

## Расчет строительных конструкций

### НЕКОТОРЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

В.М. БОНДАРЕНКО, *д-р техн. наук, профессор, академик РААСН*  
*Московская госуд. академия коммунального хозяйства и строительства*  
*109029, Москва, Ср. Калитниковская ул., д. 30*

*В интересах эксплуатационной безопасности изучены и оценены стадийность, коррозионная и энергетическая диссипация, специфики неравновесных процессов силового сопротивления бетонов и железобетонных конструкций при статических и динамических нагрузениях.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: коррозия, энергетическая диссипация, железобетон

Для неравновесных факторов силового сопротивления бетона и железобетона, в частности, ползучести и коррозионных повреждений, как объективных природных физических явлений, зависящих от уровня и временного режима инициирующих воздействий, возможны два кинематических состояния: первое – устойчивое состояние, характерное для эксплуатируемых сооружений, и второе – неустойчивое (лавинное), сопровождающее процесс разрушения материалов и конструкций.

Устойчивое состояние силового сопротивления соответствует условиям равновесия и для любого момента времени количественно однозначно оценивается конкретными величинами деформаций ползучести (или глубины коррозионных повреждений). При этом в случае константных, но разных по уровням инициирующих воздействий, процесс их развития происходит в устойчивой области, во времени затухает, а при напряжениях, не превышающих длительной прочности материала, асимптотически стабилизируется.

Неустойчивое состояние силового сопротивления, которое с позиции современной теории сооружений классифицируется как запредельное и по соображениям безопасности ординарной эксплуатационной практики не допускается, характерно лавинное развитие неравновесных процессов и является предметом изучения живучести строительных объектов (заметим, что в такой постановке даже при кратковременном нагружении, диаграмма напряжения – деформации бетона с нисходящей ветвью иллюстрирует оба возможных состояния силового сопротивления).

Таким образом, в теории сооружений актуальны определение условий перехода силового сопротивления конструкций из ординарного устойчивого состояния в экстремальное неустойчивое состояние, а в дальнейшем оценке резервов конструктивной безопасности, живучести и ресурса эвакуационного времени.

Экспериментально установлено, что глубина коррозионных повреждений и мера ползучести бетона при прочих равных условиях зависит от уровня напряженного состояния образцов. Это обусловлено соответствующим изменением структуры материала. Между тем, до самого последнего времени отсутствовали предложения, позволяющие описать специфику смены кинетики рассматриваемых процессов. Именно такие предложения необходимы для анализа особенностей изучаемых явлений, особенно в интересах выявления условий перехода силового сопротивления зданий и сооружений из устойчивого в неустойчивое (лавинное) состояние. Применительно к бетонным телам искомые соотношения были получены с помощью нелинейного обобщения известных пред-

ложений Гольдберга-Вааге [1, 2]; при этом удобно единым символом  $L$  обозначить как глубину коррозионных повреждений  $\delta$ , так и меру ползучести  $C^0$ ,

$$\frac{d \left[ \Delta L(t, t_0) \right]^{-m}}{dt} = \alpha \left[ L(t, t_0) \right]^{-m} \quad \text{или} \quad \frac{d \left[ \Delta L(t, t_0) \right]^{-m}}{\left[ \Delta L(t, t_0) \right]^{-m}} = \alpha dt, \quad (1)$$

$$\text{откуда} \quad \int_{t_0}^t \left[ L(t, t_0) \right]^{-m} d \left[ \Delta L(t, t_0) \right]^{-m} = \int_{t_0}^t \alpha dt \quad \text{или} \quad \left. \frac{\left[ \Delta L(t, t_0) \right]^{-m+1}}{\left[ -m+1 \right]} \right|_{t_0}^t = 2t \Big|_{t_0}^t,$$

