

УДК 539.375

Магдеев У.Х. – доктор технических наук, профессор

E-mail: usman.magdeev@mail.ru

ЗАО Научно-исследовательский проектно-технологический институт «Стройиндустрия»

Адрес организации: 105058, г. Москва, ул. Ткацкая, 46

Морозов В.И. – доктор технических наук, профессор

E-mail: morozov@spbgasu.ru

Пухаренко Ю.В. – доктор технических наук, профессор

E-mail: tsik@spbgasu.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4

Трещинообразование дисперсно-армированных бетонов с позиций механики разрушения

Аннотация

В статье представлены результаты исследования процесса деформации армированного бетона на стадии формирования микротрещин и эффекта применения армоцемента с позиции трещинообразования при изменении интенсивности напряжений. Применяя методы теории трещинообразования и механики разрушения, была построена адекватная модель процесса образования микротрещин в дисперсно-армированном бетоне (фибробетон, армоцемент, тяжелый армоцемент).

Ключевые слова: дисперсно-армированные бетоны, трещинообразование, микротрещины, цементный камень.

Дисперсно-армированные бетоны: фибробетон, армоцемент, тяжелый армоцемент (ТАЦ) [1], – как известно, обладают по сравнению с традиционно армированными бетонами повышенной трещиностойкостью на протяжении всего жизненного цикла: от зарождения микротрещин и их развития до стадии, предшествующей разрушению самой конструкции.

Появлению магистральных трещин предшествуют, как известно, процессы микротрещинообразования, которые наблюдаются в областях так называемого предразрушения. Описание процессов деформирования и трещинообразования бетона на этой стадии стало возможным благодаря использованию методов механики разрушения и теории трещин. Можно с удовлетворением отметить, что благодаря исследованиям Ю.В. Зайцева, П.И. Васильева, В.Г. Орехова, А.П. Пака, Е.Н. Пересыпкина, Л.П. Трапезникова и других ученых, выполненным еще в 70-80-е годы 20 века, приоритет отечественной науки в области механики разрушения бетона сегодня общепризнан. В нашей стране прошла первая в мире крупная конференция по механике разрушения бетона (г. Севастополь, 1984 г.).

Перспективы, которые открывает применения методов механики разрушения в исследовании бетонов, в настоящее время хорошо известны. Применительно же к армированным средам обнаруживаются существенные резервы в части использования методов механики разрушения и теории трещин для построения адекватных расчетных моделей, описывающих процессы деформирования и трещинообразования в железобетоне [2].

Реализация методов механики разрушения начинается с выбора критерия. Вероятно, в таком сложном по строению материале, как бетон, эффективнее не одно-, а двух- или многопараметрические критерии, когда, используя одно или несколько критериальных уравнений, удастся описать весь спектр наблюдаемых механизмов разрушения. Данный подход разработан Л.П. Трапезниковым [3] применительно к бетону.

В железобетоне задача усложняется. Под влиянием арматуры процесс трещинообразования может существенно меняться. Здесь, применительно к теоретическим методам исследования трещин, можно сказать, ломаются известные каноны: трещина может раскрываться, сохраняя при этом свою длину. В связи с этим деформации в вершине ее становятся большими. На рис. 1 с большой долей условности показана схема

возможного раскрытия трещины без ее роста [4]. Значительное превышение угла α над β свидетельствует о наличии конечного поворота, что затрудняет использование методов, основанных на допущениях о малых деформациях. В связи с этим обусловлено использование коэффициентов интенсивности напряжений (КИН), которые служат мерой сингулярности напряжений около вершины трещины, то есть области предразрушения. Вопрос выбора деформационного или силового критерия в данном случае не так актуален, поскольку критический коэффициент интенсивности (ККИН) эквивалентен критерию предельной деформации бетона в вершине трещины, то есть критерию трещиностойкости.

