Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian journal of transport engineering <http://t-s.today/>

2017, Том 4, №3 / 2017, Vol 4, No 3 <http://t-s.today/issues/vol4-no3.html>

URL статьи: <http://t-s.today/PDF/03TS317.pdf>

DOI: 10.15862/03TS317 (<http://dx.doi.org/10.15862/03TS317>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Еллала Фаузи бен Абделаиз Оценка долговечности защитных покрытий на металлических мостовых конструкциях // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №3 (2017) <http://t-s.today/PDF/03TS317.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/03TS317

For citation:

Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Ellala Faouzi ben Abdullaziz [Evaluation of durability of protective coatings on metal bridge structures] Russian journal of transport engineering, 2017, Vol. 4, no. 3. Available at: <http://t-s.today/PDF/03TS317.pdf> (In Russ.) DOI: 10.15862/03TS317

УДК 624.042

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь
ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»
Филиал в г. Сочи, Россия, Сочи
Доктор технических наук, профессор
E-mail: bridgesar@mail.ru

Овчинников Илья Игоревич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов¹
ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»
Филиал в г. Сочи, Россия, Сочи
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: bridgeart@mail.ru

Еллала Фаузи бен Абделаиз

Институт инженеров города Габес, Тунис
Профессор кафедры «Мосты»
Doctor of Philosophy
E-mail: Faouzi.Ellala@enig.rnu.tn

Оценка долговечности защитных покрытий на металлических мостовых конструкциях

Аннотация. Рассматривается проблема прогнозирования долговечности защитных покрытий на мостовых металлоконструкциях. Предложено две группы моделей потери работоспособности покрытий: вследствие нарушения сплошности покрытия и вследствие достижения напряжениями в покрытии предельных значений. Приведены основные соотношения моделей, проведена их идентификация.

Ключевые слова: мостовые металлоконструкции; коррозионный износ; антикоррозионная защита; долговечность; модели износа; защитные покрытия

¹ 410054, Саратов, Политехническая 77

Для обеспечения сохранности и долговечности мостовых металлоконструкций их обычно покрывают защитными антикоррозионными покрытиями того или иного вида, полагая, что под защитными покрытиями коррозионные процессы не происходят [1-10]. Однако это не так. Например, в статье [11] приведены экспериментальные данные по зависимости глубины разъедания образцов (δ , 10^{-3} мм) от продолжительности коррозионного процесса при разных температурах (см. табл. 1).

Таблица 1

Глубина разъедания образцов в зависимости от продолжительности коррозионного процесса и температуры [11]

Время, часы	Температура, °C				
	20	30	40	50	60
120	4,754	5,889	14,192	24,127	43,057
240	17,740	24,150	45,415	74,509	144,417
360	39,029	51,092	95,798	155,407	293,377
480	65,284	78,767	155,295	245,528	485,087
600	98,637	119,925	242,689	369,359	716,502
720	145,902	164,620	309,889	507,994	985,432

Эксперименты проводились с образцами из стали 17Г1С-У с размерами 50×100×0,3 мм. Коррозионная среда – 3,5 %-ный раствор $NaCl$. В реальных условиях концентрация $NaCl$ колеблется в пределах 0,05-0,07 %. Среднестатистическая толщина антикоррозионного слоя $25 \cdot 10^{-3}$ мм. Авторы статьи, основываясь на результатах экспериментов, отвергают до сих пор бытовавшее мнение, что под слоем антикоррозионной защиты коррозионные процессы полностью отсутствуют. Эти процессы происходят с возрастающей во времени скоростью. По всей видимости, это вызвано повышением проницаемости антикоррозионного материала для ионов-окислителей из-за деструкции защитного материала во время его взаимодействия с коррозионной средой. Интенсивность коррозионных процессов может быть уменьшена путем увеличения толщины антикоррозионной защиты.

