

## ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕЩИН В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ В СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТАХ

Проф. Дорофеев В.С. (Одесса)

Технологическая поврежденность определяется в значительной степени дисперсностью наполнителя. Можно принять, что бетон разделен на своеобразные структурные блоки, внешними границами которых являются технологические трещины.

При знакопеременном воздействии на бетон в период его эксплуатации увеличение или уменьшение его объема связано с индивидуальными изменениями каждого структурного блока. Как показали опыты [1, 2, 3, 4, 5], усталостная прочность материала с одинаковым модулем упругости может обладать разной скоростью роста трещин.

Под усталостным разрушением будем понимать постепенное накопление повреждений под знакопеременным внешним воздействием до образования опасной для данной структуры трещины и необратимый ее рост. При этом действующие напряжения могут быть значительно ниже тех, которые вызывают разрушение материала при испытаниях на одноосное растяжение. Для объяснения механизма зарождения усталостных трещин предложено несколько моделей [6].

Исследования усталостной стойкости связаны с многоцикловой механической нагрузкой и знакопеременными эксплуатационными нагрузками окружающей среды. При этом внешние воздействия вызывают внутренние деформационные процессы, проявляющиеся на берегах трещин, т.е. знакопеременные объемные изменения материала.

Как отмечалось ранее, микроструктура КСМ 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. Поэтому для анализа деформационных процессов введем следующие допущения: микроструктура представляет собой непрерывную среду с определенными эффективными характеристиками; трещины в микроструктуре представляют собой непрерывную среду с определенными эффективными характеристиками; трещины в микроструктуре представляют собой внутренние прямолинейные поверхности раздела с определенными геометрическими харак-

теристиками; объемные деформации микроструктуры проявляются на внешних по отношению к ней ПР; свойства ее не изменяются внутри одного цикла знакопеременных объемных изменений; объемные деформации возникают без градиентов по сечению образцов.

Представим полубесконечную пластинку с трещиной, претерпевающую объемные деформации с переменным знаком (рис. 1). При увеличении объема на берега трещин будут действовать равномерно распределенные деформации  $\varepsilon_H^T$ .

При действии возникших деформаций берега трещины начинают сближаться на значение  $\Delta V_H$ , при этом зарастание трещины не происходит. Логично предположить, что положение устья при смыкании трещины не изменится. Так как на берег действует равномерно распределенная деформация, а размеры трещины по ее длине различны, то можно утверждать, что в микроструктуре будут возникать одновременно пластические  $\varepsilon_{pl}$  и упругие  $\varepsilon_{el}$  деформации. Пластическое деформирование микроструктуры происходит в результате смыкания трещины на определенных этапах увеличения объема. Если объемные деформации  $\Delta V_H > V_T$ , то берега трещины встречаются друг с другом. Участок трещины начинает работать совместно с материалом, и упругие деформации здесь преобладают над пластическими. При параллельности берегов трещины их смыкание возможно, и общую деформацию пластины можно выразить через пластическую и упругие части  $\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$ .

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

Смыкание клинообразных трещин не происходит. Для количественной оценки доли пластического деформирования можно ввести понятие эффективной ширины раскрытия трещины, которое можно определить как средний размер ее ширины. Эффективная ширина раскрытия трещины  $b$  зависит от ее длины  $a$  и ширины раскрытия  $\delta$  и может быть определена геометрически:  $b = a \cdot \cos(\varphi/2)$ .

Тогда деформация изменения линейных размеров образца при увеличении объема материала  $\varepsilon = n_T a \cos(\varphi/2)$ , где  $n_T$  - количество трещин, расположенных на таком расстоянии, что они не оказывают влияния друг на друга.