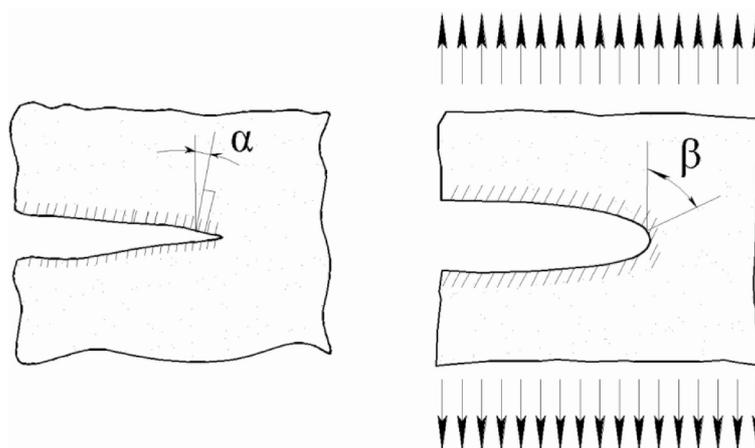


Рис. 1. Схема раскрытия трещины без изменения ее длины

Для любых задач теории упругости поля напряжений и смещений вблизи вершины трещины имеют почти одинаковую структуру. Действительно, выражения для перемещения в условиях нормального отрыва и напряжений схожи:

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{k_I}{G} \cdot \sqrt{\frac{r}{2 \cdot \pi}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 - 2 \cdot \mu + \sin \frac{\theta}{2} \right) \\ \sigma_x &= \frac{k_I}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3}{2} \theta \right) \end{aligned} \quad (*)$$

Первыми это поняли Ирвин и Вильямс [4].

Одними из первых вопрос о торможении трещин в данном контексте поставили Рамуальди и Батсон при исследовании фибробетона [5]. В основе теоретического объяснения принципа действия механизма торможения трещин арматурой лежит «концепция промежутков», построенная с помощью модифицированной Ирвиным теории Гриффитса. В процессе решения, однако, авторы столкнулись с известной сложностью при определении усилия, оказывающего давление на берега трещины и возникающего в результате совместной работы бетона и арматуры на их контакта. Вместе с тем сама идея о принципе торможения привлекла внимание специалистов в области механики разрушения.

Так, В.З. Партоном и Е.М. Морозовым [6] заложен данный механизм в оценку кинетики трещин при наличии специальных ребер жесткости, прикрепленных заклепками к бесконечной упругой пластине с начальной трещиной. Однако усилия, создающие ребрами через заклепки благоприятное поле напряжений, сдерживающее развитие трещины, считаются заданными, хотя очевидно, что они будут зависеть, помимо прочего, от действующих нагрузок и, строго говоря, сами являются искомыми. Несмотря на это, авторы убедительно демонстрируют качественное изменение характера трещинообразования в зависимости от расположения ребер жесткости по отношению к трещине.

Исследованиями Е.Н. Пересыпкина [7] заложены определенные принципы, позволяющие качественно по-иному подойти к проблеме развития трещин и деформирования изгибаемых и внецентренно нагруженных элементов.

В [8] с использованием [5] и [7] рассмотрен процесс развития трещин в армоцементе. Наряду с общепринятыми в [8] используются два дополнительных допущения, существенно упрощающие решение задачи. Во-первых, считается, что длина начальной трещины равна размеру ячейки арматурной сетки, во-вторых, усилие, создающее благоприятное «обжатие» трещины, известно и равно по величине усилию в арматуре. Тем самым исчезает необходимость, в отличие от [5], поиска фактического усилия, сдерживающего развитие трещины.

Аналогичный подход применительно к изгибаемому железобетонному элементу с одиночной начальной трещиной использован в [9], однако автора интересовал в большей мере собственно критический коэффициент интенсивности напряжения железобетонного элемента, который определялся без детализации характера сцепления, в связи с чем оценить влияние дисперсности армирования на развитие трещины при таком подходе затруднительно.

Качественную оценку влияния армирования на трещинообразование в данной работе выполним с помощью теории трещин [10]. На рис. 2 показана расчетная схема армированного элемента с микротрещиной. Усилия приложены к бетону на бесконечности. Сцепление его с арматурой абсолютное.

Решение, полученное с помощью рядов Л. Лорана [10], приведено на рис. 3. Здесь в первом случае (рис. 3 а) изгибная жесткость арматуры равна нулю, а во втором (рис. 3 б) – соответствует конечному значению соответствующего профиля.

