

## Расчет строительных конструкций

### МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ АРМАТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ А.Р. РЖАНИЦЫНА

И.И. ОВЧИННИКОВ, канд. техн. наук, доцент  
Саратовский государственный технический университет

Коррозионное растрескивание является весьма опасным видом разрушения предварительно напряженных армированных элементов конструкций, причем особую чувствительность к коррозионному растрескиванию проявляет арматура из сталей повышенной и высокой прочности [1]. Этот вид разрушения во многих случаях приносит значительный материальный ущерб и может быть причиной серьезных аварий.

Опасность коррозионного растрескивания заключается в локализации процесса хрупкого разрушения, происходящего без каких-либо заметных внешних признаков поверхностного повреждения. Коррозионное растрескивание возникает при совместном действии растягивающих напряжений и агрессивной среды. Феноменологически процесс коррозионного растрескивания арматуры эквивалентен статической усталости, для описания которой может использоваться та или иная теория длительной прочности, опирающаяся на использование моделей накопления повреждений [2]. Ранее для описания кинетики коррозионного растрескивания трубопроводных конструкций были применены модели накопления дисперсных повреждений [3].

В данной работе рассмотрим применение аппарата теории длительной прочности А.Р. Ржаницына для моделирования кинетики коррозионного растрескивания предварительно напряженной арматуры. Коррозионное растрескивание будем трактовать как постепенное снижение предельного сопротивления материала, вызванное влиянием коррозионной среды и напряженного состояния. По аналогии с [4] для описания кинетики коррозионного растрескивания введем параметр мгновенной прочности  $r$ , изменяющийся во времени и равный напряжению, при котором происходит разрушение арматуры в данный момент времени. В начальный момент времени  $r = r_0 = \sigma_{np}^0$ , а в момент разрушения  $r(t_p) = \sigma$ . В промежуточных состояниях мгновенная прочность уменьшается по закону

$$r' = -F(r, \sigma, a), \quad (1)$$

где  $a$  – вектор параметров, отражающих влияние агрессивной среды и других факторов на кинетику коррозионного растрескивания. Вместо точной функции  $F(r, \sigma)$  для приближенного решения задачи достаточно задаться каким-либо упрощенным ее выражением, правильно отражающим качественные свойства этой функции. Например, уравнению (1) можно придать следующий вид [4]:

$$r' = -A \cdot \sigma^n \cdot e^{-\beta \cdot (r - \sigma)}. \quad (2)$$

В этом уравнении переменные разделяются, и его интеграл получается в замкнутом виде

$$\frac{e^{\beta r}}{\beta} = -A \int_0^t \sigma^n e^{\beta \sigma} dt + \frac{e^{\beta r_0}}{\beta}.$$

Для того чтобы отсюда найти время разрушения, следует положить:

$$r(t_p) = \sigma(t_p),$$

что дает:

$$\frac{e^{\beta \cdot \sigma(t_p)} - e^{\beta \cdot r_0}}{\beta} = -A \int_0^{t_p} \sigma^n(t) \cdot e^{\beta \cdot \sigma(t)} dt. \quad (3)$$

В частном случае при  $\sigma = \text{const}$  получим:

$$t_p = \frac{(e^{\beta \cdot r_0} - e^{\beta \cdot r})}{\beta \cdot A \cdot \sigma^n \cdot e^{\beta \cdot \sigma}} \quad (4)$$

Недостатком уравнения (2) является то, что получаемая из него кривая длительного сопротивления (4) асимптотически приближается к линии  $\sigma = 0$ , а не к  $\sigma = \sigma_{\text{дл}}$ , аналогу предела длительной прочности.

Закон изменения  $r$  может быть принят в виде:

$$\frac{dr}{dt} = -A \cdot e^{m\sigma} (r_0 - r)^\alpha (r_0 - \sigma)^{1-\alpha}; \quad r(t=0) = r_0. \quad (5)$$

Так как кривая коррозионного растрескивания получена при постоянном напряжении, то, интегрируя (5) при  $\sigma = \text{const}$  и учитывая начальное условие, найдем:

$$r(\sigma, t) = r_0 - (r_0 - \sigma) [A(1 - \alpha) e^{m\sigma} t]^{1/(1-\alpha)}. \quad (6)$$

