

Учет коррозионных повреждений эксплуатируемых железобетонных конструкций в условиях трехосного напряженно-деформированного состояния

Берлинов М.В.

Д-р техн. наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования РФ, профессор жилищно-коммунального комплекса, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (г. Москва); e-mail: BerlinovMV@mgsu.ru

Берлинова М.Н.

Канд. техн. наук, доцент, доцент жилищно-коммунального комплекса, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (г. Москва); e-mail: BerlinovaMN@mgsu.ru

Творогов А.В.

Магистрант жилищно-коммунального комплекса, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (г. Москва)

Печкина Е.К.

Студентка жилищно-коммунального комплекса, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (г. Москва)

Статья получена: 12.07.2020. Рассмотрена: 21.07.2020. Одобрена: 16.08.2020. Опубликовано онлайн: 30.09.2020. ©РИОР

Аннотация. Рассматривается задача линеаризации разрешающих уравнений расчета эксплуатируемых железобетонных конструкций при трехосном деформировании с учетом коррозионных повреждений. Представлен метод учета коррозионных повреждений, основанный на феноменологическом подходе для деформаций в условиях трехосного деформирования.

Ключевые слова: железобетонная конструкция, трещины, коррозионные повреждения, напряжения, деформации.

1. Введение

Расчет железобетонных конструкций в эксплуатационном состоянии по существующим нормативным документам [9], как правило, производится с учетом линейно-упругого аппарата строительной механики или теории упругости. В классической теории упускается нелинейность, анизотропия и реология деформирования. Некоторые несовершенства материалов расцениваются, лишь при помощи умножения характеристик материалов или нагрузок на определенные эмпирические коэффициенты, кото-

ACCOUNTING FOR CORROSION DAMAGE OF OPERATING REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN CONDITIONS OF A TRIAXIAL STRESS-STRAIN STATE

Berlinov M.V.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of Higher Professional Education, Professor of Housing and Communal Complex, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow; e-mail: BerlinovMV@mgsu.ru

Berlinova M.N.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Housing and Communal Complex, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow; e-mail: BerlinovaMN@mgsu.ru

Tvorogov A.V.

Master's Degree Student, Housing and Communal Complex, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow

Pechkina E.K.

Student, Housing and Communal Complex, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow

Manuscript received: 12.07.2020. **Revised:** 21.07.2020. **Accepted:** 16.08.2020. **Published online:** 30.09.2020. ©РИОР

Abstract. The problem of linearization of the resolving equations for calculating the operated reinforced concrete structures under triaxial deformation, taking into account corrosion damage, is considered. A method for taking into account corrosion damages based on a phenomenological approach for deformations under conditions of triaxial deformation is presented.

Keywords: reinforced concrete structure, cracks, corrosion damage, stress, deformation.

рые не зависят от всего многообразия воздействий от внешних нагрузок, включая и коррозионные повреждения, не говоря уже о вопросах эксплуатационной долговечности [4–8]. Не учитывается также поведение конструкций в процессе длительной эксплуатации.

2. Постановка задачи

Сущность представленного подхода будет основываться на феноменологическом подходе

для деформаций в условиях трехосного деформирования [1] (см. (1)).

Если допустить, с некоторой долей приближения, равенство коэффициентов относительных поперечных деформаций бетона и арматуры и принять осреднение коэффициентов армирования по всем трем координатным осям, то упомянутые выше выражения еще более упростятся (см. (2)).

Использование выражений (1) и (2) в расчетных зависимостях приведет к необходимости