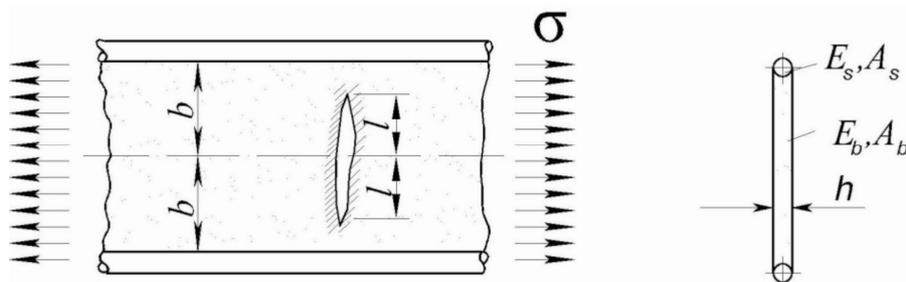


Рис. 2. Растяжение пластины с микротрещиной

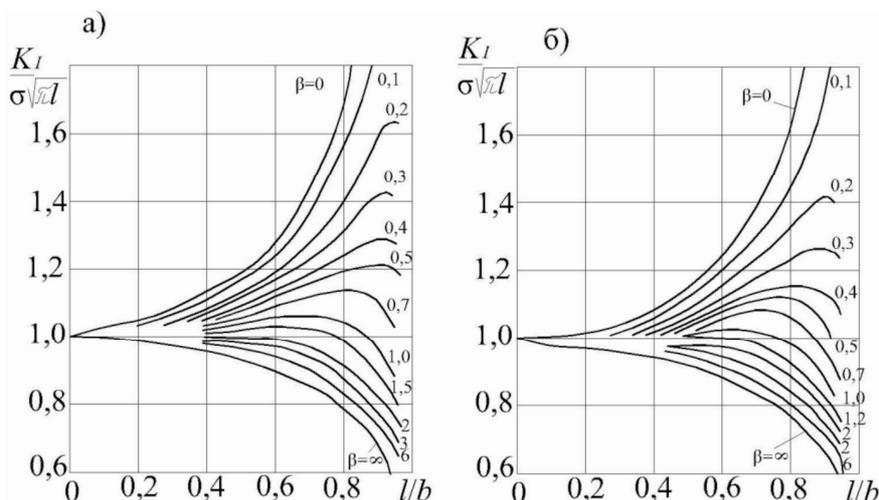


Рис. 3. Зависимость КИН от отношения длины микротрещины и расстояния между стержнями.
 $\beta = E_s A_s / E_b A_b$

Аналогично решена задача для случая растяжения периодически армированной пластины с усилиями, приложенными к обоим материалам (рис. 4). Случай, характерный для ТАЦ, показан пунктиром.

Таким образом, с увеличением жесткости арматуры и с уменьшением ее шага (т.е. увеличением дисперсности армирования) КИН уменьшается, причем в случае с ТАЦ это весьма ощутимо. Следовательно, усилие трещинообразования, согласно критерию

Ирвина, будет возрастать. Приведенные результаты, как видно из рисунков, аналогичны, но вместе с тем могут рассматриваться применительно к ТАЦ и фибробетону лишь в качественном аспекте, так как не учитывают особенности сцепления бетона и арматуры.

Рассмотрим схему, приведенную на рис. 5. При решении задачи об определении напряжений, при которых микротрещина начнет продвигаться, упростим по сравнению с [5], с одной стороны, методику определения «благоприятного» воздействия арматуры на трещину, с другой стороны, откажемся от двух отмеченных выше предпосылок, принятых в [8], с целью уточнения расчетной модели. Считаем, что пластина (железобетон, фибробетон, армоцемент или другой армированный материал), имеющая начальную микротрещину, растягивается на бесконечности равномерной нагрузкой.

