

УДК 691.97.053.3

**Дорофеев В.С.**д.т.н., профессор кафедры инженерных конструкций и водных исследований,  
Одесский национальный морской университет, г. Одесса**Пушкарь Н.В.**к.т.н., профессор кафедры железобетонных конструкций и транспортных сооружений,  
Одесский национальный морской университет, г. Одесса

## ДЕФОРМАЦИИ БЕТОНА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

**Аннотация.** В статье рассмотрены механизмы трансформации технологических трещин в эксплуатационные при знакопеременных объёмных деформациях набухания и усадки. Представлены механизмы роста усталостных трещин при цикле уменьшения объёма материала. Рассмотрены механизмы роста усталостных трещин при действии на её берега разновеликих усадочных деформаций.

**Ключевые слова:** деформативность, гидротехнические сооружения, циклические воздействия, технологическая поврежденность, усталостные трещины.

### Постановка проблемы

Известно, что бетон как композиционный строительный материал представляет собой искусственный материал, обладающий комплексом новых свойств, не присущих исходным составляющим. Строительные материалы представляются материалами типа «структура в структуре». Установление закономерностей структурообразования таких сложноорганизованных строительных композитов позволяет решать задачу проектирования оптимальных структур. Под оптимальной понимаем структуру, обеспечивающую требуемые физико-механические свойства и эксплуатационную надежность материала при минимуме материальных, энергетических и трудовых затрат на её производство.

В последние годы при увеличении объёмов монолитного домостроения при производстве строительных материалов используют местные строительные пески, которые имеют большой процент пылеватых частиц, приводящих к нарушению структуры бетонов.

### Анализ последних исследований

В строительных материалах и гидротехнических бетонах на микро- и макроуровнях имеются трещины – структурные элементы, которые приводят к концентрации напряжений у своего устья, превышающих средние напряжения в материале под действием внешних нагрузок. Трещины характеризуются длиной  $a$ , шириной раскрытия  $b$ , радиусом устья  $r$ , фронтом  $L$ , морфологией и структурой берегов. Физико-механические характеристики бетонов определяются видом, ориентированием и количеством трещин [1, с. 6–9].

Для гидротехнических сооружений наибольший интерес представляет механизм трансформации технологических трещин в эксплуатационные. При действии знакопеременных нагрузок рассмотрим несколько моделей (рис. 1а).

Под действием растягивающих напряжений в некоторой плоскости происходит сдвиг с изменением знака в параллельных плоскостях. При этом возможны выдавливание или экструзия либо вдавливание или интрузия поверхности достаточно изотропного и упругого материала. При переменных напряжениях выдавливание представляет собой зародышевую трещину, способную расти, пока не достигнет длины, при которой определяющим условием дальнейшего роста становится напряже-

ние у её вершины. Механизм роста трещины представлен на рис. 1б.

Предположим, что в поле высоких напряжений в вершине трещины происходит сдвиг. Это вызывает увеличение ширины раскрытия трещины и её подрастание на величину  $\Delta a$ . Происходит сдвиг в другой плоскости (этап III). Диффузионные процессы способны превратить острый конец трещины в тупой. Под действием сжимающих напряжений ширина раскрытия трещины уменьшается, и возникающие пластические деформации способствуют восстановлению острого устья (этап IV). После чего цикл повторяется, и трещина увеличивается на очередное значение  $\Delta a$ .

Микроструктура бетона представлена структурной неоднородностью «вяжущее-наполнитель» и представляет собой полиструктурный материал блочного строения, в котором кластеры нижнего масштабного уровня служат составной частью кластеров более высокого масштабного уровня [1, с. 25–35; 2, с. 20–26]. Такое сложное строение микроструктуры затрудняет анализ протекающих в ней деформационных процессов. Поэтому на начальных этапах примем ограничения и допущения: микроструктура представляет собой непрерывную среду с определёнными эффективными характеристиками; трещины в ней представляют собой внутренние прямолинейные поверхности раздела с определёнными геометрическими характеристиками; объёмные деформации микроструктуры проявляются на внешних по отношению к ней поверхностях раздела; свойства материала не изменяются в течение одного цикла знакопеременных объёмных изменений; объёмные деформации возникают без градиентов на берегах трещин.