где относительный дефицит текущего значения  $L$  по отношению к некоторому критическому значению  $L_{кр}$  будет

$$\Delta L(t, t_0) \frac{L_{кр}(t_0) - L(t, t_0)}{L_{кр}(t_0)} = 1 - \frac{L(t, t_0)}{L_{кр}(t_0)}. \quad (2)$$

$$\text{Решение (1) имеет вид:} \quad L(t, t_0) = f_m(\eta, \alpha, t) L_{кр}, \quad \text{где} \quad \eta = \sigma/R_b, \quad (3)$$

$$\text{- при } m \neq 1: \quad f_m = \frac{1}{\left[ -m+1 \right]} \left\langle \Delta L(t_0, t_0) \right[ -m+1 \right] + \left[ -m+1 \right] \alpha (t - t_0) \right\rangle^{\frac{1}{\left[ -m+1 \right]}}, \quad (4)$$

$$\text{- при } m = 0: \quad f_0 = \frac{L(t_0, t_0)}{L_{кр}(t_0)} + \alpha (t - t_0), \quad (5)$$

$$\text{- при } m = 1: \quad f_1 = 1 - \Delta L(t_0, t_0) e^{-\alpha(t-t_0)}. \quad (6)$$

Причем заметим, что параметр  $\alpha$ , также как и  $m$ ,  $L_{кр}$ , устанавливается эмпирически. Здесь  $t_0$  – время начала наблюдения,  $t$  – заданное время наблюдения;  $L_{кр}(t_0)$  – конечное (или некоторое другое) фиксированное значение  $L$ , определяемое эмпирически для конкретных  $t_0$  и константного уровня напряжений  $\eta = \sigma/R_b$ ;  $L(t_0, t_0)$  – значение  $L$  в момент начала наблюдения (может быть вычислено (4)-(6) при  $t = t_0 = 0$ ,  $\alpha$  – эмпирический параметр скорости развития исследуемого неравновесного процесса, соответствующий конкретным  $t_0$  и  $\eta$ ;  $m$  – эмпирический параметр характера (устойчивости или неустойчивости) этих неравновесных процессов при конкретных  $t_0$  и  $\eta$ .

Отметим, что в области устойчивого силового сопротивления имеют место  $m > 0, \alpha < 0$ ; причем при  $m \geq 1$  наблюдается асимптотическое затухание процесса, а величина  $L(t, t_0)$  стремится к предельному значению  $L_{кр}(t_0)$ ; при  $1 > m > 0$ , затухание не имеет предела, а фиксируемая точка  $t_1$  для  $L_{кр}(t_0)$  устанавливается из соображения удобства экспериментальных данных, например  $t_1 \cong |\alpha| \left[ -m+1 \right]^{-1}$ . В области неустойчивого силового сопротивления значения  $L_{кр}$ ,  $m$ ,  $\alpha$  устанавливаются из аналогичных соображений.

В результате для нескольких  $t_0$  и  $\eta$  и каждого возможного сочетания номинаций бетона и коррозионной среды формируется табл. 1.

Подчеркнем, что в диапазоне от  $\eta = 0$  до  $\eta_{л} = 0,4 \div 0,5$  (условно линейная область) происходит уплотнение структуры бетона и неравновесные процессы ползучести и коррозионных повреждений замедляются; в диапазоне от

<sup>1</sup> Выражение (6) эмпирическое для меры ползучести применено ранее Н.И. Масловым-Н.Х. Арутюняном.

$\eta_n = 0,4 \div 0,5$  до  $\eta_T = R_{от}/R_b$  (области нелинейных процессов) наблюдается разуплотнение структуры бетона и активное трещинообразование, сопровождающееся интенсификацией ползучести и коррозионных повреждений.

Таблица 1

№	Начало набл. $t_0$	$t_0 = 0$				$t_0 = t_1$				$t_0 = t_n$			
		Уровень $\eta$	0,0	0,3	0,6	0,9	0,0	0,3	0,6	0,9	0,0	0,3	0,6
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	$L_{кр}(t_0)$												
2	$L(t_0, t_0)$												
3	$\alpha$												
4	$m$												

Указанные обстоятельства определяют вид кривых для искомым эмпирических параметров (табл.1, рис.1) и простейших аппроксимирующих записей их функции; например для  $m$  :

$$m(t_0, \eta) = \sum_{i=0}^{i=3} \mathbf{1}(t_0) \bar{\eta}^i, \quad (7)$$

для которых  $q_i$  вычисляются с помощью фиксированных значений  $m$  (табл.1)