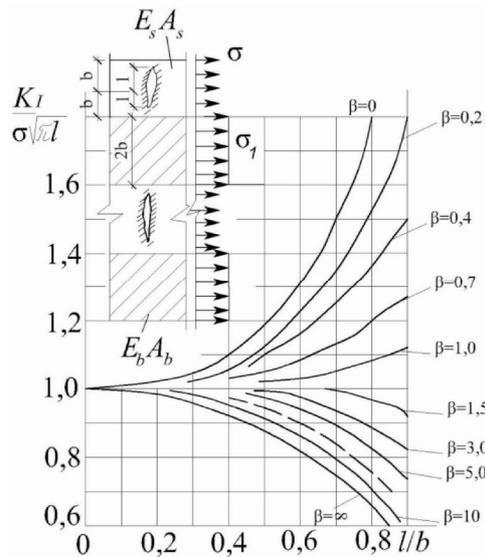


Рис. 4. Растяжение периодически армированной пластины с системой трещин

Очевидно, что в сечении с трещиной усилие в арматуре наибольшее; по мере удаления от него плавно уменьшается за счет сцепления. Последнее будем считать решающим фактором, положительно влияющим на сдерживание роста трещины*.

Для нахождения величины усилия сцепления примем характер изменения напряжений в арматуре на участке l_{an} виде:

$$\sigma_s = \sigma_s^{crc} + \frac{\sigma_s^0 - \sigma_s^{crc}}{2} \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi}{l_{an}} \cdot y \right) \quad (1)$$

Заметим, что выбор такой формы удобен чисто в математическом отношении, а, кроме того, не противоречит здравому смыслу и удовлетворяет условиям на границах $y = 0$; $y = \pm l_{an}$. Вопрос же количественного выбора l_{an} оставим пока открытым, хотя в качестве такого параметра может выступать, по-видимому, и зона активного сцепления.

Из условия равновесия элементарного отрезка арматуры найдем напряжения сцепления:

$$\tau_{fr} = \frac{\delta}{4} \cdot \frac{d\sigma_s}{dy}, \quad (2)$$

где δ – диаметр арматуры.

* Очевидно, что при отсутствии сцепления имеем классическую задачу о растяжении однородной пластины с трещиной и, наоборот, при бесконечно прочном сцеплении имеем схему, аналогичную рис. 7.40 в [10].

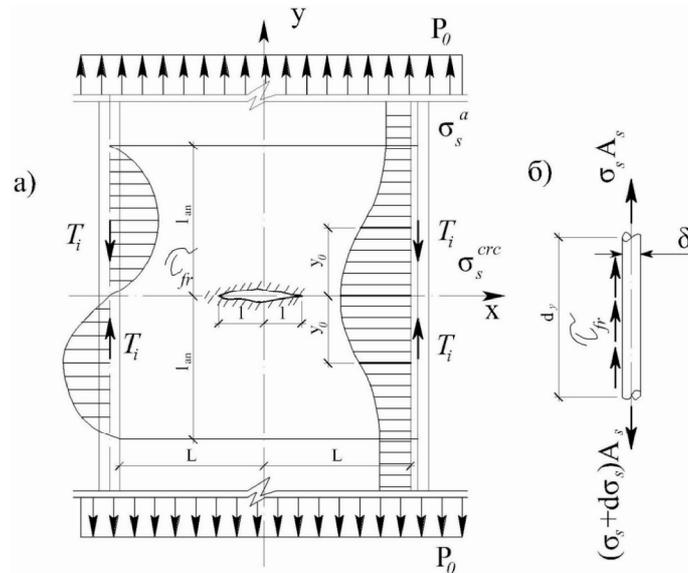


Рис. 5. Расчетная схема элемента дисперсно-армированного бетона с микротрещиной

Учитывая (1), получим:

$$\tau_{fr} = \frac{\pi \cdot \sigma}{8l_{an}} \cdot (\sigma_s^0 - \sigma_s^{crc}) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{l_{an}} \cdot y\right) \quad (3)$$

Для нахождения погонного суммарного усилия сцепления проинтегрируем (3) в границах зоны l_{an} :

$$T_i^0 = \pi \cdot \delta \cdot \int_0^{l_{an}} \tau_{fr} \cdot dy = \frac{\pi \cdot \delta^2}{4} \cdot (\sigma_s - \sigma_s^{crc})$$