### Цель работы

Исследовать механизмы усталостного разрушения бетонных и железобетонных конструкций при циклических воздействиях знакопеременных объёмных деформаций усадки и набухания с учётом неоднородности структуры бетона.

### Результаты исследований

Рассмотрим полубесконечную пластину с трещиной, расположенной по оси симметрии (рис. 2). Под влиянием внешних воздействий бетон претерпевает объёмные деформации с переменным знаком. Цикл начинается с деформаций

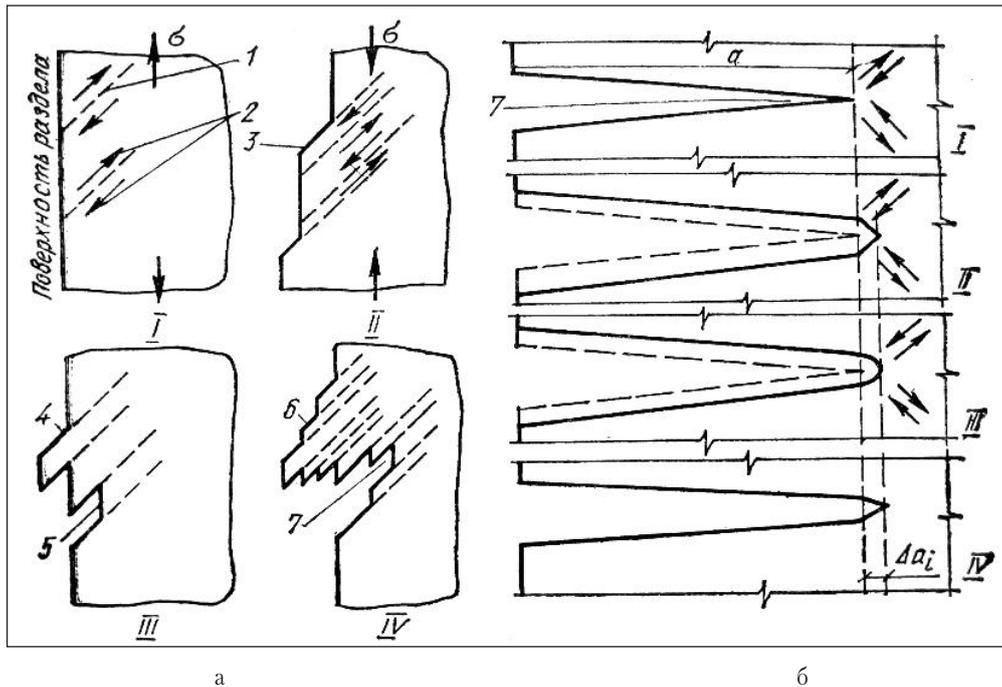


Рис. 1. Механизмы зарождения трещин (а) и их развития (б); I-IV – этапы зарождения и развития усталостных трещин; 1-3 – деформирование по плоскостям; 4, 5 – изменение характера поверхности; 6 – зарождение трещин экструзии; 7 – зарождение трещин интрузии;  $\sigma$  – внешние знакопеременные нагрузки; а – начальная длина трещин;  $\Delta a_i$  – приращение длины усталостной трещины