Как известно, нормами проектирования предусмотрено обязательное выполнение антикоррозионной защиты металлоконструкций в зависимости от степени агрессивности эксплуатационной среды. Поэтому при расчете напряженно-деформированного состояния и долговечности металлоконструкций с защитными покрытиями необходимо учитывать и срок службы защитных покрытий, то есть моделировать кинетику изменения коррозионной стойкости защитных покрытий.

В таблице 2 приведены некоторые модели, используемые для описания экспериментальных данных по коррозионной стойкости защитных покрытий металлоконструкций.

Таблица 2

Модели, описывающие поведение защитных покрытий металлоконструкций (составлена авторами)

Вид модели
$\Delta = a_1(1 - \exp(-a_2 t))$, (Г/М ²)
$\tau_F = \frac{\delta_0}{V} (1 + U_F (W \sigma V))$, (Г)
$M = a + Kt$, $K = K_0 e^{-\frac{a}{t}}$, (Г/ММ ²)

<i>Вид модели</i>
$y = 2,75 + 0,75x_1 + 0,25x_2 + 0,25x_3 -$ $- 0,5x_2x_3 - 0,25x_1x_3 - 0,25x_1x_2x_3$
$\delta = at^2, \text{ (мм)}$
$\Delta_k = bl(C^2 + \sqrt{C^2 + 1} + m\Delta_0), \text{ (мм)}$
$\Delta_k = D\frac{t^2}{n^3}, \text{ (мм)}$

Для оценки долговечности защитных покрытий можно использовать различные подходы. Анализ экспериментальных данных и исследований по работе защитных покрытий показывает, что потеря работоспособности покрытия может произойти вследствие нарушения сплошности покрытия, вследствие достижения напряжениями в покрытии предельных значений, или же вследствие потери адгезии между защитным покрытием и поверхностью защищаемой конструкции.

Рассмотрим задачу построения и анализа моделей снижения защитных свойств покрытий для некоторых механизмов потери работоспособности защитного покрытия.

Модели снижения защитных свойств покрытия путем нарушения их сплошности

В этом случае для описания сплошности защитного покрытия введем специальный параметр сплошности Ψ , изменяющийся от 1 в начальном состоянии до некоторого предельного значения Ψ_p в конечном состоянии. Этот параметр сплошности относится к точке поверхности защитного покрытия и характеризует сплошность покрытия в данной точке по всей ее толщине.

Кинетические зависимости, описывающие изменение сплошности защитных покрытий, могут быть приняты в следующем виде.

Зависимость 1:

$$\frac{d\Psi}{dt} = -\alpha(1 + k\sigma^m), \quad \Psi(0) = 1. \quad (1)$$

Здесь: α – коэффициент, учитывающий влияние вида и толщины защитного покрытия и характер агрессивной среды; k , m – коэффициенты, учитывающие влияние уровня напряженного состояния на кинетику снижения защитных свойств покрытия; σ – эквивалентное напряжение.

При постоянном напряжении интеграл уравнения будет:

$$\Psi = 1 - \alpha(1 + k\sigma^m)t. \quad (2)$$

Зависимость 2:

$$\frac{d\Psi}{dt} = -\alpha(1 + k\sigma^m)t^b, \quad \Psi(0) = 1. \quad (3)$$

При постоянном напряжении интеграл уравнения будет:

$$\Psi = 1 - \frac{\alpha(1 + k\sigma^m)t^{b+1}}{b+1}, \quad (4)$$

где α , b , k , m – коэффициенты.

Зависимость 3:

$$\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\alpha(1+k\sigma^m)t^{b-1}}{\left(1+\frac{\alpha t^b}{b}\right)^2}, \quad \Psi(0) = 1. \quad (5)$$

