобно разделить также на два этапа. Первый этап отражает работу и НДС конструкции при первом цикле ( $N=1$ ) нагружения до максимальной нагрузки цикла  $P_{max}$ . Второй этап включает работу конструкций на протяжении всего циклического нагружения (при  $N > 1$ ) и на этом этапе отражается весь процесс непрерывного изменения НДС элементов, коэффициентов асимметрии цикла напряжений и пределов выносливости бетона и арматуры из-за интенсивного развития деформаций виброползучести  $\varepsilon_{lc,n}$  сжатого бетона в стесненных условиях. В обобщенном виде текущие напряжения  $\sigma_i^{max}(t)$ , коэффициенты асимметрии цикла напряжений  $\rho_i(t)$  и пределы выносливости  $R_{i,rep}$  с учетом накопления остаточных напряжений представляем в виде

$$\sigma_i^{max}(t) = \sigma_i^{max}(t_0) \pm \sigma_i^{ocm}(t); R_{i,rep} = f(\rho_i); \rho_i(t) = \langle \rho \cdot \sigma_i^{max}(t_0) \pm \sigma_i^{don}(t) \rangle / \langle \sigma_i^{max}(t_0) \pm \sigma_i^{don}(t) \rangle, \quad (2)$$

где  $\sigma_i^{max}(t_0)$  и  $\sigma_i^{ocm}(t)$  - соответственно, начальные напряжения при первом нагружении и остаточные напряжения вследствие развития и накопления деформаций виброползучести бетона в стесненных условиях;  $R_{i,rep}$  - пределы выносливости бетона или арматуры после  $N$  циклов нагружений;  $\rho_i(t)$  - коэффициенты асимметрии цикла напряжений бетона или арматуры после  $N$  циклов нагружений;  $\rho = P_{min} / P_{max}$ .

В зависимости от конструктивных особенностей элементов, от схемы нагружения, вида НДС и как следствие от возможных форм разрушения, условий выносливости может быть несколько. Поэтому необходимо выявлять экспериментальным путем локальные объемы конструкции, в которых происходит усталостное разрушение; устанавливать причины и критерии усталостного разрушения в этих локальных объемах.

Механизм работы и формы усталостного разрушения по нормальному сечению изгибаемых ЖБК просты и очевидны. После образования нормальной трещины, усталостное разрушение обычно происходит либо из-за

усталостного разрушения бетона сжатой зоны либо из-за усталостного разрыва рабочей арматуры в растянутой зоне.

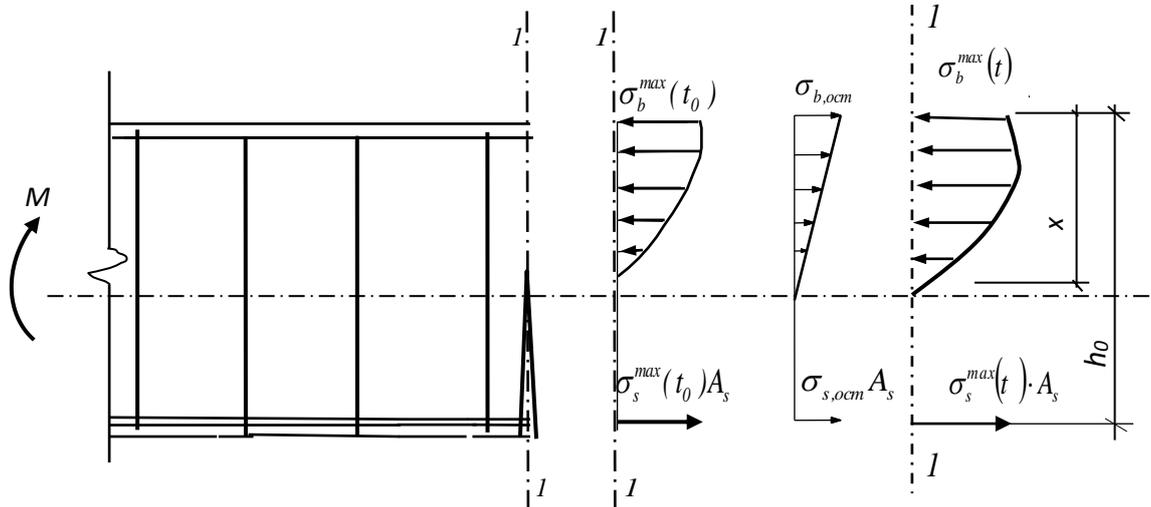


Рис.1. Расчетная модель усталостного сопротивления нормального сечения при чистом изгибе

Поэтому при расчете ЖБК на выносливость по нормальному сечению условия выносливости (1) переписываем в виде

$$\sigma_b^{max}(t) < R_{b,rep}, \quad \sigma_s^{max}(t) < R_{s,rep}, \quad (3)$$

т.е. сравнивается наибольшее напряжение в бетоне сжатой зоны с его пределом выносливости и сравнивается наибольшее напряжение в рабочей растянутой арматуре с её пределом выносливости.