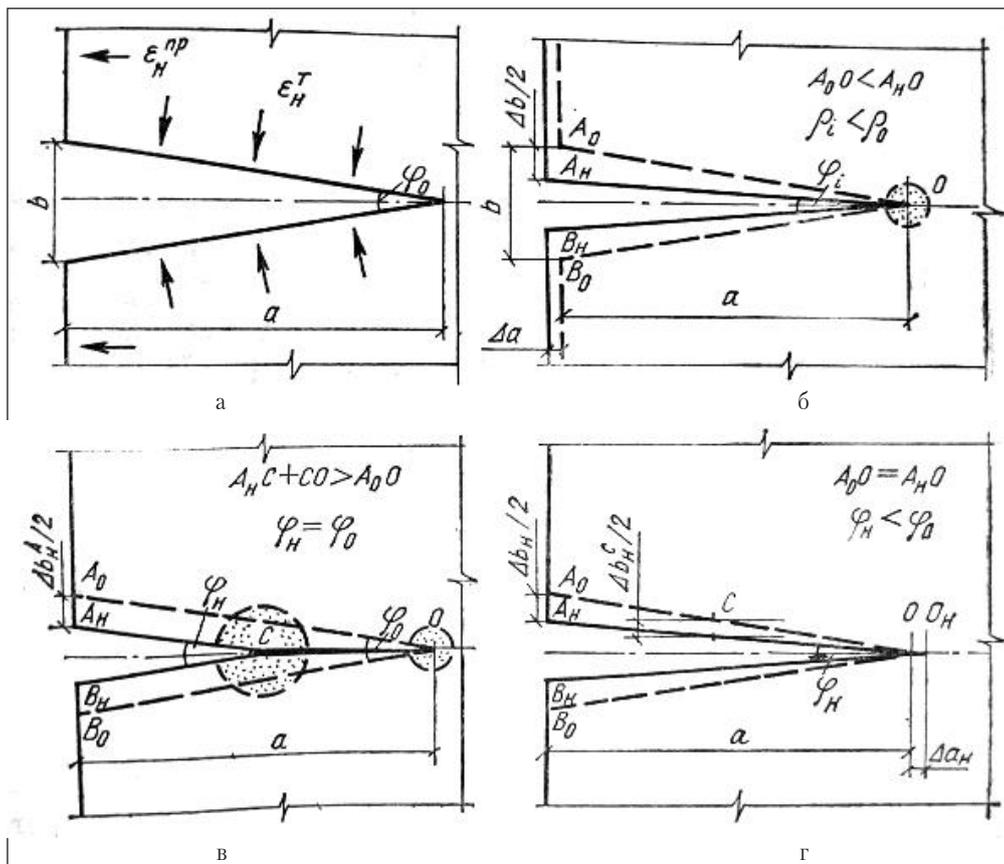


Рис. 2. Механизм усталостного роста технологической трещины при знакопеременных объёмных деформациях набухания: а – геометрические параметры технологической трещины; б – изменение геометрических параметров трещины при пластических деформациях у её устья; в – изменение параметров трещины при пластическом деформировании устья и берегов; г – изменение параметров трещины за счёт её роста