Подставив условие разрушения  $r(t_p) = \sigma(t_p)$  в это выражение, получим формулу, связывающую уровень действующего напряжения с временем до разрушения:

$$t_p = B \cdot e^{-m\sigma}, \quad (7)$$

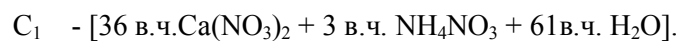
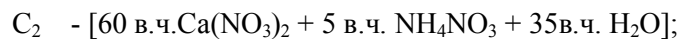
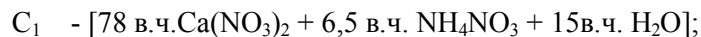
где

$$B = \frac{1}{A(1 - \alpha)}, \quad (8)$$

$A$ ,  $\alpha$ ,  $m$  – коэффициенты, определяемые по экспериментальным данным.

Используя зависимость (7) по известным коэффициентам  $B$  и  $m$  можно определить долговечность арматуры при заданном напряжении. Однако применимость зависимости (7) ограничена требованием постоянства уровня напряжений, поэтому для решения задачи прогнозирования долговечности арматуры при меняющихся напряжениях необходимо применять уравнение (5), в котором для определения значения коэффициента  $\alpha$  следует использовать результаты эксперимента по коррозионному растрескиванию при какой-либо программе изменения напряжения.

Для идентификации уравнения кривой коррозионного растрескивания и нахождения значений коэффициентов  $B$  и  $m$  используем экспериментальные данные из [1], полученные в результате испытаний на коррозионное растрескивание арматурной стали 18ГС. Испытания проводились при четырех уровнях начальных напряжений для трех уровней температуры в растворе нитратов кальция и аммония трех разных концентраций:



В декартовой системе координат экспериментальные кривые «напряжение  $\sigma$  – время до разрушения  $t_p$ » для разных температур и концентраций среды имеют вид, показанный на рис. 1.

Для нахождения коэффициентов  $B$  и  $m$  может быть использовано условие минимума функционала:

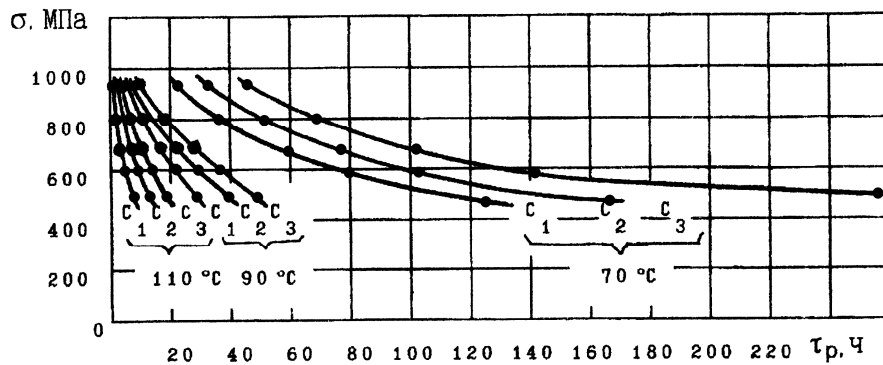


Рис. 1. Экспериментальные кривые коррозионного растрескивания стали 18ГС в растворах нитратов разной концентрации и температуры:  $C_1$  – концентрация среды 84,5%;  $C_2$  – концентрация среды 65%;  $C_3$  – концентрация среды 39%

$$J(B, m) = \sum_{j=1}^N [(\ln t_{pj} - \ln B + m\sigma_j)]^2 \quad (9)$$

где  $N$  – количество экспериментальных точек на кривой коррозионного растрескивания. Результаты обработки экспериментальных данных для разных температур и концентраций агрессивной среды приведены на рис. 2 и 3.

Зависимость параметра  $B$  от температуры среды  $T$  и концентрации агрессивной среды  $C$  можно описать зависимостью:

$$B(T, C) = \exp(14,2 - 0,08T - 1,8C), \quad (10)$$

где  $T$  измеряется в градусах, а  $C$  в долях единицы.

Зависимость параметра  $m$  от температуры среды  $T$  и концентрации агрессивной среды  $C$  описывается зависимостью:

$$m(T, C) = 0,54 - 0,00012T. \quad (11)$$

Из этой зависимости видно, что коэффициент  $m$  не зависит от концентрации агрессивной среды.

