

УДК 624.012.45

**Клюева Н.В.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: klynavit@yandex.ru

**Юго-Западный государственный университет**

Адрес организации: 305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет октября, д. 94, г-323

**Колчунов В.И.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: vikolchunov@mail.ru

**Яковенко И.А.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: i2103@ukr.net

**Национальный авиационный университет**

Адрес организации: 03058, Украина, г. Киев, пр. Космонавта Комарова, д. 1

### Проблемные задачи развития гипотез механики разрушения применительно к расчету железобетонных конструкций<sup>1</sup>

#### Аннотация

Сформулированы проблемные задачи развития гипотез механики разрушения применительно к расчету железобетонных конструкций: проблема получения новых констант бетона; проблема нахождения двухконсольного элемента, включающего трещину для построения эффективного расчетного аппарата железобетона с учетом физической нелинейности, процессов трещинообразования, сцепления арматуры с бетоном и эффекта нарушения сплошности.

**Ключевые слова:** механика разрушения, железобетонные конструкции, новые константы бетона, двухконсольный элемент, гипотезы, расчетный аппарат, трещинообразование, сцепление, эффект нарушения сплошности.

Железобетонные конструкции, как правило, эксплуатируются в стадии, наступающей после образования трещин (ограничивается лишь ширина их раскрытия). Проблема изучения напряженно-деформированного состояния в окрестности трещины исследуется механикой разрушения, активно развивающейся в последние годы.

**Проблема получения новых констант бетона.** Специфика материала проявляется не только в основной зависимости механики разрушения, связывающей коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  с величиной высвобождающейся энергии на единицу вновь созданной поверхности трещины  $\zeta_I$ , но и в таких понятиях как зона предразрушения в устье трещины, критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{br}$  и соответствующая ему величина  $\zeta_{br}$ , предельные величины  $\zeta_{bu}$  и  $\zeta_{br}$ , соответствующие страгиванию трещины и т.п. Многое зависит и от удачного нахождения двухконсольного элемента в железобетоне, включающего трещину.

Мера взаимодействия сил в зоне предразрушения является величиной постоянной для данного материала при его упругой работе [1]. Учет упругопластического сопротивления требует введения дополнительных констант. Проблема определения этих констант для такого материала как бетон до настоящего времени остается одной из самых актуальных.

Анализ зоны предразрушения показывает, что традиционные диаграммы  $\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$  реализуются здесь при ограниченных значениях деформаций, т.е. с учетом ниспадающей ветви – опыты Хиллирборга-Модера-Петерсона, Бажанта, Чубрикова и др. В качестве аналога зависимости  $\sigma_i - \varepsilon_i$  в механике разрушений может быть использована зависимость  $K_g^2$ . Тогда новые константы бетона выражаются как некоторые точки этих диаграмм. Кроме того необходимо установление связи между зависимостями механики разрушения и традиционными характеристиками бетона  $R_b$ ,  $E_b$ . Следует отметить, что радиус надреза и радиус трещины различаются на несколько порядков. Поэтому возникает проблема перехода соответствующих параметров искусственных трещин к естественным. В расчетном аппарате желательно использовать естественные трещины.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МД-6533-2013.8

**Проблема нахождения двухконсольного элемента, включающего трещину для построения расчетного аппарата железобетона.** В дальнейшем, связывая эти константы с податливостью двухконсольного элемента (ДКЭ), выделенного в окрестности трещины, отыскивается возмущение напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции.

Для несплошного тела с трещиной методы, разработанные в механике твердого деформированного тела неприменимы. Использование метода сечений применительно к материалу с трещинами и приближенного приема определения коэффициента интенсивности напряжений [2] можно использовать и для железобетона.

Тем не менее, здесь имеет место своя специфика. Во-первых, двухконсольный элемент выделяется на всю высоту трещины, а не для какого-то ее элементарного участка. Во-вторых, усилия в сечениях, проходящих на расстоянии  $t_*$  от трещины, необходимо связать с искомыми параметрами напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции. При этом необходимо учесть возмущение напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции из-за нарушения сплошности бетона (эффект нарушения сплошности, см. работу [3]). В-третьих, не следует забывать о виртуальных перемещениях выделенных консолей при повороте нейтральной оси железобетонного элемента, т. е. защемление консолей не абсолютно жесткое.

Поставленная проблема должна быть увязана не только с определением напряженно-деформированного состояния поперечного сечения железобетонного элемента, но и с распределением сцепления между арматурой и бетоном, так как появление трещины в сплошном теле можно рассматривать как некоторое деформационное воздействие, отражающееся на особенностях сцепления арматуры и бетона в зонах, прилегающих к трещине.