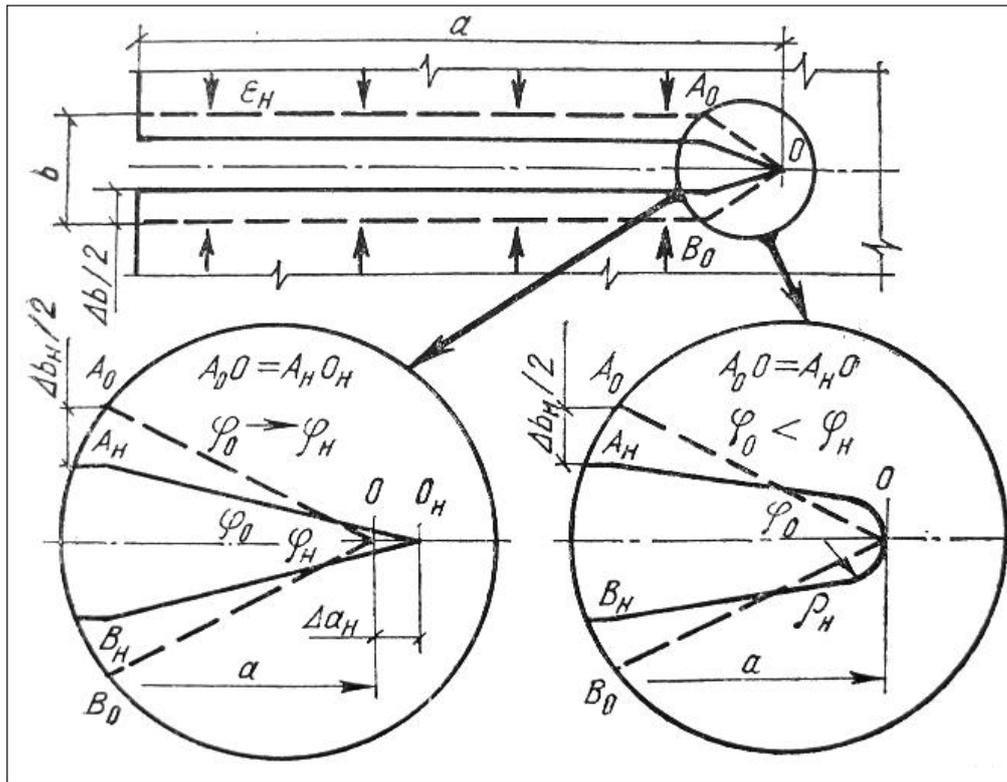


Рис. 3. Механизм роста усталостной трещины при цикле уменьшения объёма материала

увеличения объёма. В силу принятых допущений берега трещин будут перемещаться параллельно самим себе.

Под действием возникших деформаций берега трещины начинают сближаться на значение  $\Delta b_n$ . Деформации, вызывающие смыкание трещин, ведут к смыканию берегов, но не к зарастанию трещины. Поэтому считаем, что положение устья при смыкании гладкой трещины не изменится. Так как на берег действует равномерно распределенная нагрузка, а размеры трещины по её длине различны, то в микроструктуре будут возникать одновременно упругие  $\epsilon_{el}$  и пластические  $\epsilon_{pl}$  деформации.

Пластическое формирование микроструктуры происходит в виду того, что на определенных этапах увеличения объёма будет смыкаться трещина. Если объёмные деформации увеличения объёма, которые появляются на берегах трещины,  $\Delta V_n$ , будут меньше или равны эффективной ширине раскрытия трещины  $V_r$ , будет происходить пластическое деформирование. При  $\Delta V_n > V_r$  берега трещины смыкаются. Часть трещины начинает работать как сам материал, и на этом участке упругие деформации преобладают над пластическими.

При параллельности берегов трещины их смыкание возможно, и общую деформацию пластины можно выразить через пластическую и упругие части:

$$\epsilon = \epsilon_{pl} + \epsilon_{el}$$

Так как пластическое деформирование возможно только в зоне ширины раскрытия трещины, то  $\Delta b_n = \epsilon_{pl}$  и  $\epsilon = \Delta b_n + \epsilon_{el}$ .

Для количественной оценки доли пластического деформирования можно ввести понятие эффективной ширины раскрытия трещины, которую можно определить как средний размер её ширины. Эффективная ширина раскрытия трещины  $b$  зависит от её длины  $a$  и ширины раскрытия  $b$  и может быть определена по формуле:

$$b = a \cdot \cos(\phi/2)$$

Тогда деформация изменения линейных размеров образца при увеличении объёма материала  $\epsilon = n_r \cdot a \cdot \cos(\phi/2)$ , где  $n_r$  – количество трещин, расположенных на расстоянии и не оказывающих влияние друг на друга. При уменьшении объёма микроструктуры до значений  $V_0 - \Delta V_y$  ( $V_0$  – начальный объём материала) равномерно распределенная на берегах трещины деформация усадки вызывает её раскрытие. Деформации берегов при размыкании трещины до её эффективного начального раскрытия  $b$  можно отнести к упругой части усадочных деформаций. После этого наступает период пластического деформирования. В силу принятых допущений трещина не может искривить свои берега, а материал – изменить свои средние характеристики. Поэтому в случае  $\Delta V_y > V_r$  происходит увеличение длины трещины на величину  $\Delta a_y$  (рис. 3).