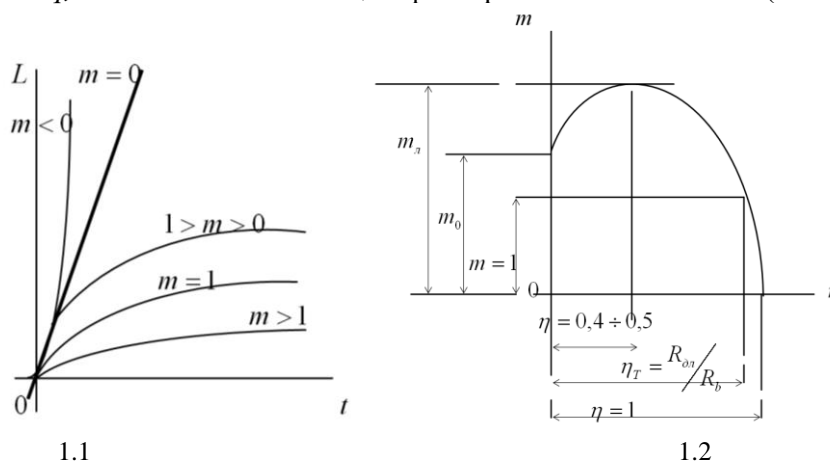


Рис. 1. Схемы  $L$  и  $m$  для устойчивого и неустойчивого силового сопротивления

1.1. Кинетика неравновесного процесса  $L$  в зависимости от величины  $m$  : при  $m \geq 1$  устойчивое, с торможением процесса во времени, затуханием и асимптотическим приближением к некоторому пределу; при  $1 > m > 0$  устойчивое, с торможением, без асимптотического приближения к пределу, что допускает переход процесса в запредельное состояние.

1.2. График параметра  $m$  в зависимости от уровня константных напряжений  $\eta = \sigma/R_b$  .

До экспериментального уточнения, принимается, что растянутый бетон (например, бетон растянутой зоны изгибаемого элемента) фильтрует коррозионную среду ( $m = 0$ ).

В случае режимного нагружения  $\eta(t) = \sigma(t)/R_b \neq const$  (в частности, монотонного неубывающего нагружения) в уравнение (1) вводятся функции этих параметров типа (7). Соответствующие решения еще предстоит получить.

Схематично кинетика  $L$  в этом случае ожидается в виде кривых типа рис.2.

При одностороннем контакте бетонного тела с коррозионной агрессивной внешней средой по его глубине фиксируются три специфические зоны (рис.3).

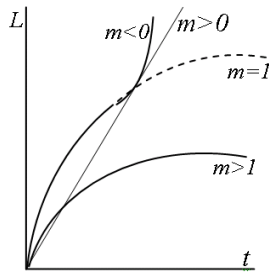


Рис.2. Схема развития  $L$  во времени при возрастающем нагружении.  
Агрессивная среда

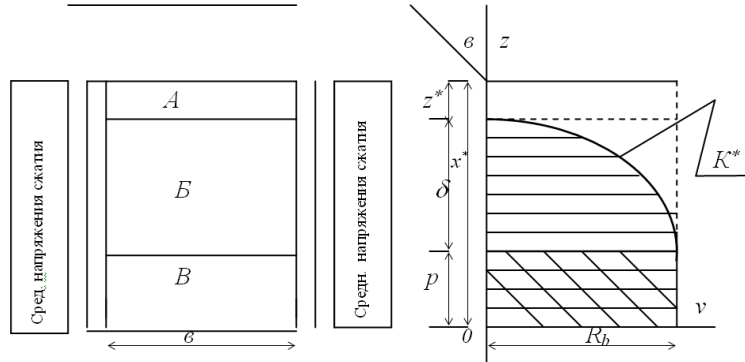


Рис. 3. Схема расположения структурных зон поврежденного коррозией бетонного тела. Здесь  $A$  - зона полного коррозионного разрушения бетона ( $z^*$ );  $B$  - зона частичного коррозионного повреждения бетона ( $\delta$ );  $B$  - зона неповрежденного бетона ( $p$ );  $a$ ,  $v$ ,  $x^*$  - геометрические размеры бетонного тела (образца);  $K^*$  - кривая функции повреждений.

Глубина повреждений  $\delta$  вычисляется по (4), (6), а также может быть вычислена по другим отражающим влияние уровня напряжений алгоритмам.