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xyz}(t, t_0) = S[\sigma_{b,xyz}(t)] & \left\{ \frac{1}{E_m^0(t)} [K_{b,xyz}(t) + \alpha(t)\omega(t)\mu_{s,xyz}] \sigma_{b,xyz}(t) + \nu_b \left\langle \frac{1}{E_m^0(t)} [K_{b,xyz}(t) + \alpha(t)\omega(t)\mu_{s,yzx}] \sigma_{b,yzx}(t) + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{1}{E_m^0(t)} [K_{b,xyz}(t) + \alpha(t)\omega(t)\mu_{s,zxy}] \sigma_{b,zxy}(t) \right\rangle - \right. \\ & \left. - \int_{t_0}^t \left\langle [K_{b,xyz}(\tau) + \alpha_c(\tau)\omega(\tau)\mu_{s,xyz}] \sigma_{b,xyz}(\tau) + \nu_b \left\langle [K_{b,xyz}(\tau) + \alpha_c(\tau)\omega(\tau)\mu_{s,yzx}] \sigma_{b,yzx}(\tau) + \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. [K_{b,xyz}(\tau) + \alpha_c(\tau)\omega(\tau)\mu_{s,zxy}] \sigma_{b,zxy}(\tau) \right\rangle \right\rangle \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) d\tau \right\} \quad (1) \\ \gamma_{xyz} = S[\tau_{xyz}(\tau)] & \left\{ \frac{2(1+\nu)}{E_m^0(t)} \tau_{b,xyz}(t) [K_{b,xyz}(t) + k_v \alpha(t)\omega(t)\mu_{s,xyz}] - \right. \\ & \left. - \int_{t_0}^t \left\langle \tau_{b,xyz}(\tau) [K_{b,xyz}(\tau) + k_v \alpha_c(\tau)\omega(\tau)\mu_{s,xyz}] \right\rangle \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) d\tau \right\} \end{aligned}$$

где S — функция нелинейности;

E_t^0 — модуль деформаций бетона;

$C(t, \tau)$ — мера ползучести;

$\sigma_{xyz}(t)$ — среднее напряжение в сечении элементарного трехосного ж/б элемента (xyz означает круговую индексацию параметров вдоль соответствующих осей);

$\mu_{s,xyz}$ — коэффициент армирования;

$\alpha(t)$ — коэффициент приведения;

$K_{b,xyz}(t)$ — коэффициент, учитывающий степень коррозионных повреждений бетона вдоль соответствующей оси, изменяющийся с течением времени наблюдения;

$\omega_{s,xyz}(t)$ — аналогичный коэффициент для учета коррозионных повреждений арматуры.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xyz}(t, t_0) = S[\sigma_{b,xyz}(t)] & \left\{ \frac{1}{E_m^0(t)} [K_{b,xyz}(t) + \alpha(t)\omega(t)\mu_s] \sigma_{b,xyz}(t) + \nu_b [\sigma_{b,yzx}(t) + \sigma_{b,zxy}(t)] \right\} - \\ & \int_{t_0}^t [K_{b,xyz}(\tau) + \alpha_c(\tau)\omega(\tau)\mu_s] \sigma_{b,xyz}(\tau) + \nu_b [\sigma_{b,yzx}(\tau) + \sigma_{b,zxy}(\tau)] \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) d\tau \quad (2) \\ \gamma_{xyz} = S[\tau_{xyz}(\tau)] & \left\{ \frac{2(1+\nu)}{E_m^0(t)} \tau_{b,xyz}(t) [K_{b,xyz}(t) + k_b \alpha(t)\omega(t)\mu_s] - \right. \\ & \left. - \int_{t_0}^t \left\langle \tau_{b,xyz}(\tau) [K_{b,xyz}(\tau) + k_b \alpha_c(\tau)\omega(\tau)\mu_s] \right\rangle \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) d\tau \right\} \end{aligned}$$

их замкнутого интегрирования, что неизбежно встретит непреодолимые математические трудности, поэтому для получения численных результатов следует прибегнуть к линейаризации задачи с помощью метода интегральных оценок, основанного на приемах математической и временной линейаризации. Сущность такого приема заключается в пошаговом просмотре решений в пределах каждого временного интервала, на который разбивается весь изменяющийся режим внешней нагрузки в условиях эксплуатации, причем в границах каждого интервала процессы ползучести считаются фиксированными (рис. 1).