Текущие напряжения  $\sigma_b^{max}(t)$ ,  $\sigma_s^{max}(t)$  и коэффициенты их асимметрии определяются по (2) с учетом распределения начальных и остаточных напряжений (Рис.1) т.е.

$$\sigma_b^{max}(t) = \sigma_b^{max}(t_0) - \sigma_{b,ocm}(t) \quad \text{и} \quad \sigma_s^{max}(t) = \sigma_s^{max}(t_0) + \sigma_{s,ocm}(t), \quad (4)$$

$$\rho_b(t) = \langle \rho \cdot \sigma_b^{max}(t_0) - \sigma_{b,ocm}(t) \rangle / \langle \sigma_b^{max}(t_0) - \sigma_{b,ocm}(t) \rangle \quad \text{и} \quad \rho_s(t) = \langle \rho \cdot \sigma_s^{max}(t_0) + \sigma_{s,ocm}(t) \rangle / \langle \sigma_s^{max}(t_0) + \sigma_{s,ocm}(t) \rangle. \quad (5)$$

В зоне действия поперечных сил после образования и развития наклонных трещин при увеличении количества циклов нагружения в 4-ой стадии НДС усталостное разрушение железобетонного элемента по наклонному сечению происходит либо по сжатой зоне либо в результате усталостного разрыва наиболее нагруженных стержней поперечной арматуры, пересекающихся с начальным участком критической наклонной трещины, либо по растянутой зоне из-за усталостного разрыва продольной арматуры или из-за нарушения анкеровки продольной арматуры.



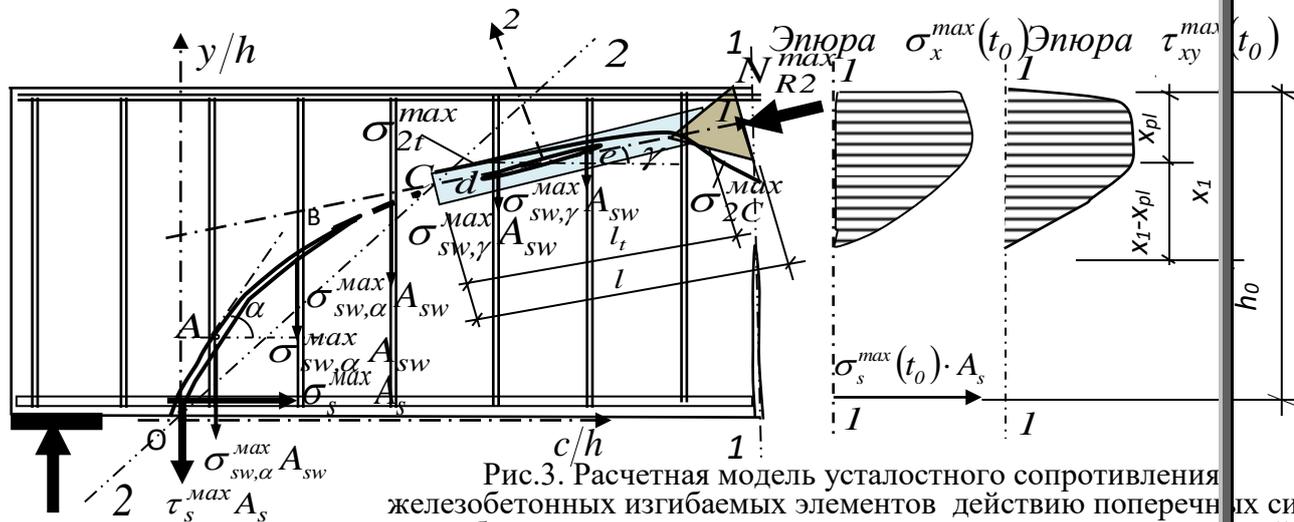


Рис.3. Расчетная модель усталостного сопротивления железобетонных изгибаемых элементов действию поперечных сил при больших пролетах среза и при равномерно-распределенной нагрузке.

Текущие напряжения в бетоне и арматуре и коэффициенты их асимметрии определяются на основе этих расчетных моделей усталостного сопротивления по (2) с учетом распределения начальных и остаточных напряжений [4].

Пределы выносливости бетона, продольной и поперечной арматуры, а также анкеровки арматуры определяются из соответствующих критериев усталостной прочности [5,6].

При внецентренном сжатии с большим эксцентриситетом условия выносливости и расчетную модель усталостного сопротивления можно представить в виде  $\sigma_b^{max}(t) < R_{b,rep}$ ,  $\sigma_{sc}^{max}(t) < R_{s,rep}$ ,  $\sigma_s^{max}(t) < R_{s,rep}$ , (7)