Одновременно увеличивается ширина её раскрытия  $\Delta b_y$ . Абсолютные значения  $\Delta b_y$  и  $\Delta a_y$  зависят от начальных  $b_0$  и  $a_0$  и деформаций усадки, проявляемых на берегах трещины  $\Delta \epsilon_{el}$ . Между увеличением ширины раскрытия трещины и приращением её длины можно записать зависимость:  $\Delta a_y = \Delta b_y / 2 \operatorname{tg}(\phi/2)$ , где  $\phi$  зависит от геометрии трещины.

Так как ширина раскрытия определяется значением деформации усадки и в нашем случае равна ей, то  $\Delta a_y = \Delta \epsilon_{el} / 2 \operatorname{tg}(\phi/2)$ .

Следовательно, общая линейная усадка образца с трещиной при уменьшении объёма материала:  $\epsilon_{el} = n \cdot \Delta \epsilon_{el} / 2 \operatorname{tg}(\phi/2)$ , где  $n$  – количество не оказывающих влияния друг на друга трещин.

Рассмотрим образец с конечными размерами при условии, что трещины в нём расположены параллельно друг другу на расстоянии, при котором происходит неравномерное распределение деформаций как по длине трещины, так и на противоположных берегах (рис. 4).

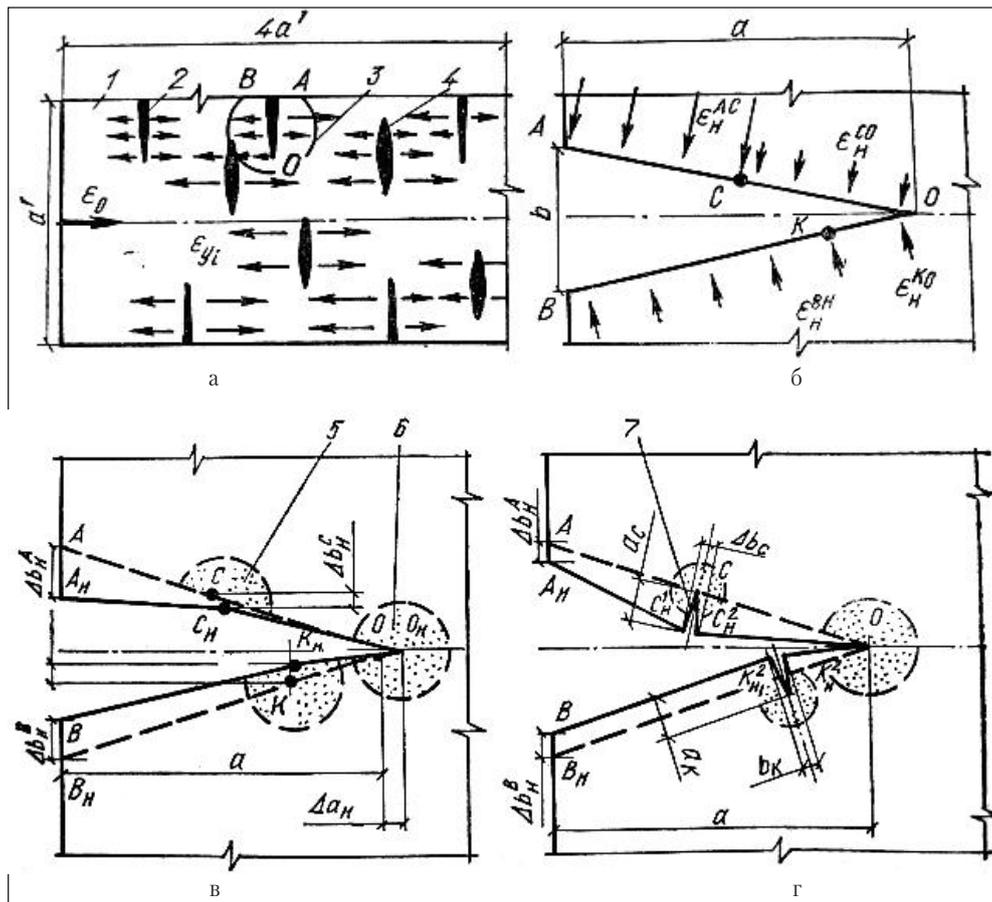


Рис. 4. Механизм роста усталостной трещины при действии на её берега разновеликих усадочных деформаций: а – распределение усадочных деформаций в образце с трещинами; б – геометрические параметры трещины и распределение на её берегах деформаций набухания; в – изменение геометрических параметров трещины за счёт пластического деформирования берегов и устья; г – изменения геометрических параметров трещины за счёт зарождения на её берегах новых трещин; 1 – образец; 2 – поверхностные трещины; 3 – разновеликие усадочные деформации; 4 – трещины в объёме материала; 5 – зоны пластичности на берегах; 6 – зоны пластичности у устья; 7 – новые поверхности раздела на берегах трещины

Увеличение объёма материала вызывает неравномерное распределение деформаций на берегах трещины (рис. 4,б) [3, с. 69–70].

Распределение деформаций в районе трещины А при условии линейной зависимости между объёмными изменениями материала и его линейными деформациями определяли графоаналитическим методом.