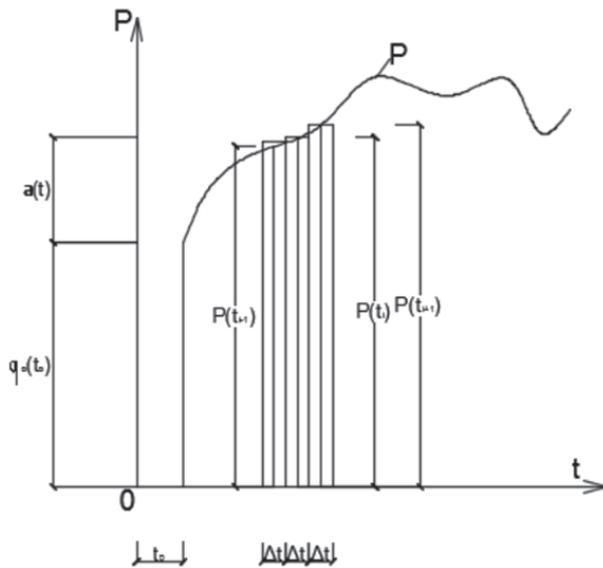


Рис. 1. Вероятностный характер изменения внешней нагрузки ($P_0(t)$ — постоянная нагрузка; $\Delta(t)$ — временной интервал; $\alpha(t)$ — постоянный коэффициент, зависящий от параметра изменения нагрузки)

3. Линейаризация разрешающих уравнений расчета железобетонных конструкций

Линейаризация разрешающих уравнений расчета железобетонных конструкций при трехосном деформировании с учетом коррозионных повреждений можно выполнить с помощью, так называемого интегрального модуля деформаций, значение которого можно получить из выражения (1), тогда зависимости (1) и (2) можно трактовать следующим образом:

$$\varepsilon_{xyz}(t, t_0) = \frac{\sigma_{xyz}(t, t_0)}{E_{xyz}^{int}(t, t_0)}, \quad (3)$$

где t_0 — рассматриваемое время в течение выbranного шага итерационного процесса;

$E_{xyz}^{int}(t, t_0)$ — интегральный модуль деформаций, представляющий собой нелинейный интегральный оператор, имеющий следующий вид (см. (4)).

Или с учетом упомянутых ранее упрощений и допущений (см. (5)).

Разрешив уравнения (4) и (5), получим окончательно (6).

В упрощенном виде см. (7).

Использование выражений (1) в расчетных зависимостях приведет к необходимости их замкнутого интегрирования, что неизбежно встретит непреодолимые математические трудности, поэтому для получения численных результатов следует прибегнуть к линейаризации задачи с помощью метода интегральных оценок [2; 3]. Сущность такого приема заключается в пошаговом просмотре решений в пределах каждого временного интервала, на который разбивается весь изменяющийся режим внешней нагрузки в условиях эксплуатации, причем в границах каждого интервала процессы ползучести считаются фиксированными (рис. 1).

Тогда записи расчетных формул (6) и (7) можно представить в следующем достаточно компактном виде (см. (8) и (9)).

С учетом значений известной функции нелинейности деформирования можно получить значения секущего интегрального модуля деформаций, для этого в выражениях (6–9) необходимо принять:

$$S[\sigma_{b,xyz}(t)] = 1 + V \left[\frac{\sigma_{xyz}(t)}{R(t)} \right]^m. \quad (10)$$

Для элементов железобетонных конструкций, работающих без трещин и при отсутствии арматуры, значения интегрального модуля деформаций будут иметь следующий вид (см. (11)).

И, наконец, для элементов железобетонных конструкций, работающих с трещинами, значения интегральных модулей деформаций получат значения (см. (12)).

Известно, что для арматурных сталей, использующихся в составе железобетонных конструкций, к которым стоит отнести стали высокой прочности, и некоторых классов температурно-упрочненной арматуры, где нелиней-

$$\frac{1}{E_{xyz}^{int}(t, t_0)} = S[\sigma_{b,xyz}(t)] \left\{ \frac{1}{E_m^0(t)} [K_{b,xyz}(t) + \alpha(t)\omega_s(t)\mu_{s,xyz}] \sigma_{b,xyz}(t) + v_b \left\langle \frac{1}{E_m^0(t)} [K_{b,xyz}(t) + \alpha(t)\omega_s(t)\mu_{s,yzx}] \sigma_{b,yzx}(t) + \frac{1}{E_m^0(t)} [K_{b,xyz}(t) + \alpha(t)\omega_s(t)\mu_{s,zxy}] \sigma_{b,zxy}(t) \right\rangle - \right. \\ \left. - \int_{t_0}^t \left\| [K_{b,xyz}(\tau) + \alpha_C(\tau)\omega_s(\tau)\mu_{s,xyz}] \sigma_{b,xyz}(\tau) + v_b \left\langle \frac{1}{E_m^0(\tau)} [K_{b,xyz}(\tau) + \alpha(\tau)\omega_s(\tau)\mu_{s,yzx}] \sigma_{b,yzx}(\tau) + \frac{1}{E_m^0(\tau)} [K_{b,xyz}(\tau) + \alpha(\tau)\omega_s(\tau)\mu_{s,zxy}] \sigma_{b,zxy}(\tau) \right\rangle \right\} \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) d\tau \right\} \quad (4)$$