Существенно, что интенсивность повреждений по мере удаления от границы зон  $A$  и  $B$  постепенно уменьшается, а на границе зон  $B$  и  $B$  обнуляется сопряженно. Это позволяет искать функцию повреждений  $K^*$  в простейшем виде:

$$K^*(z) = \sum_{i=0}^{i=2} a_i z^i, \quad (8)$$

где  $a_i$  - некоторые фиксируемые значения  $K^*$ : при  $z = p$   $K^*(p) = 1$ ;  $dK/dz = 0$ ;

при  $z = p + \delta$   $K^*(p + \delta) = 0$ , (9)

откуда  $a_0 = 1 - \left(\frac{p}{\delta}\right)^2$ ;  $a_1 = \frac{2p}{\delta^2}$ ;  $a_2 = -\frac{1}{\delta^2}$ ,

и функция повреждений  $K^*(z) = \left[1 - \left(\frac{p}{\delta}\right)^2\right] \frac{2p}{\delta^2} z - \frac{1}{\delta^2} z^2$ . (10)

Поскольку запись (8) является общей, а условия (9) чисто геометрические, постольку оправдано применение единой функции повреждений  $K^*$  ко всем механическим характеристикам силового сопротивления, т.е.

$$R_b^* = K^* R_b, \quad R_{ол}^* = K^* R_{ол}, \quad E_{ep}^* = K^* E_{ep}, \quad C^* = C^0 / K^*; \quad \varepsilon_{об}^* = K^* \varepsilon_{об} \quad (11)$$

(здесь  $R_b$  - предел кратковременной прочности,  $R_{ол}$  - предел длительной прочности,  $E_{ep}$  - временный модуль деформации,  $C^0$  - мера ползучести,  $\varepsilon_{об}$  - относительные обратимые деформации).

В рамках  $m \geq 1$ ,  $\eta \leq R_{ол} / R_b$ , несмотря на наличие значительного числа предложений для реологических уравнений механического состояния бетона, в практическом проектировании используются квазилинейные записи типа (12)

$$\varepsilon(\sigma, t, t_0) = \frac{\sigma(t) \bar{S}^0(\eta)}{E_{\text{вр.л}}(t, t_0)} \quad [5], \quad (12)$$

где  $\sigma(t)$  – напряжения в момент наблюдения,  $\varepsilon(\sigma, t, t_0)$  – полная относительная деформация,  $E_{\text{вр.л}}$  – линейный временный модуль деформаций [11],

$$E_{\text{вр.л}}(t, t_0) = \left[ \frac{1}{E_{\text{мг}}(t)} + C^0(t, t_0) \right]^{-1} \quad (13)$$

( $E_{\text{мг}}$  – линейный модуль мгновенной деформации,  $C^0$  – мера ползучести);  $\bar{S}^0(\eta)$  – расчетная функция нелинейности [5] (в частности при сжатии)

$$\bar{S}^0(\eta) = 1 + \bar{V} \eta^{\bar{m}}, \quad (14)$$

где  $\bar{V}$  и  $\bar{m}$  – расчетные параметры нелинейности, определяемые с помощью частных  $V$  и  $m$  [6], например табл.2.

Таблица 2

Класс бетона В	Параметры		$\bar{S}^0_{\text{ср}}$
	$\bar{V}$	$m$	
15	2,96	4,27	1,58
60	0,23	3,52	1,19

Примечание:  $\bar{m}$  всегда принимаем  $\bar{m} = 4$ , а при растяжении (разгрузке) считается, что  $V = 0$  и  $\bar{S}^0(\eta) = 1$ . (15)

Отсюда коэффициент обратимости и величина восстановленной деформации при разгрузке и отсутствии коррозионных повреждений

$$K_{\text{об}}(z) = \frac{1}{\bar{S}^0(\eta(z))}; \quad \varepsilon_{\text{об}}(z) = K_{\text{об}}(z) [\varepsilon_{\text{max}}(z) - \varepsilon_{\text{min}}(z)], \quad (16)$$

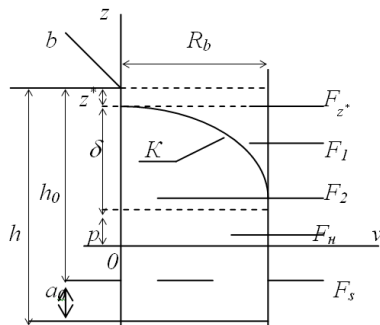
а коэффициент обратимости и величина восстановленной деформации при разгрузке с учетом коррозионных повреждений (11)

$$K_{\text{об}}^*(z) = \frac{K^*(z)}{\bar{S}^0(\eta)}; \quad \varepsilon_{\text{об}}^*(z) = K_{\text{об}}^*(z) [\varepsilon_{\text{max}}(z) - \varepsilon_{\text{min}}(z)]. \quad (17)$$