При постоянном напряжении интеграл уравнения будет:

$$\Psi = \frac{1}{1 + \alpha(1+k\sigma^m)\frac{t^b}{b}}. \quad (6)$$

В работе [13] приведены некоторые экспериментальные данные по снижению защитной способности ряда защитных покрытий при испытании в различных агрессивных средах. При этом в качестве параметра, характеризующего снижение защитных свойств покрытия, принимался обобщенный показатель качества защитного покрытия (K_z). Исследования защитных свойств покрытий проводились в соответствии с ГОСТ 9.042-75 и ГОСТ 9.074-77, в процессе испытаний учитывалось образование пузырей, растрескивание покрытий, отслаивание, наличие коррозионных пятен, размеры повреждения. Оценка защитных свойств покрытий проводилась по методике М. И. Карякиной [13], согласно которой обобщенный показатель качества K_z определяется по формуле:

$$K_z = 0,1a_n + 0,1a_p + 0,3a_k + 0,3a_{pn} + 0,1a_{om}, \quad (7)$$

где: a_n , a_p , a_k , a_{pn} – относительные оценки степени разрушения в результате пузырей, растрескивания, коррозии, отслаивания, a_{om} – относительная оценка размера повреждения. Полученные в эксперименте значения обобщенного показателя качества защитного покрытия K_z в разные моменты времени для разных покрытий и сред приведены ниже в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Изменение обобщенного показателя K_z защитного покрытия с течением времени при испытаниях в промышленной атмосфере [13]

Время, сутки	ХС-068	ГФ-0119	Сурик	Сурик + БТ-577	Сост. 1	Сост. 1 + БТ-577
12	0,481	0,531	0,823	0,820	0,887	0,884
34	0,206	0,226	0,378	0,732	0,536	0,809
66	0,178	0,125	0,251	0,653	0,471	0,749

Таблица 4

Изменение обобщенного показателя K_z защитного покрытия с течением времени при испытаниях в растворе NaCl [13]

Время, сутки	ФЛ-03К	ФЛ-03К + 2 % сост. 2	ФЛ-03К + 5 % сост. 2	ГФ-0119	ГФ-0119 + 2 % сост. 2	ГФ-0119 + 5 % сост. 2	БТ-577	БТ-577 + 2 % сост. 2	БТ-577 + 5 % сост. 2
16	0,877	0,981	0,981	0,917	0,967	0,967	0,901	0,703	0,730
24	0,871	0,935	0,881	0,917	0,796	0,967	0,841	0,523	0,712
40	0,691	0,857	0,745	0,851	0,785	0,691	0,512	0,505	0,671
60	0,659	0,857	0,655	0,785	0,701	0,581	0,391	0,401	0,671
76	0,647	0,851	0,631	0,555	0,669	0,581	0,259	0,236	0,585

Таблица 5

Значения коэффициентов зависимостей 1, 2 и 3 снижения защитных свойств для первой группы покрытий (составлена авторами)

Покрытие	Зависимость 1		Зависимость 2			Зависимость 3		
	$\alpha, 10^{-3}$	k	$\alpha, 10^{-2}$	b	k	$\alpha, 10^{-2}$	b	K
ХС-068	15,5	0	7,53	-0,718	0	11,7	0,89	0
ГФ-0119	15,9	0	7,15	-0,624	0	5,28	1,22	0
Сурик	12,9	0	1,92	-0,122	0	0,751	1,58	0
Сурик + БТ-577	6,0	0	2,66	-0,615	0	3,13	0,52	0
Состав 1	9,2	0	1,15	-0,055	0	0,726	1,33	0
Состав 1 + БТ-577	4,3	0	1,71	-0,545	0	1,84	0,55	0

Таблица 6

Значения коэффициентов зависимостей 1, 2 и 3 снижения защитных свойств для второй группы покрытий (составлена авторами)