$$\frac{1}{E_{xyz}^{int}(t, t_0)} = S[\sigma_{b,xyz}(t)] \left\{ \frac{1}{E_m^0(t)} [K_{b,xyz}(t) + \alpha(t)\omega(t)\mu_s] \left\| \sigma_{b,xyz}(t) + v_b [\sigma_{b,yzx}(t) + \sigma_{b,zxy}(t)] \right\| - \right. \\ \left. - \int_{t_0}^t [K_{b,xyz}(\tau) + \alpha_C(\tau)\omega(\tau)\mu_s] \left\| \sigma_{b,xyz}(\tau) + v_b [\sigma_{b,yzx}(\tau) + \sigma_{b,zxy}(\tau)] \right\| \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) d\tau \right\}. \quad (5)$$

$$E_{xyz}^{int}(t, t_0) = \frac{E_m^0(t)}{S[\sigma_{b,xyz}(t)] \left\{ \left\| [K_{b,xyz}(t) + \alpha(t)\omega_s(t)\mu_{s,xyz}] \sigma_{b,xyz}(t) + v_b \left\langle \frac{1}{E_m^0(t)} [K_{b,xyz}(t) + \alpha(t)\omega_s(t)\mu_{s,yzx}] \sigma_{b,yzx}(t) + \frac{1}{E_m^0(t)} [K_{b,xyz}(t) + \alpha(t)\omega_s(t)\mu_{s,zxy}] \sigma_{b,zxy}(t) \right\rangle \right\| - \right. \\ \left. - \int_{t_0}^t [K_{b,xyz}(\tau) + \alpha_C(\tau)\omega(\tau)\mu_s] \left\| \sigma_{b,xyz}(\tau) + v_b \left\langle \frac{1}{E_m^0(\tau)} [K_{b,xyz}(\tau) + \alpha(\tau)\omega_s(\tau)\mu_{s,yzx}] \sigma_{b,yzx}(\tau) + \frac{1}{E_m^0(\tau)} [K_{b,xyz}(\tau) + \alpha(\tau)\omega_s(\tau)\mu_{s,zxy}] \sigma_{b,zxy}(\tau) \right\rangle \right\| \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) d\tau \right\}} \quad (6)$$

$$E_{xyz}^{int}(t, t_0) = \frac{E_m^0(t)}{S[\sigma_{b,xyz}(t)] \left\{ \left\| [K_{b,xyz}(t) + \alpha(t)\omega_s(t)\mu_{s,xyz}] \sigma_{b,xyz}(t) + v_b [\sigma_{b,yzx}(t) + \sigma_{b,zxy}(t)] \right\| - \right. \\ \left. - \int_{t_0}^t [K_{b,xyz}(\tau) + \alpha_C(\tau)\omega(\tau)\mu_s] \left\| \sigma_{b,xyz}(\tau) + v_b [\sigma_{b,yzx}(\tau) + \sigma_{b,zxy}(\tau)] \right\| \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) d\tau \right\}} \quad (7)$$

$$E_{xyz}^{int}(t, t_0) = \frac{E_m^0(t)}{S[\sigma_{b,xyz}(t)] \left\{ [1 - E_m^0(t)C(t, t_0)] [K_{b,xyz}(t) + \alpha(t)\omega_s(t)\mu_{s,xyz}] \left\| \sigma_{b,xyz}(t) + v_b \left\langle \frac{1}{E_m^0(t)} [K_{b,xyz}(t) + \alpha(t)\omega_s(t)\mu_{s,yzx}] \sigma_{b,yzx}(t) + \frac{1}{E_m^0(t)} [K_{b,xyz}(t) + \alpha(t)\omega_s(t)\mu_{s,zxy}] \sigma_{b,zxy}(t) \right\rangle \right\| \right. \\ \left. \right\}} \quad (8)$$