При поперечном изгибе железобетонного элемента применительно к 1-ому предельному состоянию расчетная модель приводится на рис.4. А поскольку выше введена посылка о том, что растянутый бетон (например, бетон растянутой зоны изгибаемого железобетонного элемента) фильтрует коррозионную среду, постольку вводится ограничение:

$$\delta \leq x^* - z, \quad (18)$$

при этом для  $\eta$  (табл.1) и формулы (7) допускается усреднение по высоте сжа-



той зоны  $x$  значение  $\sigma$ .

Рис. 4. Схема напряженного состояния нормального поперечного сечения поврежденного коррозией изгибаемого железобетонного элемента: здесь  $F_{z^*}$  – величина полностью утраченной части силового сопротивления, обусловленная выбитием зоны А (рис. 3);  $F_1$  – величина утерянного силового сопротивления, обусловленная коррозионными повреждениями в зоне В (рис. 3);  $F_2$  – величина сохранившейся части силового сопротивления в зоне В (рис.3), очерченной кривой  $K^*$  – при-

менением посылки об эквивалентности [1]:  $F_2 = \int_p^{p+\delta} K^*(z) b R_b dz = \frac{2}{3} \delta b R_b$ ,  $F_n$  - величина силового сопротивления неповрежденной зоны  $B$  (рис.3):  $F_n = b p R_b$  (19);  $F_s$  величина усилия в растянутой арматуре:  $F_s = \omega_s A_{s0} R_s$ .

Из условий равновесия высота сжатой зоны  $x^*$  и значение остаточного ресурса по моменту  $M_{kp}^*$  относительно центра тяжести растянутой арматуры:

$$x^* = x_1 + z^* + \frac{1}{3} \delta; \quad x_1 = \frac{\omega_s R_s A_{s0}}{b R_b}, \quad (20)$$

$$M_{kp}^* = F_2 \left[ h_0 - \left( z^* + \frac{5}{8} \delta \right) \right] + F_n \left[ h_0 - \frac{1}{2} (x^* + z^* + \delta) \right] \quad (21)$$

( $\omega_s$  - коэффициент коррозионного повреждения арматуры).

Однако, как показано ниже, удовлетворение известного условия

$$M_0 \leq M_{kp}^*, \quad (22)$$

где  $M_0$  - величина изгибающего момента в сечении от внешней нагрузки, не исчерпывает вопроса о конструктивной безопасности элемента.

Действительно, исследуем эпюру нормальных напряжений в сжатой зоне рассматриваемого элемента в эксплуатационном состоянии, привлекая

а) уравнение связи  $\varepsilon, \sigma, t$  (18); б) гипотезу плоских сечений

$$\varepsilon = \frac{z}{\rho}, \quad \text{где } \rho = \left[ \frac{M_0}{D^*} \right]^{-1} \quad (23)$$

( $D^*$  - изгибная жесткость поврежденного элемента [7]),

в) упрощая дальнейшие решения аналогично современным нормативным документам, о среднем  $\bar{S}^0$  принимаем  $\bar{S}_{cp}^0$ .

Получим 
$$\sigma(z, t, t_0) = \frac{M_0(t) E_{сп.л}(t, t_0)}{S_{cp}^0 D^*(t, t_0)} F_0(z), \quad (24)$$

где 
$$F_0(z) = K^*(z) z = \frac{1}{\delta^2} \left[ (\delta^2 - p^2) z + 2 p z^2 - z^3 \right], \quad (25)$$

которая при  $z = p$  будет  $F_0 = p$ , при  $z = p + \delta$  будет  $F_0 = 0$ .

Очевидно, что  $\sigma$  и  $F_0$  при данных  $M_0, D^*$  и  $\bar{S}^0$  будут иметь одинаковую ординату  $\max$  значений  $z$ , при:

$$\frac{dF_0(z)}{dz} = \frac{1}{\delta^2} \left[ (\delta^2 - p^2) + 4 p z - 3 z^2 \right] = 0 \quad \text{и} \quad z_1 = \frac{2 p \pm \sqrt{3 \delta^2 + p^2}}{3}. \quad (26)$$

Например, при  $p = 0$

$$z_1 = 0,557 \delta; \quad \max F_0(z_1) = 0,385 \delta; \quad \max \sigma(z_1) = 0,385 M_0 \frac{E_{сп.л}(t, t_0) \delta}{S_{cp}^0 D^*(t, t_0)}$$

(в этом исследовании приемлемо усреднять:  $\bar{S}^0$  - табл.2).

