

**ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЙ  
НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК НА ИЗВЕСТНЯКОВОМ ПЕСКЕ**

**Кушнарева Г.А.**, к.т.н., доцент,

**Паску О.Д.**

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры  
asp\_yarema@ukr.net*

**Аннотация.** Исследовано влияние циклических нагрузжений на напряженно-деформированное состояние наклонных сечений железобетонных балок на известняковом песке. Для получения экспериментальных данных, использовался четырехфакторный план Бокса-Бенкина. Анализ априорной информации, характеризующей работу наклонных сечений, позволил получить математические модели, которые оценивают влияние каждого независимого переменного, их взаимодействия и получить исчерпывающую информацию о характере полиномов. Наибольшее влияние на изменение величин нормальных и касательных напряжений оказывает пролет среза, уровень нагружения и коэффициент асимметрии цикла.

**Ключевые слова:** железобетон, балки, сечения, усталость.

**ВПЛИВ ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН  
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК НА ВАПНЯКОВОМУ ПІСКУ**

**Кушнарьова Г.О.**, к.т.н., доцент,

**Паску О.Д.**

*Одеська державна академія будівництва та архітектури  
asp\_yarema@ukr.net*

**Анотація.** Досліджено вплив циклічних навантажень на напружено-деформований стан похилих перерізів залізобетонних балок на вапняковому піску. Для отримання експериментальних даних, використовувався чотирифакторний план Бокса-Бенкіна. Аналіз априорної інформації, що характеризує роботу похилих перерізів, дозволив одержати математичні моделі, які оцінюють вплив кожної незалежної змінної, їх взаємодії і отримати вичерпну інформацію про характер поліномів. Найбільший вплив на зміну величин нормальних і дотичних напружень має проліт зрізу, рівень навантаження і коефіцієнт асиметрії циклу.

**Ключові слова:** залізобетон, балки, перерізи, втомленість.

**THE IMPORTANT OF CYCLIE LOADINGS ON THE STRESS-STRAIN STATE  
OF REINFORCED CONCRETE BEAMS ON LIMESTONE SAND**

**Kushnareva G. A.**, PhD., Assistant Professor,

**Pascu O.D.**

*Odessa State Academy of Building and Architecture  
asp\_yarema@ukr.net*

**Abstract.** The most building constructions, including crane runway beams, roof and floor panels, are under influence of repeated loads due to various vibrating machine, that are installed on

them. Also construction, that are designed for static load, are subjected to cyclic loads, which requires the estimation of the fatigue strength. The purpose and objective of the present study is obtaining of design method of inclined cross-sections endurance, based on the study of stress-strain state. The reinforced concrete beams on limestone sand was tested for determination of support zone stress-strain under the action of repeated loads with using of four-factor Box-Benkin plan. The study found that over the inclined crack compressive strain grows faster than under it. The degree of longitudinal strain increasing depends on the level repeated loads. At high level of loads deformations growth is negligible. Near the top of inclined crack the coefficient of cycle asymmetry increases with number of load cycles. Development of vibrocreep deformation leads to change of stress diagramm in the tension reinforcement. The coefficient of elastic-plastic deformation decreased with increasing of cycles number. At change of factors, the normal stresses in concrete over the inclined crack at cyclic loads increased by 26%, and shear stresses - 11%. It indicates the consolidation concrete structure.

**Keywords:** reinforced concrete, beams, section, fatigue.

**Введение.** Большинство строительных конструкций, в том числе подкрановых балок, панелей покрытия и перекрытия, на которые устанавливаются различные вибрационные машины, находятся под действием многократно повторяющихся нагрузок. Такие конструкции, рассчитанные на статическое нагружение, испытывают воздействие циклических нагрузок, что требует оценки их усталостной прочности.

В связи с нехваткой кварцевого песка в южных регионах Украины особую актуальность приобретает использование отходов известняков. Известняковый песок, получаемый дроблением и рассевом отходов камнепиления, по своим механическим характеристикам, пригоден к изготовлению бетона и конструкций.

**Цели и задачи.** Необходимо получить методы расчета выносливости наклонных сечений на основе изучения их напряженно-деформированного состояния.

**Объекты и методы исследования.** Для определения напряженно-деформированного состояния приопорной зоны при действии многократно повторяющихся нагрузок исследовались железобетонные балки на известняковом песке с использованием четырехфакторного плана Бокса-Бенкина [1]. Балки испытывали как однопролетные свободно опертые, нагруженные двумя сосредоточенными силами. Варьировались факторы: пролет среза (1,14; 2,0; 2,86)  $h_0$ , процент продольного армирования (1,3; 1,8; 2,3) %; прочность бетона (17; 21; 25) МПа; коэффициент асимметрии цикла (0,25; 0,33; 0,41)  $\rho_a$ . Возраст бетона от 9 до 12 месяцев. Перед приложением циклического нагружения, нагружали экспериментальные балки до верхнего предела повторного нагружения.