$$E_{xyz}^{int}(t, t_0) = \frac{E_m^0(t)}{S[\sigma_{b,xyz}(t)] [1 - E_m^0(t)C(t, t_0)] [K_{b,xyz}(t) + \alpha(t)\omega_s(t)\mu_{s,xyz}] \left\| \sigma_{b,xyz}(t) + v_b [\sigma_{b,yzx}(t) + \sigma_{b,zxy}(t)] \right\|} \quad (9)$$

$$E_{xyz}^{int}(t, t_0) = \frac{E_m^0(t)}{\left\{ 1 + V \left[\frac{\sigma_{xyz}(t)}{R(t)} \right]^m \right\} \left[1 - E_m^0(t) C(t, t_0) \right] \left[K_{b,xyz}(t) \left\| \sigma_{b,xyz}(t) + v_b \left[\sigma_{b,yzx}(t) + \sigma_{b,zxy}(t) \right] \right\| \right]} \quad (11)$$

$$E_{xyz}^{int,r}(t, t_0) = \frac{E_s^0(t)}{S \left[\sigma_{s,xyz}(t) \right] \left\{ \left\| \left[\psi_{s,xyz} \omega_s(t) \mu_{s,xyz} \right] \sigma_{s,xyz}(t) - v_s \left[\psi_{s,yzx} \omega_s(t) \mu_{s,xyz} \sigma_{b,yzx}(t) + \psi_{s,zxy} \omega_s(t) \mu_{s,xyz} \sigma_{s,zxy}(t) \right] \right\| - \int_{t_0}^t \left\| \left[\psi_{s,xyz} \omega_s(\tau) \mu_{s,xyz} \right] \sigma_{s,xyz}(\tau) - v_s \left[\psi_{s,yzx} \omega_s(\tau) \mu_{s,xyz} \sigma_{b,yzx}(\tau) + \psi_{s,zxy} \omega_s(\tau) \mu_{s,xyz} \sigma_{s,zxy}(\tau) \right] \right\| \frac{\partial}{\partial \tau} C_s(t, \tau) d\tau \right\}} \quad (12)$$

ность деформирования предельно мала, данным фактором стоит пренебречь с целью существенного упрощения расчетных зависимостей. Помимо этого, с подобной же целью можно использовать это предположение и для других типов арматурных сталей, чему способствуют следующие причины: в обычных ситуациях эксплуатации железобетонных конструкций, напряжения в арматуре в элементах упомянутых конструкций, эксплуатируемых без трещин, заметно меньше допустимых. Также стоит учитывать, что в арматурных сталях эффект ползучести в эксплуатационных условиях малозначителен и возможен только при относительно высоких температурах. Такие температуры в обычных условиях эксплуатации железобетонных конструкций не встречаются. В данном случае деформацию арматуры из стали можно (но при этом совсем не обязательно) считать вне зависимости от временного фактора и нелинейности деформирования, а также полагать в расчетах в традиционно известном упруго-линейном виде.

Тогда значения деформаций элемента, если в материале есть трещины, примут следующий вид:

$$\varepsilon_{xyz} = \frac{1}{E_s^0} \omega_s(t) \left[\psi_{s,xyz} \mu_{s,xyz} \sigma_{s,xyz} - v_s \left(\psi_{s,xyz} \mu_{s,yzx} \sigma_{b,yzx} + \psi_{s,zxy} \mu_{s,zxy} \sigma_{s,zxy} \right) \right]. \quad (13)$$

$$\gamma_{s,xyz} = \frac{2(1 + v_s)}{E_s^0} \psi_{s,xyz} n_{\tau, s,xyz} \mu_{s,xyz} \omega_s(t) \tau_{s,xyz}.$$

Исходя из этого, зависимость (1) помогает найти величины компонент сдвиговых и осевых деформаций при трехмерном напряженно-деформированном состоянии после появления трещин.

Значение ширины образования трещин следует определять согласно известной стандартной эмпирической методике с некоторыми корректировками, так как при вычислении напряжений в стержнях арматуры стоит учитывать влияние несовершенств деформирования бетона.