Соответственно, эпюра нормальных напряжений в поперечном сечении имеет вид по рис.5 [8, 9].

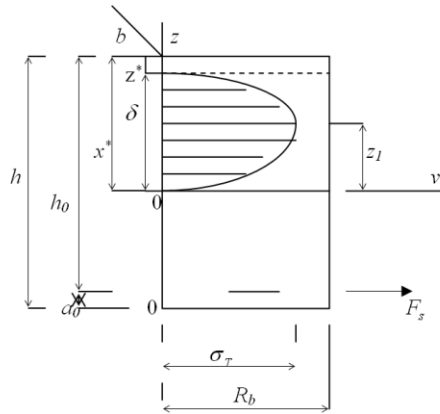


Рис. 5. Эпюра нормальных напряжений в сжатой зоне поврежденного коррозией железобетонного элемента при  $\sigma_{\max} \leq \sigma_T = R_{\text{дл}}$ .

Отсюда следует, что появление первой точки «невозврата», для которой характерно равенство  $\sigma = \sigma_T (\approx R_{\text{дл}})$  и начало лавинной потери силового сопротивления, соответствует величинам

$$\sigma_T = \frac{M_T E_{\text{ср.л}}(t, t_0)}{\bar{S}^0 D^*(t, t_0)} F_0(z_1); \quad M_T = \frac{R_{\text{дл}} \bar{S}^0(\eta_T) D^*(t, t_0)}{E_{\text{ср.л}}(t, t_0) F_0(z_1)} \quad (27)$$

для  $p = 0$

$$\sigma_T = 0,385 \frac{M_T \delta E_{\text{ср.л}}(t, t_0)}{\bar{S}^0 D^*(t, t_0)}; \quad M_T = \frac{2,6 R_{\text{дл}} \bar{S}^0(\eta_T) D^*(t, t_0)}{\delta E_{\text{ср.л}}(t, t_0)}. \quad (28)$$

Поскольку  $M_T \leq M_{\text{кр}}^*$ , постольку очевидно, что условие (22) не исчерпывает вопроса о конструктивной безопасности. Необходима проверка по дополнительному условию:

$$M_0 \leq M_T, \quad (29)$$

уточнение  $M_T$  возможно с помощью замены в (27) и (28)  $\bar{S}_{\text{ср}}^0$  на  $\bar{S}^0(\eta_T)$ .

В целом, в области устойчивого силового сопротивления ( $m > 0$ ) совокупность условий (18) и (29) позволяет решением относительно  $t$  уравнений (6), (29) вычислить допустимую продолжительность воздействия агрессивной среды - т.н. «экспозицию живучести» ( $t_{\text{ж}} - t$ ), а в области неустойчивого силового сопротивления такая экспозиция живучести устанавливается наибольшей допустимой скоростью продвижения повреждений из (3) решением уравнения  $d\delta(t)/dt \leq \dots$  относительно  $t$ .

Далее, переходя к анализу рассеивания энергии при силовом деформировании бетона, рассмотрим диаграмму  $\sigma - \varepsilon$  при нагружении «сжатием» - разгрузении, привлекая соотношения (10-12), (14-15) – рис.6.

Площадь петли гистерезиса, вычисленная с учетом влияния повреждений, находится по [10]:

$$\Delta W(z) = \vec{W}(z) - \overleftarrow{W}(z), \quad \text{где } \vec{W}(z) = \int_{\sigma_{\min}(z)}^{\sigma_{\max}(z)} \sigma d\varepsilon; \quad \overleftarrow{W}(z) = \int_{\sigma_{\min}(z)}^{\sigma_{\max}(z)} \sigma d\varepsilon_{\text{л}}, \quad (30)$$

$$\vec{W}(z, t, t_0) = \frac{\sigma_{\max}^2(z) - \sigma_{\min}^2(z)}{2E_{\text{ср.л}}(t, t_0)} + \frac{\bar{V}}{R_b^m} \left(1 - \frac{1}{2+m}\right) \frac{\sigma_{\max}^{2+m}(z) - \sigma_{\min}^{2+m}(z)}{K^*(z) E_{\text{ср.л}}(t, t_0)}, \quad (31)$$