Фактическая величина сцепления, оказывающая влияние на данную микротрещину, на каждом из четырех участков арматуры (учитывая соседние ячейки) будет:

$$T_i = \frac{T_i^0}{2} = \frac{\pi \cdot \delta^2}{8} \cdot (\sigma_s - \sigma_s^{crc}) \quad (4)$$

Для определения влияния сцепления на характер напряженного состояния в сечении $y = 0$ воспользуемся фундаментальным решением Буссинеска для полуплоскости под действием касательного усилия [11]. Суммируя известные решения, получаем распределение нормальных напряжений в сечении $y = 0$ в виде:

$$\sigma_y(x) = -\frac{4 \cdot T_i}{\pi} \cdot y_0^3 \cdot \left\{ \frac{1}{[(L-x)^2 + y_0^2]^2} + \frac{1}{[(L+x)^2 + y_0^2]^2} \right\} \quad (5)$$

Дальнейшие операции сводятся к определению КИН под заданным воздействием. Для случая изолированной трещины имеем [7]:

$$k_l = 2 \sqrt{\frac{l}{\pi}} \cdot \int_0^l \frac{\sigma_y(x) \cdot dx}{\sqrt{l^2 - x^2}} \quad (6)$$

Если (5) подставить в (6), проинтегрировать его, воспользовавшись критерием Ирвина [7, 10], то получим:

$$\frac{P_0}{k_{IC}} = \left\{ 1 - \frac{2 \cdot l \cdot \Delta}{\pi} \cdot y_0^3 \cdot \left\{ \frac{1}{\left[\left(L - \frac{l}{2} \right)^2 + y_0^2 \right]^2} + \frac{1}{\left[\left(L + \frac{l}{2} \right)^2 + y_0^2 \right]^2} \right\} \right\} \cdot \frac{4\sqrt{l}}{\sqrt{3} \cdot \pi}, \quad (7)$$

где k_{IC} – критический КИН, значение которого, вообще говоря, задано.

Заметим, что разность напряжений в арматуре может быть определена, исходя из элементарных представлений о выключении из работы бетона в сечении: $y = 0$ на участке, занятом трещиной, т.е. с использованием метода сечений:

$$\sigma_s - \sigma_s^{crc} = P_0 \cdot \frac{8 \cdot l_{an} \cdot \Delta}{\pi \cdot \delta^2},$$

где Δ – толщина пластины.

Таким образом, полученное в замкнутом виде выражение (7) позволяет определить напряжения на бесконечности, при которых начальная трещина начнет расти.

На рис. 6 приведены в безразмерных параметрах графики для ТАЦ (1-4) и обычного армоцемента (5).

Наличие восходящего участка кривых при сближении арматуры друг с другом свидетельствует о возрастании сопротивляемости материала растяжению и «торможению» микротрещин. Микротрещина в этом случае развивается устойчиво, поскольку для ее поддержания в подвижно равновесном состоянии напряжение должно возрасти.

Очевидно, оценка устойчивости развития микротрещин здесь возможна по критерию $\partial k_I / \partial l < 0$.

В противном случае, микротрещина может пересечь арматуру и превратиться в магистральную.

Таким образом, при достаточно частом армировании (то есть высокой дисперсности) действие арматуры сказывается в появлении качественного эффекта стабилизации микротрещин.