Увеличение эффективности и уровня качества строительства требует использования более надежных и экономичных конструкций, что воплощается при использовании во время проектирования инновационных экономичных методов их расчета, таких как метод конечных элементов. Создание подобных методик тесно связано с необходимостью полного отражения актуальных свойств материалов, которые соответствуют их реальному поведению под воздействием внешних нагрузок.

Обращаем внимание, что в этом случае деформирование в конкретно взятый период времени и пошаговом просмотре всего режима нагружения разрешающие уравнения трехосной среды примут вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{xyz}(t) &= \tilde{\lambda}(t) \Theta(t) + 2\tilde{\mu}(t) \varepsilon_{xyz}(t); \\ \tau_{xyz} &= \tilde{\mu}(t) \gamma_{xyz}(t). \end{aligned} \quad (15)$$

$$E_{xyz}^{int,r}(t, t_0) = \frac{E_s^0}{\left[\psi_{s,xyz} \omega_s(t) \mu_{s,xyz} \right] \sigma_{s,xyz} - v_s \left[\psi_{s,yzx} \omega_s(t) \mu_{s,xyz} \sigma_{b,yzx} + \psi_{s,zxy} \omega_s(t) \mu_{s,xyz} \sigma_{s,zxy} \right]}. \quad (14)$$

Анализируя полученные уравнения можно резюмировать следующее: что игнорирование реологии, нелинейности деформирования и коррозионных повреждений превратит их в математические выражения, относящиеся к обратной форме закона Гука при трехосном деформировании.

Принимая во внимание все вышесказанное определение разрешающих уравнений для элементов с армированием, эксплуатируемых с трещинами, а также без трещин, не будет представлять существенных затруднений. Интегральные операторы превратятся в физические характеристики деформирования арматуры, учитывающие работу бетона в зонах между трещинами. Таким образом, в конечном варианте можно получить всего три разрешающих системы, которые различаются только значениями интегральных операторов.

Стоит обратить внимание, что соотношение (15) в случае применения способа интегральных оценок (фиксирования процессов деформирования в конкретно взятый период времени) заметно упростится, а значения физико-механических показателей примут такой вид:

$$\tilde{\lambda}(t) = \frac{E_{xyz}^{int}(t, t_0)v}{(1+v)(1-2v)}; \quad \tilde{\mu}(t) = \frac{E_{xyz}^{int}(t, t_0)}{2(1+v)}, \quad (16)$$

где $E_{in}(t)$ — величина интегрального модуля деформаций используемого строительного материала, имеющего постоянное значение в конкретный период времени, но имеющий зависимость от напряженного состояния на всех этапах рассмотрения при использовании способа последовательных итераций.

Таким образом, выражения (15) будут значительно проще и после некоторых математических преобразований приобретут следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{xyz} &= \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ \varepsilon_x E_{xyz}^{in}(t) + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{1-\nu} \left[\nu \varepsilon_{yzx} E_{yzx}^{in}(t) + \nu \varepsilon_{zyx} E_{zyx}^{in}(t) \right] \right\}; \quad (17) \\ \tau_{xyz} &= \frac{E_{xyz}^{in}(t)}{2(1+\nu)} \gamma_{xyz}. \end{aligned}$$

Отметим, что при определении тангенциальных напряжений для работающего с трещинами элемента при выборе интегрального модуля деформаций необходимо принимать во внимание нагельный эффект.

Обязательно нужно заметить, что значения упомянутых модулей деформаций для армированных элементов с трещинами примут другой вид (2).

Такие рассуждения актуальны при вычислении деформаций или компонентов тензора напряжений, действующих на одной из граней элементарного объёма, которые совпадают с направлениями по ортогональным осям координат. Хотя из практики известно, что трещины станут образовываться не всегда в оговоренных направлениях, а на иных направлениях, где действуют главные растягивающие напряжения. Данные факторы существенно повышают сложность алгоритмизации расчетной методики, особенно с учетом коррозионных повреждений, но вполне воплощаемы на современных компьютерах, особенно если предварительно известны направления и зоны армирования, не говоря уже о его количественном содержании. Еще большие математические сложности возникнут, если еще на этапе проектирования потребуются назначать характеристики конструктивных элементов с учетом длительности сроков эксплуатации, нелинейности и реологии деформирования, а также возможности проявления коррозионных повреждений, т.е. определять размеры поперечных сечений и требуемые классы бетона и арматуры с учетом перечисленных факторов.