При уменьшении объема микроструктуры до значений  $V_0 = \Delta V_0$  ( $V_0$  - начальный объем материала), равномерно распределенная на берегах трещины деформация усадки вызывает ее раскрытие. Дефор-

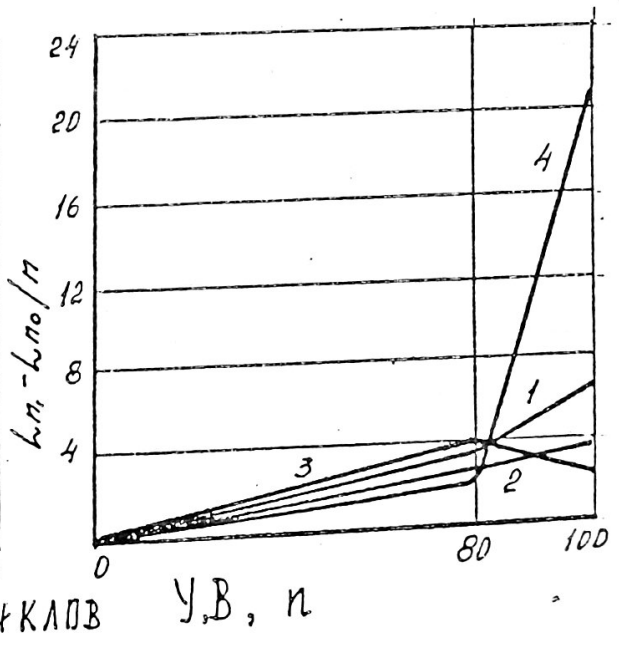
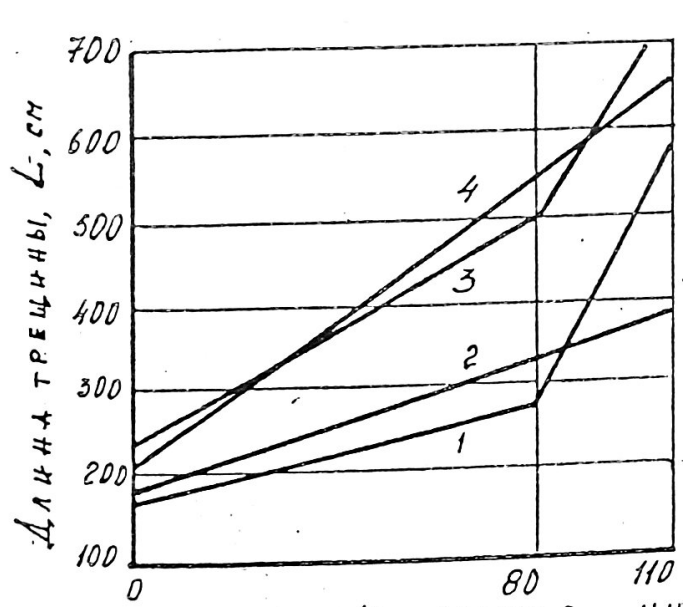
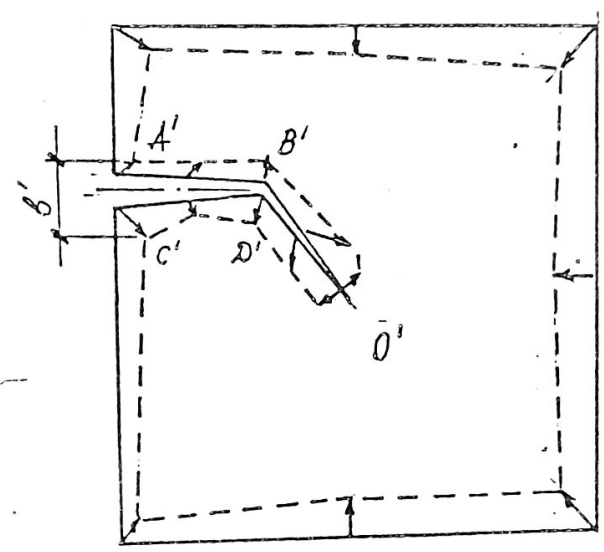
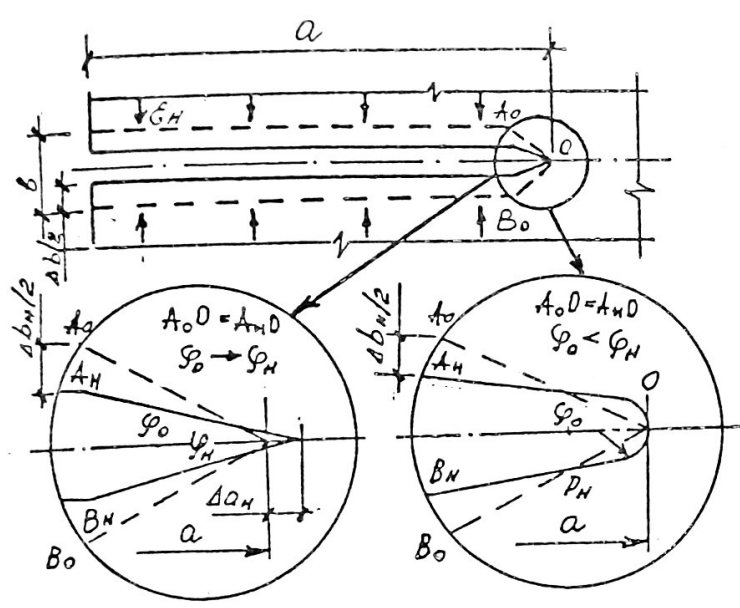
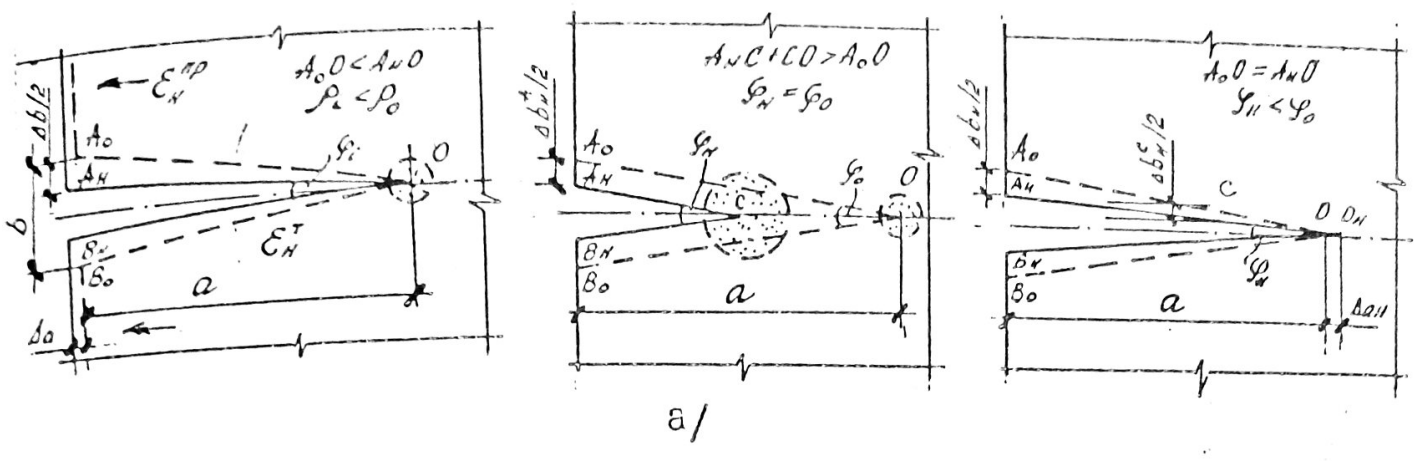