Анализ показал, что в силу геометрических особенностей взаиморасположения трещин и их размеров возникают градиенты деформаций, вызывающие появление деформаций сдвига  $\epsilon_{сд}$ . Последние могут возникнуть как на самом берегу трещины, так и у её устья. На берегу трещины  $\epsilon_{сд}$  способны образовывать участки выдавливания, что ведёт к образованию усталостных зародышевых трещин. Сдвиг в вершине трещины ведёт к её развитию на значение  $\Delta a$ . Градиент деформаций определяет и направление развития такой трещины. Таким образом, уже на стадии увеличения объёма материала при неравномерном распределении деформаций набухания на берегах трещин возможен рост трещины и появление зародышевых трещин. Происходит дробление структуры материала (рис. 4,в).

Увеличение длины трещин при изменении направленного их роста и появление зародышевых трещин на этапе увеличения объёма ведут к полному изменению

распределения деформаций на этапе усадки материала. Усадочные деформации появляются на новых поверхностях раздела, что усиливает градиенты деформаций по значению и направлению. Возникшие новые градиенты деформаций способствуют увеличению ширины раскрытия трещин  $\Delta b_v$  и их протяжённости. При этом происходит увеличение количества усталостных трещин.

Микроструктура композиционных строительных материалов представляет собой материал типа «блок в блоке» [4, с. 70–82]. Между отдельными блоками на различных масштабных уровнях существуют поверхности раздела или наследственные трещины.

Объёмные эксплуатационные деформации разных знаков развиваются как в каждом блоке, так и в структуре в целом. На этапе увеличения объёма происходит частичное смыкание масштабных трещин и увеличение ширины раскрытия на участках разнонаправленных деформаций. Этап уменьшения объёма характеризуется увеличением ширины раскрытия трещин (рис. 5).

Как при увеличении объёма материала, так и при его уменьшении происходит концентрация напряжений растяжения в вершине наследственной трещины, что вызывает её подрастание. Таким образом, в структуре материала появляется новая структурная неоднородность – эксплуатационные трещины.