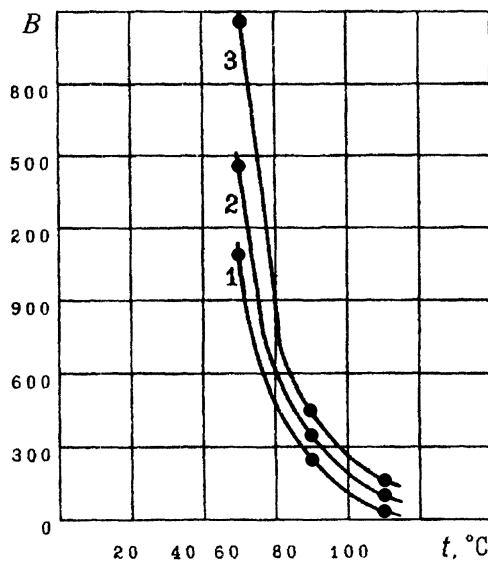


Рис. 2. Зависимость параметра  $B$  от температуры и концентрации агрессивной среды

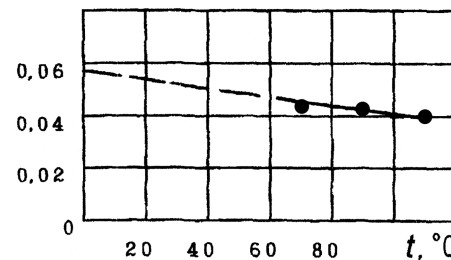


Рис. 3. Зависимость параметра  $m$  от температуры

Для построения уравнений, описывающих кинетику изменения мгновенной прочности арматуры по информации о кривой коррозионного растрескивания, полученной из эксперимента можно воспользуемся подходом В.А. Федорова [5]. В уравнении (1), которое описывает процесс коррозионного растрескивания, вид функции  $F(\sigma, r)$  выбирается из общих физических соображений. Можно также принимать за основу конкретную механическую модель материала

ла, а функцию изменения мгновенной прочности строить сообразно этой модели. Этим методам построения функции изменения мгновенной прочности присуще следующее достоинство: полученные по ним теоретические кривые коррозионного растрескивания будут совпадать с экспериментальной кривой коррозионного растрескивания. Однако при нестационарном нагружении не всегда может быть хорошее совпадение результатов с экспериментальной кривой коррозионного растрескивания.

Теория длительной прочности А.Р. Ржаницына опирается на физически понятный факт о том, что в момент, предшествующий разрушению арматурного стержня, его прочность равна приложенному напряжению. Далее она оперирует величинами, которые могут быть непосредственно измерены в макроопыте.

Для построения уравнения, описывающего кинетику коррозионного растрескивания через изменение мгновенной прочности отметим, что мгновенная прочность материала  $r$  под действием приложенного напряжения  $\sigma$  уменьшается с течением времени. Поэтому кинетическое уравнение изменения мгновенной прочности имеет вид:

$$\frac{dr}{dt} = -F(\sigma, r), \quad (12)$$

$$\text{Условие прочности:} \quad r > \sigma. \quad (13)$$

$$\text{Условие разрушения:} \quad r = \sigma. \quad (14)$$

Функция  $F(\sigma, r)$  в данном случае является характеристикой прочностных и коррозионных свойств материала, поэтому для разных материалов вид ее может быть различен.

Рассмотрим такой метод построения этой функции, который обеспечивает совпадение теоретической и экспериментальной кривых коррозионного растрескивания. Предположим, что экспериментальная зависимость времени до разрушения от величины действующего напряжения (кривая коррозионного растрескивания) известна:

$$t_* = t_*(\sigma). \quad (15)$$

Проинтегрируем зависимость (12) от исходного состояния до момента разрушения при  $\sigma = \text{const}$ :

$$-\int_{r_0}^{\sigma} \frac{dr}{F(\sigma, r)} = t_T(\sigma). \quad (16)$$

Здесь  $t_T(\sigma)$  – теоретическое значение времени до разрушения. Потребуем выполнения равенства  $t_T(\sigma) = t_*(\sigma)$ , тогда из зависимости (16) получим

$$\varphi(\sigma, r) \Big|_{r=r_0}^{r=\sigma} = t_*(\sigma), \quad (17)$$

где  $\varphi(\sigma, r)$  – первообразная по  $r$  функции  $-1/F(\sigma, r)$ . В дальнейшем функцию  $\varphi(\sigma, r)$  будем называть вспомогательной.