Рис. 1. Механизм усталостного роста технологической трещины  
 а, б) - при изменении объема; в) - при наличии криволинейной трещины; г) - опыты при увлажнении и высушивании

мации берегов при размыкании трещины до ее эффективного начального раскрытия  $\delta$  можно отнести к упругой части усадочных деформаций. При этом наступает период пластического деформирования. В силу принятых допущений трещина не может искривить свои берега, а материал изменить свои средние характеристики. Поэтому в случае  $\Delta V_y > V_T$  происходит увеличение длины трещины на значение  $\Delta a_y$  (рис. 1, а, б). Одновременно увеличивается ширина ее раскрытия  $\Delta \delta_y$ . Абсолютные значения  $\Delta \delta_y$  и  $\Delta a_y$  зависят от начальных  $\delta_0$  и  $a_0$  и деформаций усадки, проявляемых на берегах трещины  $\Delta \epsilon_y$ . Между увеличением ширины раскрытия трещины и приращением ее длины существует зависимость  $\Delta a_y = \Delta \delta_y / 2 \operatorname{tg}(\varphi/2)$ , где  $\varphi$  — зависит от геометрии трещины.

Так как ширина раскрытия определяется значением деформации усадки и в нашем случае равна ей, то  $\Delta a_y = \Delta \epsilon_y / 2 \operatorname{tg}(\varphi/2)$ . Следовательно, общая линейная усадка образца с трещиной при уменьшении объема материала  $\epsilon_y = n \Delta \epsilon_y / 2 \operatorname{tg}(\varphi/2)$ .

Каждый последующий цикл знакопеременных деформаций будет вызывать приращение длины трещины  $\Delta a_y$ , определяющееся ее начальными геометрическими размерами, а также соотношением ширины ее раскрытия и значением усадочных деформаций. Таким образом, изменение длины трещины за один цикл  $da_y/dN = \Delta \delta_y / \Delta \epsilon_y$ .

Если принять равномерность усадочных деформаций от цикла к циклу, то долговечность микроструктуры в условиях малоциклового усталости или количество циклов  $N$  будет зависеть от начальной длины трещины  $a_0$ , ширины ее раскрытия  $\delta_0$ , значений усадочных деформаций  $\epsilon_y$  и отношения площади трещины к сечению образца  $S_T/S_0$  (примем, что фронт трещины представляет собой прямую линию, а сама она проходит по образцу, захватывая его сечение; при  $a_T = 0,25 a$ , будем считать, что образец вышел из строя). Значение  $a_T$  можно определить из условий  $a_T \leq 0,25 a$ ,  $a_T \leq \Delta a_T N$ .

Проведенный анализ показал, что долговечность микроструктуры при принятых допущениях определяется начальной трещиной, а также значением и количеством усадочных деформаций. В этом случае усталостная долговечность образца зависит от скорости роста трещин  $da_n/dN$ . Такую трещину можно представить как магистральную и свести стойкость материала в условиях знакопеременных деформаций к скорости роста магистральной трещины.

Усложним задачу. Представим бетон как непрерывную среду,

разделенную криволинейной трещиной (рис. 1, в). Для анализа поведения поверхностных трещин принята плоская модель. Кроме того, исходили из предположения, что возникающие деформации проявляются как на внешних, так и на внутренних поверхностях раздела (ПР). Трещину можно описать длиной каждого берега, радиусом устья и радиусом поворота трещины, шириной раскрытия трещины.

Примем, что процесс начинается с уменьшения объема материала. В результате получено распределение относительных деформаций внешних и внутренних ПР структурного блока. В силу асимметричности расположения трещины деформации каждой точки перемещаются по собственной траектории. При анализе начальная ширина раскрытия трещины практически не играет роли, так как целью анализа являлось изменение приращения ширины раскрытия.

Разнонаправленные перемещения каждой точки и различная величина перемещений ведут к индивидуальному формоизменению берегов трещины и к общему увеличению ширины ее раскрытия. При этом величина относительных перемещений может изменяться. Так, например, для берега АВ длина уменьшается на 13,3 %, а для берега ВО увеличивается на 10,0 %. Обращает на себя внимание и изменение направления перемещения трещины. Так для берега АВ перемещение точки А составляет угол  $80^{\circ}$ , а перемещение точки В – угол  $25^{\circ}$ .

Изменение относительной величины и направления перемещения каждой точки берегов технологической трещины должно привести к развитию на этих берегах деформаций и напряжений сдвига, величина которых должна определяться реологическими характеристиками материала.

Анализ показал, что наибольшая опасность развития деформаций сдвига должна наблюдаться на берегу ВО, поскольку берег ВО в результате деформаций усадки увеличивает свою протяженность при переходе с ВО в В'О'. При этом возможны, по нашему мнению, два равновероятных случая дальнейшего развития трещины. Первый случай может быть связан с нарушением целостности материала на берегу ВО в зоне максимального формоизменения (точка N). В результате нарушения целостности может образоваться новая трещина с шириной раскрытия, равной  $В'О' - ВО = \Delta B$ .