С помощью двухконсольного элемента представляется наиболее удачной связью его напряженно-деформированного состояния с величиной  $\zeta_{bu}$  в зоне предразрушения. При этом податливость берегов трещины, через которую может быть выражена величина  $\zeta_{bu}$ , определяется методами строительной механики. В итоге, двухконсольный элемент может использоваться в качестве связующего звена между зависимостями механики твердого деформируемого тела и механики разрушения.

Податливость ДКЭ связана с перемещениями всего железобетонного стержня. Таким образом прослеживается взаимосвязь первого и второго предельных состояний. Ввиду наличия четкого физического смысла и обозримости зависимостей механики разрушения, они могут быть включены непосредственно в разрабатываемые модели сопротивления, тем более, что используемые ДКЭ (рис. 1) могут быть распространены на любые случаи напряженно-деформированного состояния.

Функцию податливости находим из определения скорости высвобождения энергии:

$$\varphi_{bu} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \left( \frac{\delta W - \delta V}{\delta A} \right) = \frac{dW}{dA} - \frac{dV}{dA} \quad (1)$$

где  $\delta V$  – уменьшение потенциальной энергии тела при продвижении трещины на малое приращение  $\delta A$ ;  $\delta W$  – дополнительная работа, совершаемая над телом при продвижении трещины на малое приращение  $\delta A$ ;  $A$  – площадь образовавшейся поверхности трещины.

Изложенные выше соображения использованы при выделении двухконсольного элемента, приведенного на рис. Здесь параметр  $t_b$  (характеризующий размер зоны сжатого бетона в окрестности, прилегающей к трещине) в соответствии с принципом Сен-Венана и с исследованиями околоарматурной зоны, выполненными с привлечением полуаналитических [4, 5] и численных методов, в первом приближении полагается равным полутора диаметрам арматуры. В дальнейшем значение  $t_b$  уточняется из решения задачи сцепления. Растягивающие напряжения в выделяющих сечениях распределены по закону квадратной параболы от нейтральной оси до точки, где меняется знак этих напряжений. При этом максимальная их величина ограничивается значением  $R_{bt}$ , поэтому на значительном участке фактическое распределение растягивающих напряжений близко к прямоугольнику, независимо от закона их распределения в упругой стадии. Сжимающие напряжения в этих же сечениях на участках, прилегающих к арматуре, распределены по треугольнику.

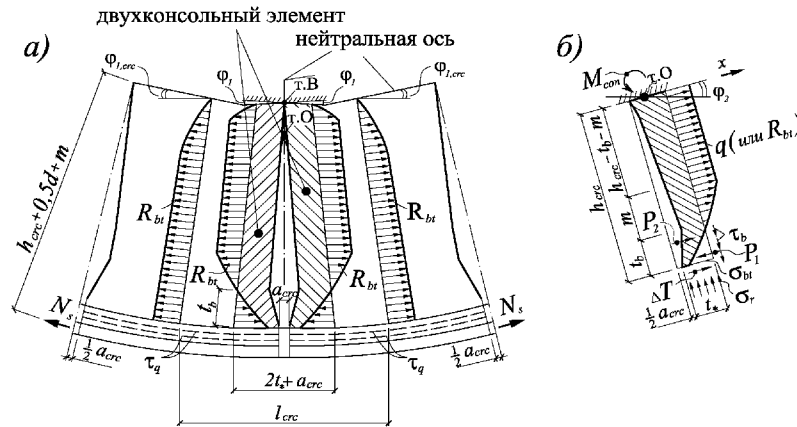


Рис. К реализации зависимостей механики разрушения в железобетоне:  
 а – характерные эпюры напряжений в растянутом бетоне  
 и вырезание специального двухконсольного элемента в окрестности трещины;  
 б – к расчету податливости консоли

Анализ зависимостей «силовое воздействие-перемещение» для воздействий на выделенный двухконсольный элемент показывает, что такие зависимости нелинейны и могут иметь даже ниспадающую ветвь деформирования. Площадь таких диаграмм, через которую выражается значение потенциальной энергии, отличается от  $0,5P_0e_0$ . Здесь  $P_0$  – обобщенное усилие, а  $e_0$  – обобщенное перемещение. Интегралы, характеризующие площади этих диаграмм, дают довольно близкие значения к величине  $(2/3)P_0e_0$ , поэтому выражение для потенциальной энергии, накопленной в теле, может быть представлено в виде:

$$V = \frac{2}{3} P_0 e_0. \tag{2}$$

Податливость  $C$  элемента определяется соотношением:

$$e_0 = CP_0. \tag{3}$$

Тогда:

$$\frac{dV}{dA} = \frac{4}{3} CP \frac{\partial P}{\partial A} + \frac{2}{3} P^2 \frac{\partial C}{\partial A} \tag{4}$$