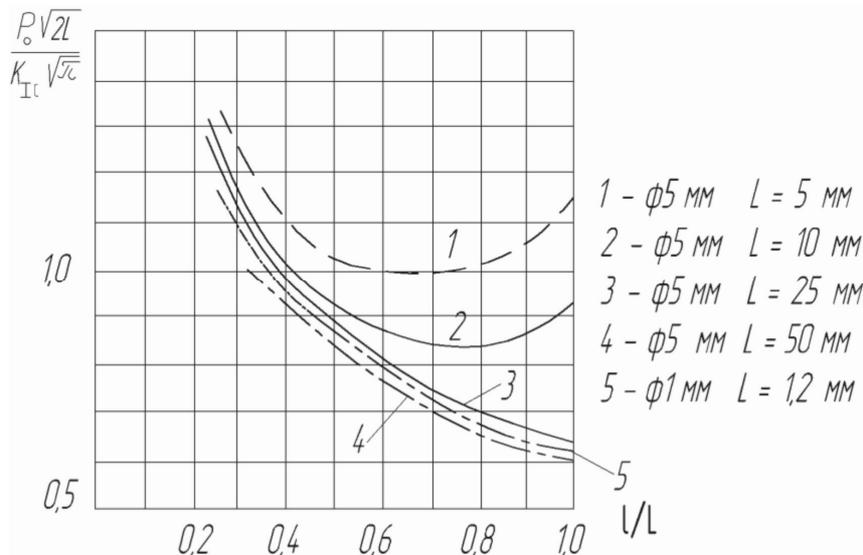


Рис. 6. Зависимость критического напряжения от соотношения l/L .

Полученный результат отражает и согласие с опытными данными. Так, при испытании тяжелого армоцемента замечено [1], что при изменении расстояния между стержнями с 1,63 см (коэффициент армирования 12 %, диаметр арматуры 5 мм) до 0,99 см (соответственно 12 % и 3 мм) растяжимость увеличилась с 19×10^{-5} до 36×10^{-5} отн.ед. Заметим, что приведенные результаты согласуются с данными, опубликованными в дискуссионных статьях (в февральском номере Journal of the Engineering Mechanic Division, 1964 г.) Б. Бромса, С. Ша и А. Абея, где, в частности, говорится (с. 167) о заметном влиянии арматуры на растяжимость при расстоянии между стержнями менее 0,6 дюйма. В этом отношении есть хорошее согласие и с опытами, результаты которых обсуждаются в [5]. На рис. 7 приведены опытные данные, полученные на балках с распределенной арматурой в растянутой зоне, и теоретическая кривая.

Построенная таким образом модель в целом адекватна процессам, наблюдаемым в опытах, а также в определенном смысле отличается «демократичностью», способностью к совершенствованию по мере накопления сопутствующих данных, в частности, назначение исходного размера начального дефекта, фактического значения K_{IC} , параметров сцепления, в том числе уточнения усилия T_i и y_0 .

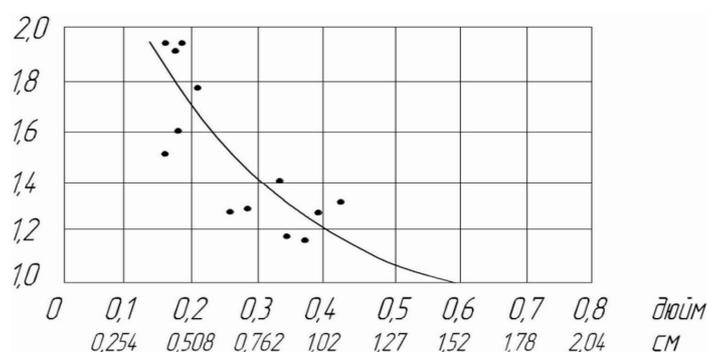


Рис. 7. Зависимость критических относительных напряжений от расстояния между стержнями

Выбор начальной длины микротрещины следует оговорить. Согласно исследованиям Л.П. Трапезникова [3], если размер трещины меньше максимальной крупности заполнителя, то чувствительность к разрушению снижается вплоть до того, что прочность такого образца может быть не меньше прочности образца без разреза. В данном материале, где используется песчаный бетон, максимальная крупность зерна заполнителя колеблется в пределах 2,5÷5 мм. Естественно допустить, что такая песчинка может оказаться в материале без сцепления с цементным камнем в силу, например, недостаточной чистоты ее поверхности. В этом случае она станет выполнять роль указанного дефекта и, таким образом, может быть заложена в практические расчеты.

Список литературы

1. Морозов В.И. Корпуса высокого давления из тяжелого армоцемента для энергетических и строительных технологий: Дис. ... д-р. техн. наук. – Л.: ЛИСИ, 1994. – 533 с.
2. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 413 с.
3. Трапезников Л.П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
4. Сведлоу Дж. Вычислительные методы в механике разрушения. – М.: Мир, 1990. – 331 с.
5. Romualdi J.P., Batson G.V. Mechanics of Crack Arrest in Concrete // Eng. Mechanics Div. Proceeding of the American Society of Civil Eng. J., 1963. – P. 147-168.
6. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упруго-пластического разрушения. – М.: Наука, 1974. – 416 с.
7. Пересыпкин Е.Н. Напряженно-деформированное состояние стержневых железобетонных элементов с трещинами: Дис. ... д-р. техн. наук. – Л.: ЛИСИ, 1984. – 339 с.
8. Турукалов Б.Ф. Влияние трещин на напряженно-деформированное состояние армоцемента и железобетонных элементов: Дис. ... канд. техн. наук. – Л.: ЛИСИ, 1986. – 222 с.