Второй случай может возникнуть при увеличении длины технологической трещины на величину  $\Delta a$ . Это может быть связано с тем, что разнонаправленные деформации на противоположных берегах ВО и



ДО могут привести к концентрации деформаций и напряжений у устья трещины и ее росту на величину  $\Delta a$ .

Таким образом, деформации усадки приводят к увеличению поврежденности принятой модели бетона. Качественное отличие при сохранении общего одинакового изменения поврежденности заключается в том, что в первом случае происходит накопление объемных повреждений без изменения протяженности технологической трещины. Во втором случае изменение поврежденности связано с ростом начальной трещины. Как в том, так и в другом случае изменение поврежденности связано с начальной поврежденностью материала.

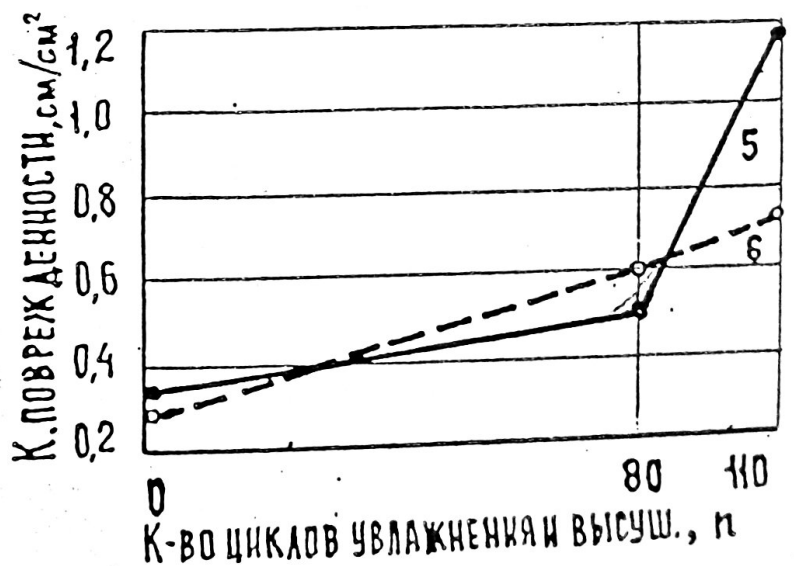
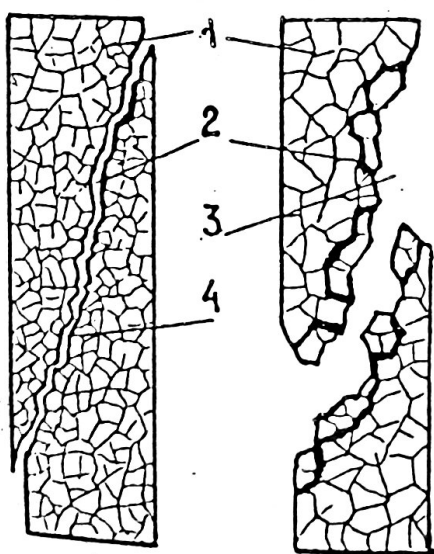
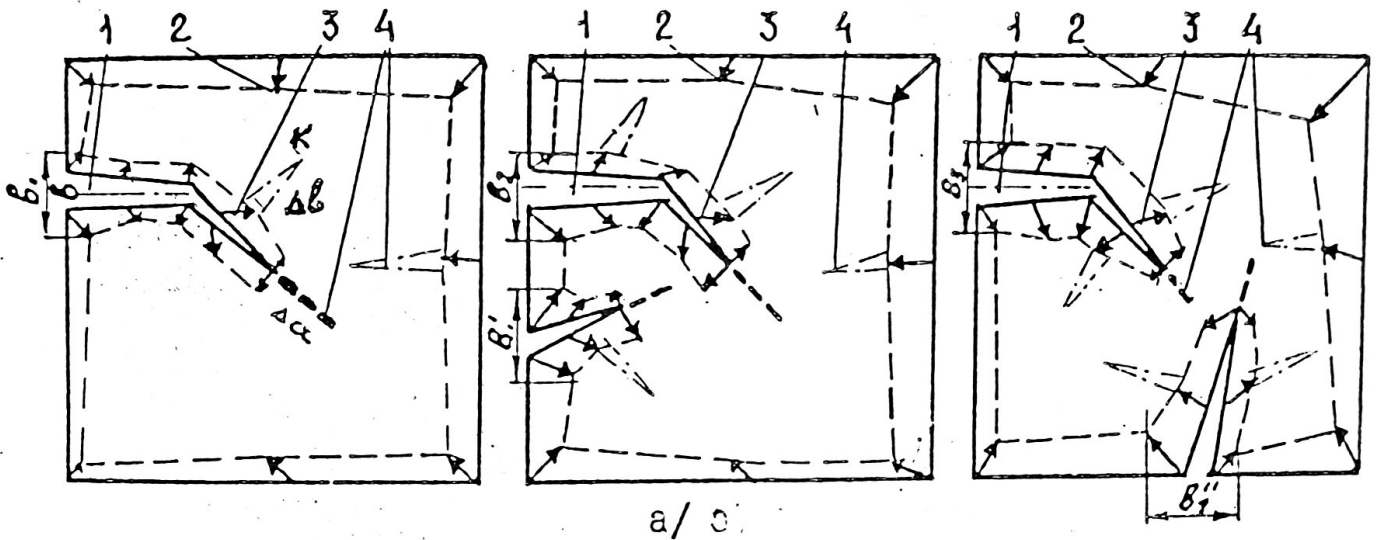
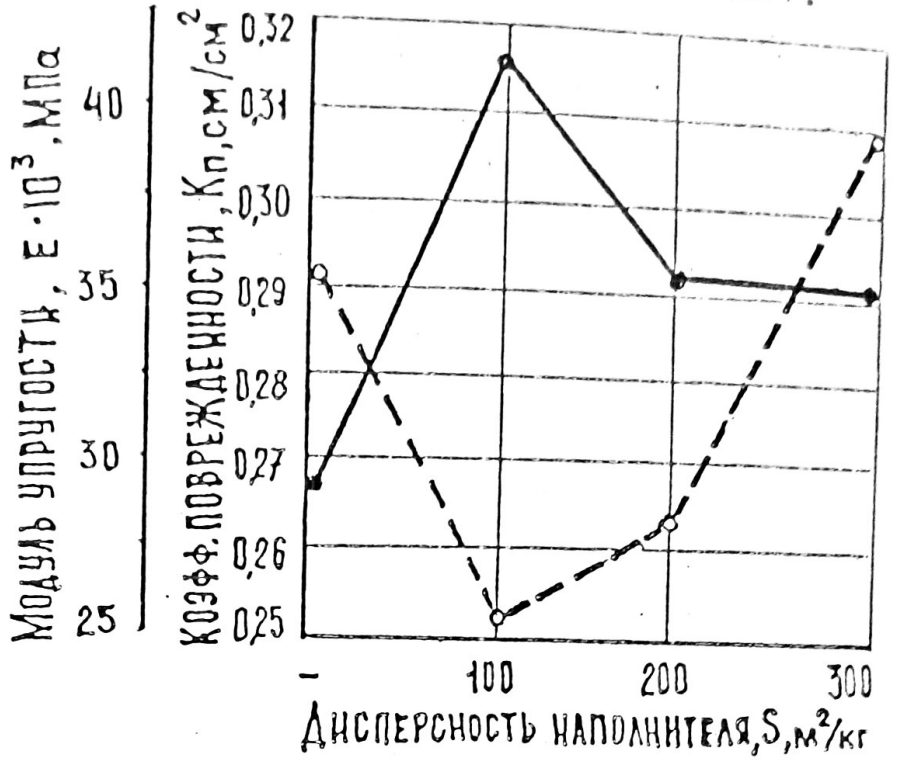
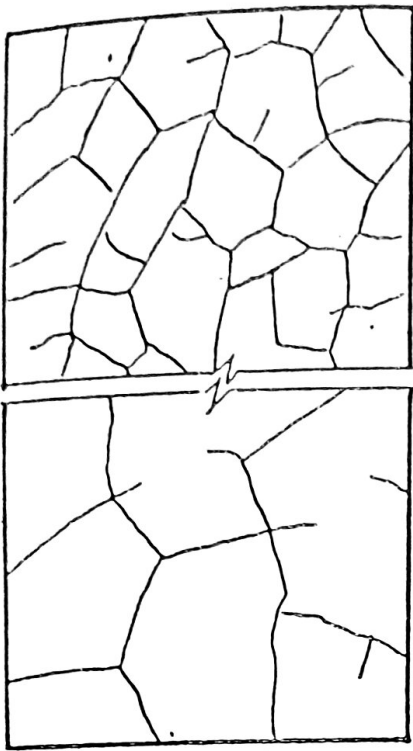
Аналогичный анализ проведен для процесса увеличения объема материала, который показал, что как и при уменьшении объема, так и при увеличении объема поврежденность материала может изменяться путем образования новых трещин или за счет роста существующих.