Литература

1. Берлинов М.В. Учет энергопоглощения железобетонных конструкций в условиях нелинейного трехмерного деформирования [Текст] / М.В. Берлинов // Бетон и железобетон. — 2006. — № 6. — С. 26–29.
2. Берлинов М.В. Оценка напряженного состояния поврежденных коррозией железобетонных конструкций перед усилением [Текст] / М.В. Берлинов // Научное обозрение. — 2016. — № 7. — С. 11–14.
3. Берлинов М.В. Расчет каркаса зданий при динамических воздействиях от промышленного оборудования [Текст] / М.В. Берлинов // Промышленное и гражданское строительство / — 2004. — № 6. — С. 48–49.

4. Берлинов М.В. Влияние вибрационных нагрузок на эксплуатацию оснований и фундаментов [Текст] / М.В. Берлинов, А.В. Творогов // БСТ: Бюллетень строительной техники. — 2020. — № 3. — С. 41–43.
5. Варламов А.А. Модели поведения бетона. Общая теория деградации [Текст]: монография / А.А. Варламов, В.И. Римшин. — М., 2019. — 435 с.
6. Король Е.А. Особенности расчета стеновых панелей с монолитной связью слоев на стадиях монтажа, транспортирования и эксплуатации [Текст] / Е.А. Король, М.Н. Берлинова // Вестник МГСУ. — 2019. — Т. 14. — № 3. — С. 367–375.
7. Korol E.A., Berlinov M.V., Berlinova M.N. The long term stability of multilayer walling structures. В сборнике: MATEC Web of Conferences. — 2017. — С. 04006.
8. Korol E.A., Berlinov M.V., Berlinova M.N. Kinetics of the strength of concrete in constructions. Procedia Engineering (см. в книгах). — 2016. — Т. 153. — С. 292–297.
9. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения [Текст]. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.

References

1. Berlinov M.V. Uchet energopogloshcheniya zhelezobetonnykh konstrukcij v usloviyah nelinejnogo trekhmernogo deformirovaniya [Consideration of energy absorption of reinforced concrete structures under nonlinear three-dimensional deformation]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 2006, I. 6, pp. 26–29.
2. Berlinov M.V. Ocenka napryazhennogo sostoyaniya povrezhdennykh korroziej zhelezobetonnykh konstrukcij pred usileniem [Assessment of the stress state of reinforced concrete structures damaged by corrosion before strengthening]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review]. 2016, I. 7, pp. 11–14.
3. Berlinov M.V. Raschyot karkasa zdaniy pri dinamicheskikh vozdeystviyah ot promyshlennogo oborudovaniya [Calculation of the frame of buildings under dynamic influences from industrial equipment]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2004, I. 6, pp. 48–49.
4. Berlinov M.V., Tvorogov A.V. Vliyaniye vibratsionnykh nagruzok na ekspluatatsiyu osnovanij i fundamentov [The influence of vibration loads on the operation of bases and foundations]. *BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki* [BST: Bulletin of construction equipment]. 2020, I. 3, pp. 41–43.
5. Varlamov A.A. *Modeli povedeniya betona. Obshchaya teoriya degradatsii* [Concrete behavior models. General theory of degradation]. Moscow, 2019. 435 p.
6. Korol' E.A., Berlinova M.N. Osobennosti rascheta stenovykh panelej s monolitnoj svyaz'yu sloev na stadiyah montazha, transportirovaniya i ekspluatatsii [Features of the calculation of wall panels with a monolithic bond of layers at the stages of installation, transportation and operation]. *Vestnik MGSU* [Vestnik MGSU]. 2019, V. 14, I. 3, pp. 367–375.
7. Korol E.A., Berlinov M.V., Berlinova M.N. The long term stability of multilayer walling structures. V sbornike: MATEC Web of Conferences. 2017. C.04006.
8. Korol E.A., Berlinov M.V., Berlinova M.N. Kinetics of the strength of concrete in constructions. *Procedia Engineering* (sm. v knigah). 2016. T.153. S. 292–297.
9. *SP 63.13330.2018 Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redakciya SNIp 52-01-2003* [SP 63.13330.2018 Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. Updated edition of SNIp 52-01-2003].