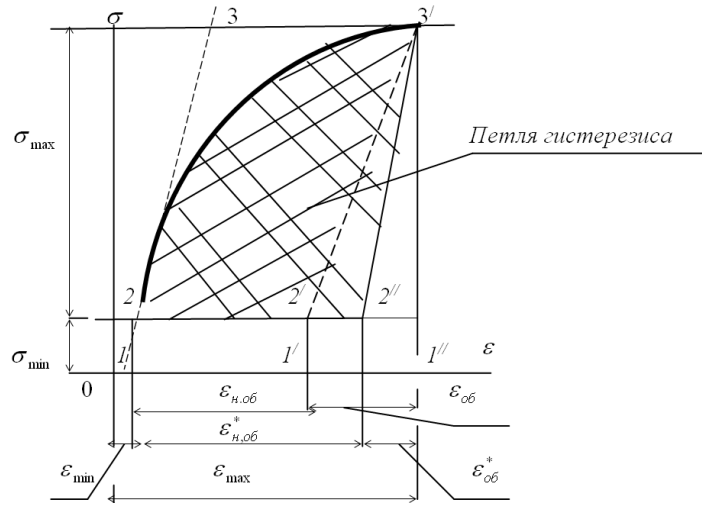


Рис.6. Диаграмма  $\sigma - \varepsilon$  при нагружении-разгрузении бетонного образца.

$$\overleftarrow{W}(z, t, t_0) = K^*(z) \frac{[\sigma_{\max}^2(z) - \sigma_{\min}^2(z)]}{2E_{\text{сп.л}}(t, t_0)}, \quad (32)$$

т.е.

$$\begin{aligned} \Delta W^*(z, t, t_0) = \\ = \left[ 1 - K^*(z) \frac{[\sigma_{\max}^2(z) - \sigma_{\min}^2(z)]}{2E_{\text{сп.л}}(t, t_0)} + \frac{\bar{V}}{R_b^m} \left(1 - \frac{1}{2+m}\right) \frac{[\sigma_{\max}^{2+m}(z) - \sigma_{\min}^{2+m}(z)]}{K^*(z)E_{\text{сп.л}}(t, t_0)} \right], \end{aligned} \quad (33)$$

а при отсутствии повреждений  $K^*(z) = 1$

$$\Delta W_0(z, t, t_0) = \frac{\bar{V}}{R_b^m} \left(1 - \frac{1}{2+m}\right) \frac{[\sigma_{\max}^{2+m}(z) - \sigma_{\min}^{2+m}(z)]}{E_{\text{сп.л}}(t, t_0)} < \Delta W^*. \quad (34)$$

Таким образом,  $\Delta W^*$  - площадь петли гистерезиса, как мера рассеяния энергии в единице объема бетонного тела ординаты  $z$  при однократном цикле нагружение-разгружение, растет с увеличением повреждений. Абсолютная величина  $\Delta W^*$ , являясь источником информации о энергетическом факторе силового сопротивления, не заменяет относительных индикаторов диссипации энергии при деформировании материалов- коэффициентов поглощения энергии.

Общее количество энергии деформирования, рассеиваемого за один цикл нагружения-разгружения вычисляется подстановкой в (33) функции повреждений  $K^*(z)$  (10) и напряжений (24) с последующим интегрированием по объему элемента.

В литературе используются два одноименных показателя поглощения энергии:

$$0 < \Psi^* = \frac{\Delta W^*}{\overrightarrow{W}} < 1, \quad (35)$$

соотносящееся к работе, затрачиваемой на деформирование материала, и

$$0 < \Psi_c = \frac{\Delta W^*}{\overleftarrow{W}}, \quad (36)$$

соотносящееся к работе, затрачиваемой на восстановление (частичное) этих деформаций.