Таким образом, класс функций изменения мгновенной прочности, выражающихся через вспомогательную функцию посредством формулы

$$-F(\sigma, r) = \left[ \frac{\partial}{\partial r} \varphi(\sigma, r) \right]^{-1}, \quad (18)$$

определяется условием (17). Кроме того,  $\partial \varphi(\sigma, r) / \partial r$  отлична от 0.

Отметим, что условию (17) удовлетворяет бесконечное множество функций. При выборе вспомогательной функции можно с достаточной для практики общностью ограничиться следующим ее частным видом:

$$\varphi(\sigma, r) = f_1(\sigma, r) \cdot t_* [\sigma \cdot f_2(\sigma, r)] + f_3(\sigma, r), \quad (19)$$

где функции  $f_i(\sigma, r)$  подчиняются условиям, вытекающим из равенства (14):

$$\begin{aligned} f_1(\sigma, \sigma) - f_1(\sigma, r_0) &= 1; \\ f_2(\sigma, \sigma) &= f_2(\sigma, r_0) = 1; \\ f_3(\sigma, \sigma) &= f_3(\sigma, r_0). \end{aligned} \quad (20)$$

При дальнейшей конкретизации функции  $F(\sigma, r)$  необходимо учесть общие физические соображения о качественном поведении микроповреждаемости материала арматуры, вызванной коррозионным растрескиванием. Обычно имеют место такие предположения, что упрочнения не происходит ( $F > 0$ ), а при уменьшении мгновенной прочности скорость коррозионного растрескивания уменьшается  $\partial F / \partial r < 0$ . Тогда:

$$\partial \varphi(\sigma, r) / \partial r < 0; \quad \partial^2 \varphi(\sigma, r) / \partial r^2 < 0. \quad (21)$$

Выбрав вспомогательную функцию в виде, удовлетворяющем условиям (17), (21), можно определить имеющиеся в ней свободные параметры, используя результаты экспериментов по коррозионному растрескиванию при нестационарном нагружении.

Следует заметить, что изложенный способ конкретизации функции  $F(\sigma, r)$  особенно удобен при изучении коррозионного растрескивания материала в случае ступенчатой программы нагружения. В этой ситуации нет трудностей при интегрировании уравнения (12). На участке постоянного напряжения  $\sigma = \sigma_k$

$$\int_{r_k}^{r_{k+1}} \frac{dr}{F(\sigma_k, r)} = -\varphi(\sigma_k, r) \Big|_{r=r_k}^{r=r_{k+1}}, \quad (22)$$

где  $\varphi(\sigma, r)$  – известная функция.

#### Л и т е р а т у р а

1. Извольский В.В. Коррозионное растрескивание и водородное охрупчивание арматурных сталей железобетона повышенной и высокой прочности / В.В. Извольский, Н.Н. Сергеев. Тула. Изд-во ТГУ. 2001. – 164 с.
2. Овчинников И.И. Моделирование коррозионного растрескивания арматуры при оценке долговечности предварительно напряженных армированных конструкций / И.И. Овчинников // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред. Межвуз. науч. сб. 2004. Саратов. СГТУ. – С. 50-56.
3. Кабанин В.В. Моделирование коррозионного растрескивания оболочечных конструкций / В.В. Кабанин, В.С. Мавзовин, И.И. Овчинников, С.Н. Мавзовина. Саратов. Изд-во СГУ. 2006. – 124 с.
4. Ржаницын А.Р. Теория длительной прочности при произвольном одноосном и двухосном нагружении / А.Р. Ржаницын // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1975. – № 4. – С. 25-29.
5. Федоров В.А. Феноменологическое построение уравнения повреждаемости в теории длительной прочности / В.А. Федоров // Динамика и прочность машин: Межвуз. сб. – Вып.31. – Харьков: Вища школа, 1980. – С. 101-106.

### MODELLING OF STRESS-CORROSION CRACKING OF PRESTRESSED REINFORCEMENT WITH THE APPLICATION OF THE A.R. RZHANITSYN THEORY OF LONG DURABILITY

Ovchinnikov I.I.

In the article, modeling stress-corrosion cracking of prestressed reinforcement with the application of the A.R. Rzhanitsyna theory of long durability is presented.