Изменение начальной поврежденности материала предполагает существование в выделенном структурном блоке не одной, а несколько трещин. Поэтому представляет интерес анализ поведения этих трещин при знакопеременных деформациях структурного блока. В принятой модели (рис. 2,а) введена еще одна трещина, позволяющая увеличить коэффициент поврежденности с  $K_{п} = 0,1$  до  $K_{п} = 0,28$  (рис. 2,б). Увеличение начальной поврежденности ведет к изменению деформаций берегов трещины АВДС. При этом протяженность берега ВО увеличивается, что создает предпосылки образования на ВО новой трещины.

В случае, если сохранится целостность берега ВО, могут раскрыться берега трещины под действием усадочных деформаций, что приведет к ее подрастанию. Таким образом, происходит увеличение поврежденности материалов за счет увеличения длины трещин и АВДС.

Указанные процессы вносят изменения в неоднородное напряженное состояние бетона, вызванное структурообразованием.

Анализ показывает, что в зависимости от места и ориентирования трещин изменяется характер распределения деформаций усадки и набухания на берегах базовой трещины. В случае параллельного расположения трещин усиливается анизотропия деформаций. Создаются реальные предпосылки нарушения целостности материала и увеличение поврежденности модели за счет образования эксплуатационных трещин на берегах технологических.



б/

Рис. 2. Изменение поврежденности при знакопеременных деформациях

## ЛИТЕРАТУРА

1. Выровой В.Н. Усталостная прочность композиционных строительных материалов в условиях увлажнения и высушивания//Работоспособность строительных материалов в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов: Сб. научн. тр./КХТИ. - Казань, 1984. - С. 59-61.
2. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Сайед Бассем. Влияние технологической поврежденности на характер разрушения балок сельхоззданий//Использование вторичных ресурсов и местных материалов в сельском строительстве: Материалы всесоюзной научно-технической конференции. - Челябинск, 1991. - С. 15-16.
3. Дорофеев В.С. Влияние технологической поврежденности бетона на диаграмму деформирования и условия прочности при одном и двухосном напряженном состоянии//Тезисы докладов республиканского научно-технического семинара "Физико-химические и технологические особенности получения малоцементных строительных материалов и конструкций", К., 1992. - С. 14.
4. Дорофеев В.С., Выровой В.Н., Шеховцов И.В., Макарова С.С. Влияние технологической поврежденности на характер разрушения железобетонных плит: Материалы XXIII Международной конференции в области бетона и железобетона, М., Стройиздат, 1991. - С.56-57.
5. Дорофеев В.С., Кара Дамур. Учет технологической поврежденности бетона при малоцикловых воздействиях//Повышение долговечности и эффективности работы конструкций сельскохозяйственных зданий и сооружений: Материалы международной научно-технической конференции. - Челябинск, 1992. - С. 72-73.
6. Соломатов В.И., Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Сиренко А.В. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости. - К.: Будивзльнык, 1991. - 144 с.