Исследование напряженно-деформированного состояния в приопорной зоне и результаты статического нагружения железобетонных балок на известняковом песке изложены в работе [2].

**Результаты исследований.** При статическом загрузении до уровня максимальной нагрузки  $V_{max}$ , распределение продольных деформаций бетона претерпевает не только количественные, но и качественные изменения. До образования наклонных трещин распределение нормальных деформаций по высоте балки происходит по закону, близкому к линейному с максимумом у верхней грани.

После появления наклонных трещин деформации сжатия растут быстрее, чем под ними. Вблизи наклонной трещины деформации сжатия распределились по ломаной линии и наблюдалась точка перелома эпюры. Максимальные значения деформаций у груза и у опоры. Действие многоциклового нагружения у балок, у которых появились наклонные трещины, приводит только к количественным изменениям, т.е. изменению полноты их эпюр распределения.

Над наклонной трещиной деформации сжатия растут быстрее, чем под ней. Степень увеличения продольных деформаций зависит от уровня повторной нагрузки. При высоких уровнях нагружения деформации при статическом нагружении достигают значительных

величин. При многократном приложении нагрузки рост деформаций у таких балок незначителен. Заметное изменение продольных деформаций отмечается у балок, у которых  $V_{\max}$  не превышает нагрузки трещинообразования  $V_{\text{кр}}$ , т.е. при низких значениях максимальной нагрузки.

Действие повторной нагрузки вызывает увеличение полных деформаций сжатой зоны. Рост полных деформаций  $\varepsilon_{\text{сж}}$  происходит в результате увеличения их остаточной части. При минимальной нагрузке цикла  $V_{\min}$  увеличение деформаций более существенное, чем при максимальной нагрузке, что приводит к изменению коэффициента асимметрии цикла деформаций бетона:

$$\rho_{\varepsilon x} = \frac{\varepsilon_{x,\min}}{\varepsilon_{x,\max}} . \quad (1)$$

Вблизи вершины наклонной трещины  $\rho_{\varepsilon x}$  увеличивается с ростом количества циклов. При этом происходит расхождения коэффициентов асимметрии цикла внешней нагрузки и деформаций бетона, которое увеличивается с ростом количества циклов.

Рост деформаций сжатия в верхнем краевом волокне бетона над наклонной трещиной зависит от уровня загрузки, процента продольного армирования, пролета среза и коэффициента асимметрии цикла нагрузки. При пролете среза  $1,14 h_0$  более интенсивно росли деформации балок с низким процентом продольного армирования  $\mu_s=1,3\%$  и коэффициентом асимметрии цикла  $\rho_a=0,25$ .

Относительное приращение деформаций бетона сжатой зоны верхнего краевого волокна после приложения  $100 \cdot 10^3$  циклов нагрузки, по сравнению с аналогичными деформациями после первого статического нагружения, находилось в пределах от 4 до 9. Увеличение деформаций в процессе первых  $20 \cdot 10^3$  циклов нагрузки составляло 57,8% общего прироста этих деформаций за  $100 \cdot 10^3$  циклов повторной нагрузки.

Деформации в верхнем краевом волокне значительны по величине. Развитие деформаций виброползучести приводит к изменению эпюры напряжений в растянутой арматуре, увеличению плеча внутренней пары, т.е. к снижению напряжений в растянутой арматуре. В отдельных сечениях балок высота сжатой зоны уменьшилась на 50...70%.

В верхних краевых волокнах бетона у балок с пролетом  $1,14 h_0$ , вблизи действия сосредоточенной силы, возникали деформации растяжения в связи с перераспределением усилий и возникновением трещин на верхней грани балки (Б-1А-19; Б-1А-7; Б-1А-8 и другие). В крайних волокнах балки и по направлению к наклонной трещине наблюдались деформации сжатия, вблизи места пересечения наклонной трещины достигли своих максимальных значений. В приопорной зоне бетон работает в условиях плоского напряженного состояния. Происходит перераспределение внутренних усилий с бетона на продольную арматуру растянутой зоны и бетон нижележащего блока. Из-за виброползучести бетона происходит перераспределение остаточных усилий между бетоном и хомутами, пересекающих наклонную трещину. В результате этого касательные напряжения в бетоне уменьшаются.

При величине пролета среза  $2,0 h_0$  эпюры деформаций бетона до приложения пульсирующей нагрузки были близкими к треугольным.

Величины деформаций росли по мере увеличения количества циклов. Относительное приращение деформаций сжатой зоны бетона после приложения  $20 \cdot 10^3$  циклов, по сравнению с аналогичными деформациями, после приложения статической нагрузки находилось в пределах от 1,4 до 2,7.