Покрытие	Зависимость 1		Зависимость 2			Зависимость 3		
	$\alpha, 10^{-3}$	K	$\alpha, 10^{-3}$	b	k	$\alpha, 10^{-3}$	b	K
ФЛ-03К	5,5	0	12,2	-0,1	0	7,45	1,0	0
ФЛ-03К + 2 % сост. 2	2,3	0	1,18	0,3	0	0,946	1,4	0
ФЛ-03К + 5 % сост. 2	5,3	0	0,45	0,8	0	0,234	2,1	0
ГФ-0119	4,7	0	3,70	0	0	2,39	1,3	0
ГФ-0119 + 2 % сост. 2	4,8	0	2,39	0,3	0	1,67	1,5	0
ГФ-0119 + 5 % сост. 2	6,0	0	0,25	1,0	0	0,094	2,3	0
БТ-577	10,0	0	3,47	0,4	0	0,547	2,2	0
БТ-577 + 2 % сост. 2	11,0	0	41,0	-0,5	0	24,6	1,1	0
БТ-577 + 2 % сост. 2	6,4	0	27,1	-0,8	0	54,1	0,4	0

Как видно, в экспериментах в качестве агрессивных сред использовались "промышленная атмосфера" и 3 %-ный раствор $NaCl$. Для проверки применимости вышеприведенных зависимостей для описания снижения защитных свойств покрытий была проведена идентификация моделей (без учета влияния напряженного состояния, так как в экспериментах этот эффект не анализировался) по экспериментальным данным из вышеприведенных таблиц. Результаты идентификации предложенных зависимостей для первой группы покрытий, испытываемых в условиях промышленной атмосферы, приведены в таблице 5, а для второй группы покрытий, испытанных в 3 %-ном растворе $NaCl$ – в таблице 6.

Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета с использованием предложенных моделей с найденными значениями коэффициентов показало, что отличие во всех случаях не превышает 7,3 %.

Модели потери работоспособности покрытия вследствие достижения напряжениями в покрытии предельных значений

При построении моделей будем предполагать возможность образования очага коррозии под покрытием. В процессе коррозии образуются продукты коррозии, которые, оказывая давление на покрытие в месте расположения очага коррозии, вызывают его отслаивание, что приводит к появлению напряжений в покрытии, которые, увеличиваясь по мере увеличения давления продуктов коррозии, вызывают разрушение покрытия.

Определим связь между напряжениями в покрытии с величиной или скоростью коррозии под покрытием. Для этого участок отслоившегося в результате коррозии покрытия будем моделировать круговой пластинкой, шарнирно опертой либо жестко заземленной по контуру и нагруженной равномерно распределенной нагрузкой q , обусловленной давлением продуктов коррозии.

Рассмотрим сначала случай, когда очаг коррозии моделируется круглой пластинкой с шарнирным опиранием (геометрически линейная модель). В этом случае уравнение равновесия пластинки имеет вид:

$$D \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{1}{r} \int_0^r q r dr, \quad (8)$$

$$w = 0, \quad M_r = D \left[\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dw}{dr} \right] = 0.$$

граничные условия:

Выражения для моментов:

$$M_r = D \left[\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dw}{dr} \right], \quad M_f = D \left[\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \nu \frac{d^2 w}{dr^2} \right]. \quad (9)$$

Выражение для прогиба имеет вид:

$$w = \frac{q(R^2 - r^2)}{64D} \left(\frac{(5 + \nu)R^2}{1 + \nu} - r^2 \right), \quad (10)$$

где: R – радиус очага коррозии под покрытием; q – интенсивность давления продуктов

коррозии на антикоррозионное покрытие; $D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^3)}$ – цилиндрическая жесткость покрытия; h – толщина антикоррозионного покрытия.

С учетом этого выражения для прогиба моменты примут вид:

$$M_r = \frac{q(3 + \nu)}{16} (R^2 - r^2), \quad M_f = \frac{q}{16} (R^2(3 + \nu) - r^2(1 + 3\nu)). \quad (11)$$

Прогиб в центре отслаивающегося участка покрытия равен:

$$w_{\max} = \frac{qR^4(5 + \nu)}{64D(1 + \nu)}, \quad (12)$$

а моменты в центре отслоения:

$$M_{r \max} = M_{f \max} = \frac{qR^2}{16} (3 + \nu). \quad (13)$$

Максимальные напряжения:

$$\sigma_{r \max} = \sigma_{f \max} = \frac{6M_r}{h^2} = \frac{3qR^2}{8h^2} (3 + \nu). \quad (14)$$

Учитывая, что под влиянием коррозии объем продуктов коррозии больше объема проржавевшего металла, можно связать высоту слоя продуктов коррозии $\Delta_{кор}$ с глубиной коррозионного износа δ соотношением:

$$\Delta_{кор} = \lambda \delta, \quad (15)$$

где λ – коэффициент, показывающий, во сколько раз высота слоя продуктов коррозии больше глубины коррозионного разрушения металла.