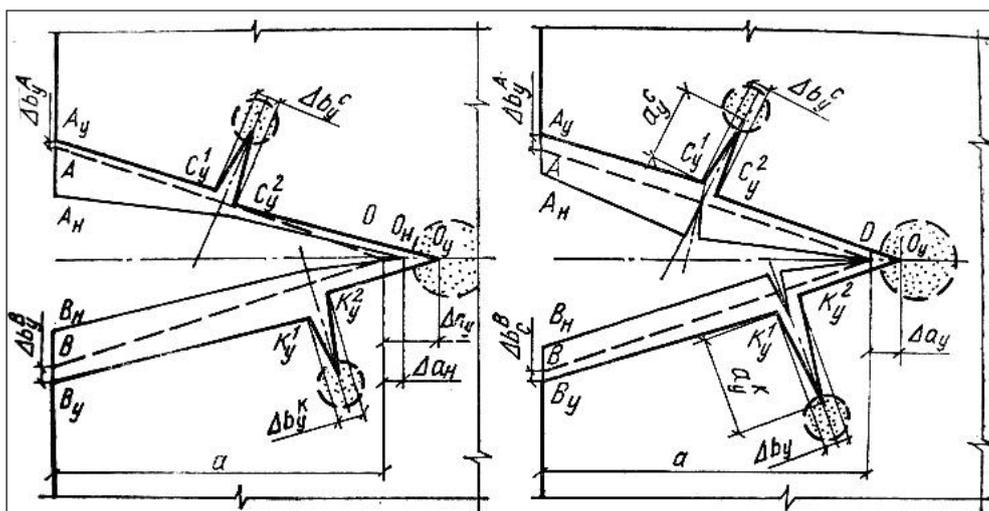


Рис. 5. Механізм росту усталостної тріщини при циклі зменшення об'єму образця: а – рост основної тріщини та появлення нових зародкових тріщин на берегах; б – рост основної тріщини та рост зародкових тріщин, возникших на стадії збільшення об'єму матеріала

Проведений аналіз показав, що технологічна пошкодженість визначається в значительній ступені дисперсністю наповнювача гідротехнічних бетонів.

#### Выводы

Технологічна пошкодженість гідротехнічних бетонів в значительній ступені визначається дисперсністю його наповнювачів.

Проведений аналіз дозволяє заключити, що збільшення початкової пошкодженості матеріала за рахунок утворення множини тріщин сприяє інтенсивному

накопиченню пошкоджень як за рахунок технологічних тріщин, так і за рахунок утворення нових поверхневих розривів. Це впливає на характер руйнування образців після знакозмінної деформації та визначає стійкість бетону при його поперемному зволоженні та висиханні.

Аналіз показав, що в залежності від місця розташування та орієнтації тріщин змінюється характер розподілу деформацій «усадка-набухання» на берегах базової тріщини. Це впливає на довговічність та стійкість конструкцій гідротехнічних споруд.

#### Литература

1. Дорощев В.С. Технологічна пошкодженість будівельних матеріалів та конструкцій. Одеса : Город майстрів, 1998. 168 с.
2. Соломатов В.І. Основи композиційних будівельних матеріалів. Харків : ХІІІГХ, 1990. 52 с.
3. Дорощев В.С. Стійкість бетону гідротехнічних споруд при багаторазовому зволоженні та висиханні. *Журнал – Переяслав-Хмельницький*. 2018. Вип. 4(36), ч. 10. С. 68–73.
4. Соломатов В.І. Композиційні будівельні матеріали та конструкції зменшеної матеріаломісткості. Київ : Будівельник, 1991. 144 с.

#### References

1. Dorofeev V.S. Tehnologicheskaja povrezhdjonnost' stroitel'nyh materialov i konstrukcij / V.S.Dorofeev, V.N.Vyrovoj. – O.: Gorod masterov, 1998. – 168 s.
2. Solomatov V.I. Osnovy kompozicionnyh stroitel'nyh materialov / V.I.Solomatov, V.N.Vyrovoj, V.S.Dorofeev. – Har'kov: NIIGH, 1990. – 52 s.
3. Dorofeev V.S. Stojkost' betona gidrotehniceskix sooruzhenij pri mnogokratnom uvlazhnenii i vysushivanii / V.S.Dorofeev, N.V.Pushkar' Aktual'nye nauchnye issledovanija v sovremennom mire // Zhurnal – Perejaslav-Hmel'nickij, 2018. – Vyp. 4 (36), ch. 10. – S. 68-73.
4. Solomatov V.I. Kompozicionnye stroitel'nye materialy i konstrukcii ponizhennoj materialojomkosti / V.I.Solomatov, V.S.Dorofeev, V.N.Vyrovoj, A.V.Sirenko. – Kiev: Budivel'nik, 1991. – 144 s.