Прирост деформаций на протяжении испытаний происходит неравномерно. В первые  $1 \cdot 10^3$  циклов составил от 70 до 78% общего прироста этих деформаций за  $20 \cdot 10^3$  циклов.

Для балок с пролетом среза  $2,86 h_0$  максимальные значения деформаций достигали  $\varepsilon_c=125 \cdot 10^{-5}$ . Стабилизации деформаций не наблюдалось [3].

Продольные деформации сжатия в вертикальном сечении, проходящем через вершину наклонной трещины, распределялись по линейному закону как выше, так и ниже наклонной

трещины. При этом градиент деформаций над трещиной выше градиента деформаций под трещиной, поэтому в вершине трещины, эпюра нормальных деформаций имеет перелом. При дальнейшем приложении пульсирующей нагрузки происходит перераспределение усилий, деформации сжатия уменьшаются и их значения равны нулю или развиваются деформации растяжения. Появление деформаций растяжения объясняется тем, что поперечную силу, действующую на балку, воспринимает уже не бетон, а растянутая арматура, которая работает на изгиб, и поперечная арматура. Верхний блок пролета среза загружен неравномерной нагрузкой, которое передается в виде напряжений от сжатого бетона чистого изгиба и нагрузкой в зоне приложения силы. Равнодействующая усилий не проходит через ядро сечения верхнего блока, действует изгибающий момент и продольная сжимающая сила. В этом случае в крайних волокнах бетона возникают деформации растяжения (Б-3А-18).

Для железобетонных балок на гранитном щебне и известняковом песке величина коэффициента упругопластических деформаций бетона  $\lambda_c$  уменьшается с ростом количества циклов циклической нагрузки и составляет от  $1 \cdot 10^3$  циклов до разрушения от 0,8% до 24,8%. Значения  $\lambda_c$  находилось в пределах от 0,75 до 0,48.

Мера виброползучести бетона  $\varphi_c$  соответствует соотношению остаточных и упругих деформаций. Для опытах балок  $\varphi_c$  находится в пределах от 0,4 до 0,917.

Характеристика виброползучести бетона сжатой зоны балки отличается от характеристики виброползучести призм. В бетоне сжатой зоны образуется двухосное напряженное состояние, так как действуют нормальные напряжения от местного действия сосредоточенной силы и опорной реакции  $\sigma_y$  и нормальных напряжений, действующих перпендикулярно к продольной оси элемента  $\sigma_x$ , от изгибающего момента. Напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  в каждой точке изменяются, что приводит к неоднородному двухосному напряженному состоянию.

При уровне нагружения, равному максимальному статическому усилию, то есть при нагрузке, не превышающей  $V_{стc}$ , при образовании наклонных трещин, эпюра нормальных напряжений в сжатом бетоне треугольная, пластические деформации развиваются мало.

При воздействии многоцикловых нагружений в бетоне сжатой зоны происходит накопление пластических деформаций, что приводит к изменению эпюры напряжений бетона над наклонной трещиной.

Оценка напряженно-деформированного состояния в пролете среза выполнялась с использованием планированного эксперимента.

Параметрами выхода являются числовые значения статических моделей  $Y_j$ , которые отражают влияния факторов  $X_1$  (пролет среза),  $X_2$  (процент продольного армирования),  $X_3$  (прочность бетона),  $X_4$  (коэффициент асимметрии цикла), на изменение нормальных и касательных напряжений в бетоне над наклонной трещиной после приложения циклической нагрузки.

$$Y_1(\sigma_{c,N}) = 13,1 + 4,14X_1 - 0,77X_2 - 0,66X_3 - 1,83X_4 + 0,58X_1^2 - 0,47X_2^2 + \\ + 0,31X_3^2 + 0,71X_4^2 - 0,58X_1 \cdot X_2 + 1,45X_1 \cdot X_3 - 0,08X_1 \cdot X_4 - 0,28X_2 \cdot X_3 + \\ + 0,42X_2 \cdot X_4 + 0,2X_3 \cdot X_4. \quad (2)$$

$$Y_2(\tau_{c,N}) = 7,52 + 1,46X_1 - 0,32X_2 + 0,3X_3 - 1,44X_4 - 0,55X_1^2 - 0,08X_2^2 - \\ - 0,49X_3^2 - 0,68X_4^2 + 0,182X_1 \cdot X_2 + 0,986X_1 \cdot X_3 - 0,75X_1 \cdot X_4 - \\ - 0,175X_2 \cdot X_3 - 0,125X_2 \cdot X_4 + 0,033X_3 \cdot X_4. \quad (3)$$

Из уравнения (2) следует, что нормальные напряжения в бетоне над наклонной трещиной при действии циклического нагружения увеличились по отношению к средним значениям параметра на 26%. Наличие знака «+» при квадратичном эффекте говорит об отрицательной кривизне параболической кривой, область оптимума находится за пределами варьирования. Увеличение величины нормальных напряжений  $\sigma_{c,N}$  в пределах интервала варьирования, происходит при увеличении пролета среза, уменьшении коэффициентов

продольного армирования и асимметрии цикла повторной нагрузки. Из уравнения (3) видим, касательные напряжения в бетоне над наклонной трещиной растут по сравнению со средними значениями на 11%. Это свидетельствует об уплотнении структуры бетона.