Рисунок 1. Схема к определению амплитуды отслаивания покрытия (составлен авторами)

В соответствии с рис. 1 величина амплитуды отслаивания защитного покрытия над поверхностью металла определится из выражения:

$$w_{омс} = \Delta_{кор} - \delta = \lambda \delta - \delta = \delta(\lambda - 1). \quad (16)$$

Приравнявая $w_{омс}$ к w_{max} , получим:

$$q = \frac{64D\delta(\lambda - 1)(1 + \nu)}{(5 + \nu)R^4}. \quad (17)$$

Полагая, что разрушение покрытия произойдет, когда напряжения в нем достигнут предела прочности $\sigma_{разр}$, запишем:

$$\sigma_{r \max} = \frac{3(3 + \nu)qR^2}{8h^2} = \sigma_{разр}. \quad (18)$$

Подставляя сюда выражение для q , получим соотношение, связывающее предельную глубину коррозионного износа $\delta_{пред}$, при которой происходит разрушение покрытия, с механическими характеристиками материала защитного покрытия и размерами очага коррозии под покрытием:

$$\delta_{пред} = \frac{(5 + \nu)R^2h^2\sigma_{разр}}{24D(1 + \nu)(3 + \nu)(\lambda - 1)}. \quad (19)$$

Теперь для используемой модели коррозии под слоем защитного покрытия можно определить продолжительность инкубационного периода. Например, если $\delta = k_1 t^{n_1}$, то подставляя эту зависимость в вышеприведенную, легко найдем:

$$t_u = \frac{1}{k_1} \left[\frac{(5 + \nu)R^2h^2\sigma_{разр}}{24D(1 + \nu)(3 + \nu)(\lambda - 1)} \right]^{\frac{1}{n_1}}. \quad (20)$$

Рассмотрим теперь случай, когда очаг коррозии моделируется круглой пластинкой, защемленной по контуру (геометрически линейная модель). В этом случае уравнение равновесия пластинки имеет тот же вид, что и для шарнирно опертой пластинки, но граничные условия записываются иначе:

$$w = 0, \quad \frac{dw}{dr} = 0. \quad (21)$$

Выражение для прогиба имеет вид:

$$w = \frac{q}{64D} (R^2 - r^2)^2, \quad (22)$$

где: R – радиус очага коррозии под покрытием; q – интенсивность давления продуктов

коррозии на антикоррозионное покрытие; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^3)}$ – цилиндрическая жесткость покрытия; h – толщина антикоррозионного покрытия.

С учетом этого выражения для моментов примут вид:

$$M_r = \frac{q}{16} (R^2(1+\nu) - r^2(3+\nu)), \quad M_f = \frac{q}{16} (R^2(1+\nu) - r^2(1+3\nu)). \quad (23)$$

Прогиб в центре отслаивающегося участка покрытия равен:

$$w_{\max} = \frac{qR^4}{64D}. \quad (24)$$

Напряжения в центре отслаивающегося участка:

$$\sigma_r = \sigma_f = 0,49q \left(\frac{R}{h} \right)^2. \quad (25)$$

Напряжения у контура отслаивающегося участка:

$$\sigma_r = 0,75q \left(\frac{R}{h} \right)^2, \quad \sigma_f = \nu\sigma_r. \quad (26)$$

Как и выше, величину амплитуды отслаивания защитного покрытия над поверхностью металла определим из выражения:

$$w_{отс} = \Delta_{кор} - \delta = \lambda\delta - \delta = \delta(\lambda - 1). \quad (27)$$