Между  $\Psi^*$  и  $\Psi_c$  существует связь:



$$\Psi^* = \frac{1}{1/\Psi_c + 1}; \quad \Psi_c = \frac{1}{1/\Psi^* - 1}. \quad (37)$$

Отметим, что  $\Psi^*$  необходим для энергетической оптимизации сооружений [12], а  $\Psi_c$  - позволяет построить прикладную линейную теорию колебаний [13] (в частности, рассчитать коэффициент неупругого сопротивления):

$$\gamma^* = \overline{\Psi_c} / (2\pi), \quad (38)$$

где  $\overline{\Psi_c}$  – некий средний  $\Psi_c$  который, например, для системы с одной степенью свободы массой  $m$ , коэффициентом жесткости  $C$  позволяет вычислить частоты  $p$  и декремент затухания  $\beta$  собственных колебаний

$$p = \frac{p_0}{\sqrt{1 + (\gamma/2)^2}}, \quad \beta = \frac{\gamma}{2} p, \quad (39)$$

где  $p_0$  – собственная частота для идеального случая, а при вынужденных колебаниях с амплитудой гармонической возмущающей силой  $Q_0$  и частотой  $\omega$  - амплитуды вынужденных колебаний:

$$A = \frac{Q_0}{mp^2 \sqrt{1 - (\omega/p)^2 + (\gamma/2)^2 + \gamma^2}}. \quad (40)$$

Как и следовало ожидать, из (38)-(39) вытекает, что коррозионные повреждения, увеличивая рассеивание энергии силового деформирования, снижают частоту собственных колебаний  $p$ , увеличивают затухание  $\beta$  (39) и уменьшают амплитуду вынужденных колебаний  $A$  (40).

Таким образом, показана связь между такими факторами диссипации силового сопротивления как коррозионные повреждения и гистерезисным рассеиванием энергии и предложены методы учета влияния указанной диссипации при решении таких статических и динамических задач теории сооружений, как оценки конструктивной безопасности и эксплуатационной пригодности с учетом коррозионной и энергетической диссипации силового сопротивления, выявления условий наступления лавинной стадии развития повреждений и деформаций конструкции, расчета продолжительности перехода от второго к первому предельному состоянию и экспозиции живучести сооружений.

#### Л и т е р а т у р а

1. Бондаренко В.М. Феноменология кинетики повреждений бетона железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивной среде// Бетон и железобетон. – 2008. – №2.
2. Бондаренко В.М., Карпенко Н.И. Уровень напряженного состояния как фактор структурных изменений и реологического силового сопротивления бетона// «Академия. Архитектура и строительство», Москва. – 2007. – №4.
3. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. – Гос. изд-во технико-теоретической литературы, Москва – Ленинград, 1952.
4. Комохов П.П., Латыпов В.И., Латыпова М.В. Долговечность бетона и железобетона. – Изд-во «Белая река», Уфа, 1998.
5. Бондаренко С.В., Санжаровский Р.С. Усиление железобетонных конструкций при реконструкции зданий. – Стройиздат, Москва, 1990.
6. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ Госстроя СССР, Стройиздат, Москва, 1985.
7. Бондаренко В.М., Ягунов Б.А., Степанова В.Ф. К вопросу об усилении железобетонных конструкций// Бетон и железобетон. – 2008. – №4.
8. Бондаренко В.М. Специфика силового сопротивления поврежденных коррозией железобетонных конструкций и новые факторы разрушения// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2009. – №4.

9. *Бондаренко В.М.* Коррозионные повреждения как причина лавинного разрушения железобетонных конструкций// Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – №4.

10. *Бондаренко В.М.* О влиянии коррозионных повреждений на диссипацию энергии при силовом деформировании бетона// Бетон и железобетон. – 2009. – № 6.

11. *Бондаренко В.М.* Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. - Изд-во Харьковского государственного университета, Харьков, 1968.

12. *Бондаренко В.М.* О назначении оптимальных поперечных сечений колеблющихся конструкций// Вестник Академии строительства и архитектуры УССР, Киев, 1959, №4.

13. *Сорокин Е.С.* Динамические характеристики строительных материалов и конструкций: Справочник по динамике сооружений. – М.: Стройиздат, 1972.

### **SOME GENERAL PROBLEMS OF DEVELOPMENT OF REINFORCED CONCRETE THEORY**

Bondarenko V. M.

In the interests of exploitation safety, the stages of corrosion and energetic dissipation of specific reological processes of force resistance of concrete and reinforced concrete structures under static and dynamic loads are investigated and estimated.

**KEY WORDS:** corrosion, energy dissipation, reinforced concrete structures.