Зависимости нормальных и касательных напряжений в бетоне над наклонной трещиной от исследуемых факторов представлены на рис. 1 (а, б).

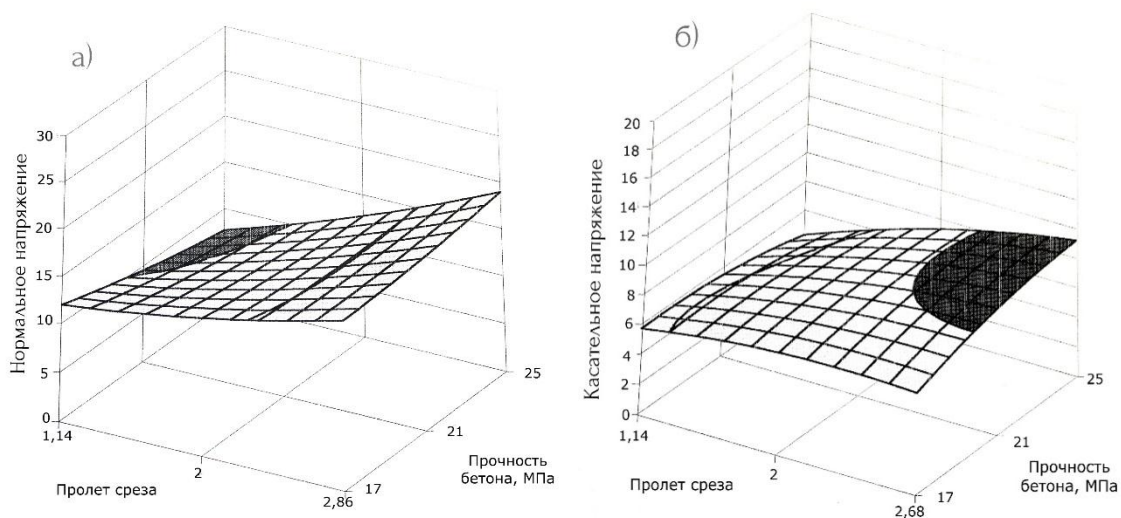


Рис. 1. Напряжения в бетоне над наклонной трещиной:

а – нормальные напряжения в бетоне выше наклонной трещины при циклическом нагружении  $\mu_s=1,8\%$ ,  $\rho=0,33$ ; б – касательные напряжения в бетоне выше наклонной трещины при циклическом нагружении,  $\mu_s=1,8\%$ ,  $\rho=0,33$

#### Выводы.

1. Циклическая нагрузка не приводит к качественным изменениям деформаций, а только к количественным, т.е. изменению полноты эпюр распределения.
2. Степень увеличения продольных деформаций зависит от уровня нагружения. При высоких уровнях нагружения рост деформаций незначителен.
3. Происходит расхождение коэффициентов асимметрии цикла внешней нагрузке и деформаций бетона вблизи вершины наклонной трещины.
4. Развитие деформаций виброползучести приводит к изменению эпюры напряжений в растянутой арматуре.
5. Коэффициент упругопластических деформаций уменьшался с ростом количества циклов.
6. При изменении факторов нормальные напряжения в бетоне над наклонной трещиной при действии циклических нагрузок увеличились на 26%, а касательные – на 11%. Это свидетельствует об уплотнении структуры бетона.

#### Литература

1. Кушнарєва Г.А. Несущая способность и расчет железобетонных балок на известняковом песке наклонных сечений при действии многократно повторяющихся нагрузок: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Кушнарєва Галина Александровна. Одесский инженерно-строительный институт. – Одесса, 1991. – 16 с.
2. Карпюк В.М. Стан та перспективи розвитку міцності похилих перерізів прогінних залізобетонних елементів / В.М. Карпюк, А.І. Костюк, Г.О. Кушнарєва, Є.І. Албу // Вісник ОДАБА, випуск №50 ч.1, 2013. – С. 116-124.
3. Кушнарєва Г.О. Зміна величин прогинів залізобетонних балок на вапняковому піску при дії циклічних навантажень / Г.О. Кушнарєва, О.В. Войтко // Будівельні конструкції, випуск 82. – Київ, 2015. – С. 255-261.