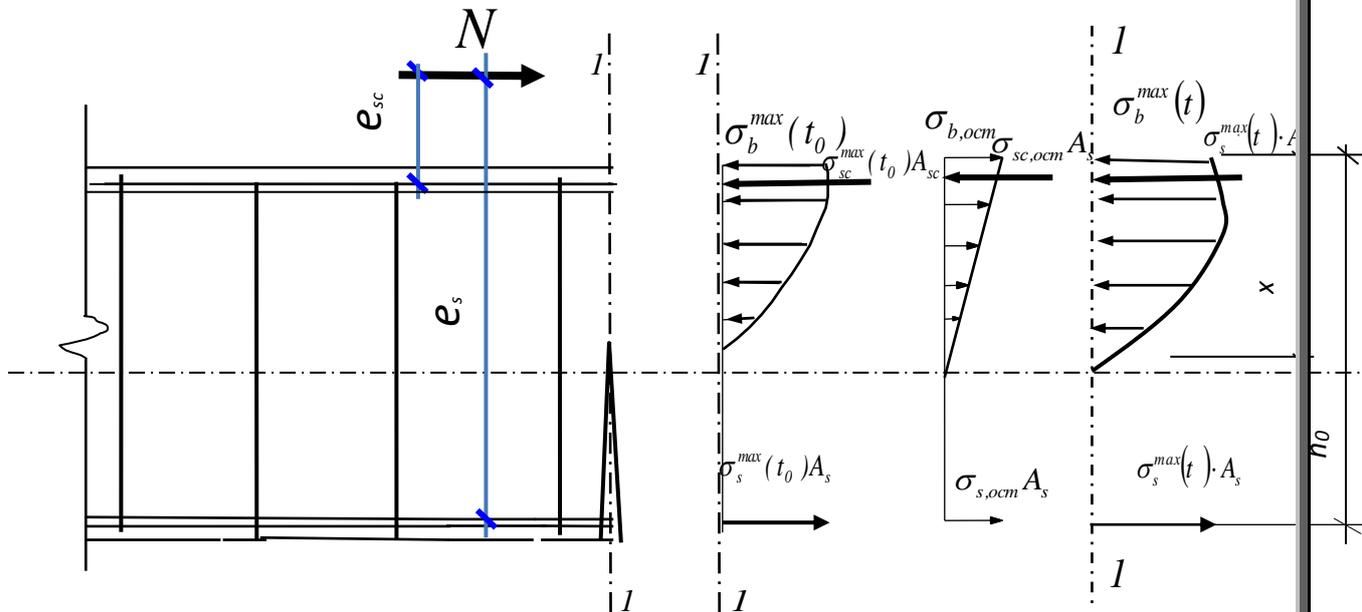


Рис.4. Расчетная модель усталостного сопротивления при внецентренном сжатии

где  $\sigma_b^{max}(t)$  - текущие напряжения в бетоне сжатой зоны;  $\sigma_{sc}^{max}(t)$  - текущие напряжения в сжатой арматуре;  $\sigma_s^{max}(t)$  - текущие напряжения в растянутой арматуре (рис. 4);  $R_{b,rep}^{loc}(t)$ ,  $R_{s,rep}(t)$  - пределы выносливости бетона и арматуры.

При малых эксцентриситетах, а также в элементах со случайным эксцентриситетом условия выносливости принимают вид

$$\sigma_b^{max}(t) < R_{b,rep}, \quad \sigma_{sc}^{max}(t) < R_{s,rep}, \quad (8)$$

где  $\sigma_b^{max}(t)$  - текущие напряжения в сжатом бетоне;  $\sigma_{sc}^{max}(t)$  - текущие напряжения в сжатой арматуре;  $R_{b,rep}^{loc}(t)$ ,  $R_{s,rep}(t)$  - пределы выносливости бетона и арматуры.

#### Список использованной литературы:

1. Мирсаяпов Ил.Т. К расчету железобетонных конструкций на выносливость/ Ил.Т.Мирсаяпов, А.Г.Тамразян// Промышленное и гражданское строительство— Москва. 2016, №11. – С. 70-74.
2. Mirsayapov И.Т. A study of stress concentration zones under cyclic loading by thermal imaging method/ И.Т. Mirsayapov//Strength of Materials. – New York: Springer New York, 2009, Vol 41, Number 3. – pp. 339-344.

**Всероссийское СМИ**

**«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»**

Свидетельство о регистрации ЭЛ №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

3. Мирсяяпов Ил.Т. Выявление зон концентрации напряжений при циклическом нагружении методом тепловизионного контроля/ Ил.Т.Мирсяяпов// Известия Российской академии наук: Механика твердого тела. М., 2010, №1 - С. 166-173.
4. Мирсяяпов Ил.Т. Обеспечение безопасности железобетонных балок по наклонному сечению при многократно повторяющихся нагрузках/ Ил.Т.Мирсяяпов// Жилищное строительство. – Москва. 2016, №1. – С. 23-27.
- 5.Мирсяяпов Ил.Т. К разработке научных основ теории выносливости железобетонных конструкций /Ил.Т.Мирсяяпов, А.Г.Тамразян// Промышленное и гражданское строительство– Москва. 2017, №1. – С. 50-56.
6. Мирсяяпов Ил.Т. Предел выносливости анкеровки арматуры/ Ил.Т.Мирсяяпов// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – Москва. 2016, №1. – С. 37-42.

**Опубликовано: 25.11.2018 г.**

**© Академия педагогических идей «Новация», 2018**

**© Мирсяяпов И.Т., 2018**