9. Пирадов К.А. Критический коэффициент интенсивности напряжений железобетона // Бетон и железобетон, 1992, № 12. – С. 20-22.
10. Механика разрушения и прочность материалов. Т.2. / Под ред. В.В. Панасюка. – Киев: Наукова думка, 1988. – 620 с.
11. Демидов С.П. Теория упругости. – М.: Высшая школа, 1979. – 432 с.

Magdeev U.K. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: usman.magdeev@mail.ru

UAB Research Design and Technological Institute «Building Industry»

The organization address: 105058, Moskow, Tkatskaia st., 46

Morozov V.I. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: morozov@spbgasu.ru

Puharenko Iu.V. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: tsik@spbgasu.ru

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

The organization address: 190005, S.-Peterburg, 2-ia Krasnoarmeiskaia st., 4

Cracking of dispersion-reinforced concrete in terms of fracture mechanics

Resume

The task of assessing the nature of cracking and deformation of dispersion-reinforced concrete, receiving the tensile, bending and compressive forces, is one of the most urgent. Its solution can be achieved with the use of the provisions contained in the well-known theory of cracks and fracture mechanics methods. But first you must determine the criteria. It is clear that in such a complex material like concrete not one but two-and multi-parameter criteria are more effective.

Along with the standard terms of fracture mechanics to reinforced concrete-dispersion it is necessary to make two assumptions. First, we assume that the initial crack length is equal to the size of the cell reinforcing weave and, secondly, the force that creates a «compression» crack is known and equal to the force in the dispersed reinforcement. Taking into account these assumptions, the solution of equations for the calculation scheme reinforced the element of micro-crack is performed using the Laurent series. This allows us to establish that an increase in stiffness of reinforcement and the decrease of the step (i.e., increase dispersion of the reinforcement), the stress intensity factor decreases and the effort to crack, according to Irwin's criterion, will increase.

Keywords: dispersion-reinforced concrete, cracks forming process, micro cracks, cement stone.

References

1. Morozov V.I. For the pressure of wire mesh reinforced concrete for energy and building technology, Dr. Sci. ... Dr. of tech. sciences. – L.: LISI, 1994. – 533 p.
2. Karpenko N.I. General models of the mechanics of reinforced concrete. – M: Stroiizdat, 1996. – 413 p.
3. Trapeznikov L.P. Temperature fracture toughness of massive concrete structures. – M.: Energoatomizdat, 1986. – 272 p.
4. Svedlou J. Numerical methods in fracture mechanics. – M.: World, 1990. – 331 p.
5. Romualdi J.P., Batson G.B. Mechanics of Crack Arrest in Concrete // Eng. Mechanics Div. Proceeding of the American Society of Civil Eng. J., 1963. – P. 147-168.
6. Parton V.Z., Morozov E.M. The mechanics of elastic-plastic fracture. – M.: Nauka, 1974. – 416 p.
7. Peresypkin E.N. The stress-strain state of the core elements of reinforced concrete with cracks: Dis. ... Dr. of tech. sciences. – L.: LISI, 1984. – 339 p.
8. Turukalov B.F. The influence of cracks on the stress-strain state of reinforced concrete elements and armosements: Dis. ... Candidate. of tech. sciences. – L.: LISI, 1986. – 222 p.
9. Piradov K.A. The critical stress intensity factor is reinforced // Concrete and reinforced concrete, 1992, № 12. – P. 20-22.
10. Fracture mechanics and strength of materials. Volume 2-nd. – K.: Naukova Dumka, 1988. – 620 p.
11. Demidov S.P. The theory of elasticity. – M.: Higher School, 1979. – 432 p.