Аналогично можно преобразовать слагаемое  $dW/dA$ , входящее в формулу (1). Тогда, подставляя выражение (4) в уравнение (1), получим:

$$\zeta_{bu} = \frac{1}{3} \left( P^2 \frac{\partial C}{\partial A} - CP \frac{\partial P}{\partial A} \right). \tag{5}$$

Применительно к выделенному двухконсольному элементу, находящемуся под воздействием пяти усилий  $(\Delta T, P_1, P_2, q, M_{con})$ , выражение (5) приобретает вид:

$$\zeta_{bu} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^5 \left( \frac{P^2 \partial C_i}{\partial A} - C_i P_i \frac{\partial P_i}{\partial A} \right). \tag{6}$$

Для реализации полученной зависимости обратимся к рис. б.

Перемещения в соответствующих сечениях выделенной консоли (рис. б), определяются методами строительной механики.

В итоге после алгебраических преобразований формула (6) приводится к виду:

$$\zeta_{bu} = \frac{1}{3b} \left( \Delta T^2 \frac{\partial C_I}{\partial h_{cre}} + P_1^2 \frac{\partial C_{II}}{\partial h_{cre}} + P_2^2 \frac{\partial C_{III}}{\partial h_{cre}} + b^2 P_{bt}^2 \frac{\partial C_q}{\partial h_{cre}} + M_{con}^2 \frac{\partial C_0}{\partial h_{cre}} - \right. \\ \left. - C_I \Delta T \frac{\partial \Delta T}{\partial h_{cre}} - C_{II} P_1 \frac{\partial P_1}{\partial h_{cre}} - C_{III} P_2 \frac{\partial P_2}{\partial h_{cre}} - C_0 M_{con} \frac{\partial M_{con}}{\partial h_{cre}} \right). \tag{7}$$

Выполнив почленное дифференцирование, получим нелинейное дифференциальное уравнение. Постоянная интегрирования отыскивается из условия, в соответствии с которым при отсутствии трещины, т. е. при  $h_{cre} = 0$ , касательное усилие

$\Delta T = G_{\tau} \varepsilon_{gel} b t$ . Здесь  $\varepsilon_{gel}$  – относительные взаимные смещения арматуры и бетона на участке  $t$ ;  $G_{\tau}$  – модуль взаимного смещения арматуры и бетона.

Эта зависимость позволяет найти касательные напряжения в зоне, непосредственно прилегающей к трещине  $\Delta T$ , зависящий в том числе и от новой константы бетона  $\zeta_{bu}$ . Именно здесь, как показывают экспериментальные и численные исследования, происходит резкое возмущение касательных напряжений, сопровождающееся их скачкообразным увеличением и сменой знака. При этом изменяются знаки нормальных напряжений в бетоне (из растягивающих они превращаются в сжимающие), что также подтверждается в экспериментах [3, 6-8].

Объяснения этому явлению до настоящего времени не было дано. В работах Я.М. Немировского делается предположение, что причиной является усадка бетона, однако опыты целого ряда авторов этого не подтверждают.

Здесь причина заключается в том, что после образования трещин сплошность бетона нарушается и его деформирование уже не подчиняется законам сплошного тела. В зонах, прилегающих к трещинам, возникает концентрация деформаций, которая перенасыщает «потребность системы» (состоящей из бетонных блоков и арматуры при заданной статической схеме) в деформациях. Устанавливается связь напряженно-деформированного состояния в зоне возмущения с удельной энергией образования новых поверхностей трещины, освобождающейся в зоне предразрушения. В результате может быть получено новое решение задачи о напряженно-деформированном состоянии железобетонных конструкций в зоне, непосредственно прилегающей к трещине.

В заключение необходимо подчеркнуть, что предложения поставленных проблем позволят, даже оставаясь в рамках традиционной модели В.И. Мурашева, заметно уточнить основные параметры железобетона  $\psi_s$ ,  $a_{crc}$ ,  $h_{crc}$ ,  $l_{crc}$  и объяснить многие замеченные в экспериментах явления, происходящие при сопротивлении железобетона. К таким явлениям относятся, например, максимальные пики деформаций растянутой арматуры не в месте пересечения ее трещиной, а в соседних сечениях, прилегающих к трещине; резкий скачок касательных напряжений вблизи растянутой арматуры изгибаемого железобетонного элемента в поперечных сечениях, прилегающих к трещине; наконец сама форма трещины с максимальным раскрытием не на нижней грани изгибаемого элемента, а на некотором расстоянии над растянутой арматурой и т. п.