### ДЕФОРМАЦІЇ БЕТОНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД ПРИ ЦИКЛІЧНИХ ВПЛИВАХ

**Анотація.** У статті розглянуті механізми трансформації технологічних тріщин в експлуатаційні при знакозмінних об'ємних деформаціях набухання та усадки. Представлені механізми росту втомих тріщин при циклі зменшення обсягу матеріалу. Розглянуто механізми росту втомих тріщин при дії на її береги різновеликих усадочних деформацій.  
**Ключові слова:** деформативність, гідротехнічні споруди, циклічні впливи, технологічна пошкодженість, втоми тріщини.

**Дорощев В.С.**

д.т.н., професор кафедри інженерних конструкцій і водних досліджень,  
Одеський національний морський університет, м. Одеса

**Пушкар Н.В.**

к.т.н., професор кафедри залізобетонних конструкцій і транспортних споруд,  
Одеський національний морський університет, м. Одеса

**THE DEFORMATIONS OF CONCRETE OF REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS  
OF HYDROTECHNICAL STRUCTURES UNDER CYCLIC EXPOSURE**

**Abstract.** *The article discusses the mechanisms of transformation of technological cracks in the operational with alternating volumetric deformations of swelling and shrinkage. The mechanisms of growth of fatigue cracks during the cycle of reducing the volume of the material are presented. The mechanisms of growth of fatigue cracks under the action of different shrinkage deformations on its shores are considered.*

*It is known that concrete is an artificial composite building material, which has a complex of new properties that are not inherent to the original components. It is also a "structure in structure" material. The establishment of patterns of structure formation of such materials allows us to solve the problem of designing optimal structures. The optimal is the structure that provides the required physical and mechanical properties and operational reliability of the material with a minimum of the cost of its production. In recent years, local construction sands have been used in the production of building materials. They have a large percentage of dust particles, leading to disruption of the structure of concrete. Concrete at micro- and macro-levels has cracks – structural elements that lead to stress concentration at their mouth. Cracks are characterized by the length  $a$ , the opening width  $b$ , the mouth radius  $r$ , the front  $L$ , the morphology and structure of the shores.*

*The hydrotechnical structures are often subjected to cyclic impacts. An increase in the volume of material causes an uneven distribution of deformations on the banks of cracks that are already present in its structure. Due to the geometrical features of the location of cracks and their sizes, gradients of deformations arise, causing the appearance of shear deformations. They can occur both on the shore of the crack, and at its mouth. On the shore, shear deformation cracks are capable of forming extrusion sites, which leads to the formation of fatigue germinal cracks. A shift at the tip of a crack leads to its development by a certain  $\Delta a$  value. The deformation gradient also determines the direction of development of such a crack. Thus, at the stage of increasing the volume of the material, with an uneven distribution of deformations of swelling on the cracks, growth of a crack and the appearance of germinal cracks are possible. There is a crushing of the material structure. Volumetric operational deformations of different signs develop both in each block and in the structure as a whole. At the stage of increasing the volume, there is a partial closure of large-scale cracks and an increase in the width of the disclosure in the areas of multidirectional deformations. The volume reduction stage is characterized by an increase in the crack opening width. As with the increase in the volume of the material, and with its decrease, the growth of structural cracks occurs.*

**Key words:** *deformability, hydraulic structures, cyclic effects, technological damage, fatigue cracks.*

**Dorofeev V.S.**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Engineering Designs and Water Research,  
Odessa National Maritime University, Odessa

**Pushkar N.V.**

Ph.D., Professor of the Department of Reinforced Concrete Structures and Transport Facilities,  
Odessa State Academy of Building and Architecture, Odessa