### Список библиографических ссылок

1. Либовиц Г. Разрушение, Т. 1, 2, 4, 5, 7. – М.: Мир, 1973. – 1977 с.
2. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с.
3. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона: монография. – М.: АСВ, 2004. – 472 с.
4. Верюжский Ю.В., Колчунов В.И. Методы механики железобетона. – Курск: Изд-во НАУ, 2005. – 653 с.
5. Колчунов В.И., Яковенко И.А., Ключева Н.В. Метод физических моделей сопротивления железобетона // Промышленное и гражданское строительство. – М.: Изд-во ПГС, 2013, № 12. – С. 51-55.
6. Баширов Х.З., Дородных А.А., Колчунов В.И. Ширина раскрытия наклонных трещин третьего типа в составных железобетонных конструкциях. // Строительство и реконструкция, 2012, № 6 (44). – С. 3-8.
7. Баширов Х.З., Дородных А.А., Колчунов В.И., Яковенко И.А., Усенко Н.В. К определению деформаций растянутого бетона для расчета трещиностойкости железобетонных конструкций по наклонным трещинам // Строительная механика и расчет сооружений, 2012, № 6. – С. 2-7.
8. Ключева Н.В., Яковенко И.А., Усенко Н.В. К расчету ширины раскрытия наклонных трещин третьего типа в составных железобетонных конструкциях // Промышленное и гражданское строительство. – М.: Изд-во ПГС, 2014, № 2. – С. 8-11.

**Kliueva N.V.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: klynavit@yandex.ru

**South-West State University**

The organization address: 305040, Russia, Kursk, 50 years of October st., 94, 323

**Kolchunov V.I.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: vikolchunov@mail.ru

**Yakovenko I.A.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: i2103@ukr.net

**National Aviation University**

The organization address: 03058, Ukraine, Kiev, Astronaut Komarov st., 1

### **Problem tasks of development of hypotheses of mechanics of destruction in relation to calculation of ferroconcrete designs**

#### **Resume**

Approaches for an assessment of tensely deformed condition of ferroconcrete designs from a position of development of hypotheses of mechanics of destruction are offered. Offers on creation of the settlement device of reinforced concrete are provided in article by allocation of the two-console element including a crack. Communication between such parameters as intense deformed conditions of cross section of a ferroconcrete element and features of coupling of fittings and concrete in the zones adjacent to a crack therefore the new solution of a task about intense the deformed condition of ferroconcrete designs in the zone which is directly adjacent to a crack can be received is revealed. It is shown that the pliability of a two-console element is connected with movements of all ferroconcrete core, and, therefore, the interrelation of the first and second limit states is traced. The analysis of dependences «power influence – movement» is made for impacts on the allocated two-console element. The conclusion is drawn on expediency of the offered statement of a considered problem which will allow, even remaining within V.I. Murashev's traditional model, considerably to specify key parameters of reinforced concrete and to explain many phenomena noticed in experiments occurring at resistance of reinforced concrete to power and deformation influences.

**Keywords:** fracture mechanics, reinforced concrete constructions, new concrete constants, dual console element hypothesis, the estimated unit, cracking, adhesion effect discontinuities.

#### **Reference list**

1. Libovits G. Destruction. – T. 1, 2, 4, 5, 7. – M.: MIR, 1973. – 1977 p.
2. Zajcev Ju.V. Modeling of deformations and concrete durability methods of mechanics of destruction. – M.: Strojizdat, 1982. – 196 p.
3. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Settlement models of power resistance of reinforced concrete: monograph. – M.: Publishers ASV, 2004. – 472 p.
4. Veryuzhsky Yu.V., Kolchunov V.I. Methods of mechanics of reinforced concrete. – Kursk: Publishing NAU, 2005. – 653 p.
5. Kolchunov V.I., Yakovenko I.A., Klyuyeva N.V. Method of physical models of resistance of reinforced concrete. // Industrial and civil engineering. – M.: Izd.-vo PGS, 2013, № 12. – P. 51-55.
6. Bashirov H.Z., Dorodnyh A.A., Kolchunov V.I. Width of disclosure of inclined cracks of the third type in compound ferroconcrete designs. // Construction and reconstruction, 2012, № 6 (44). – P. 3-8.
7. Bashirov H.Z., Dorodnyh A.A., Kolchunov V.I., Iakovenko I.A., Usenko N.V. To definition of deformations of the stretched concrete for calculation of crack resistance of ferroconcrete designs for inclined cracks // Construction mechanics and calculation of constructions, 2012, № 6. – P. 2-7.
8. Kljueva N.V., Iakovenko I.A., Usenko N.V. To calculation of width of disclosure of inclined cracks of the third type in compound ferroconcrete designs // Industrial and civil engineering. – M.: Izd.-vo PGS, 2014, № 2. – P. 8-11.