Приравнявая $w_{отс}$ к $w_{\max}$, получим:

$$q = \frac{64D\delta}{R^4} (\lambda - 1). \quad (28)$$

Из условия, что разрушение покрытия произойдет, когда напряжения в нем достигнут предела прочности $\sigma_{раз}$ (что произойдет на контуре очага коррозии), запишем:

$$|\sigma_r| = 0,75q \left(\frac{R}{h} \right)^2 = \sigma_{раз}. \quad (29)$$

Подставляя сюда выражение для q , получим соотношение, связывающее предельную глубину коррозионного износа $\delta_{пред}$, при которой происходит разрушение покрытия, с механическими характеристиками материала защитного покрытия и размерами очага коррозии под покрытием:

$$\delta_{пред} = \frac{R^2 h^2 \sigma_{разр}}{48D(\lambda - 1)}, \quad (30)$$

где λ – коэффициент, показывающий, во сколько раз высота слоя продуктов коррозии больше глубины коррозионного разрушения металла.

В случае, если коррозионный износ под слоем защитного покрытия происходит в соответствии с моделью $\delta = k_1 t^{n_1}$, то, подставляя эту зависимость в вышеприведенную, найдем:

$$t_u = \left[\frac{R^2 h^2 \sigma_{разр}}{48Dk_1(\lambda - 1)} \right]^{\frac{1}{n_1}}. \quad (31)$$

Рассмотрим случай, когда очаг коррозии моделируется гибкой круглой пластинкой, то есть учитывается геометрическая нелинейность. Так как толщина защитного антикоррозионного покрытия достаточно мала, то в процессе его отслаивания вполне вероятно появление таких деформаций и перемещений, при которых геометрически линейная теория изгиба пластинок окажется некорректной. В этом случае следует использовать геометрически нелинейную теорию. Получим основные соотношения и для этого случая.

Основная система дифференциальных уравнений изгиба круглой гибкой пластинки:

$$\begin{aligned} D \frac{d}{dr} (\Omega^2 w) &= \Psi + \frac{h}{r} \frac{d\Phi}{dr} \frac{dw}{dr}, \\ \frac{d}{dr} (\Omega^2 \Phi) &= -\frac{E}{2r} \left(\frac{dw}{dr} \right)^2. \end{aligned} \quad (32)$$

Здесь оператор Ω^2 отвечает формуле:

$$\Omega^2 \Phi = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\Phi}{dr} \right), \quad (33)$$

а Ψ является функцией нагрузки, определяемой выражением:

$$\Psi = \frac{1}{r} \int_0^r q r dr. \quad (34)$$

При шарнирном опирании по контуру пластинки радиуса R :

$$w|_{r=R} = 0, \quad \left[\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dw}{dr} \right]_{r=R} = 0. \quad (35)$$

Если пластинка защемлена по контуру, то:

$$w|_{r=R} = 0, \quad \left. \frac{dw}{dr} \right|_{r=R} = 0. \quad (36)$$

Для круглой равномерно нагруженной по всей площади пластинки нагрузкой интенсивностью q имеем следующее уравнение для определения стрелы прогиба f (в центре):

$$C_1 f^3 + C_2 f = \frac{q}{E} \left(\frac{R}{h} \right)^4. \quad (37)$$

Напряжения изгиба σ_r , σ_f и напряжения в срединной поверхности σ_r^0 , σ_f^0 находятся по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= C_3 E h \frac{f}{R^2}, & \sigma_f &= C_4 E h \frac{f}{R^2}, \\ \sigma_r^0 &= C_5 E \left(\frac{f}{R} \right)^2, & \sigma_f^0 &= C_6 E \left(\frac{f}{R} \right)^2. \end{aligned} \quad (38)$$

Полные напряжения:

$$\sigma_r^{\text{полн}} = \sigma_r + \sigma_r^0, \quad \sigma_f^{\text{полн}} = \sigma_f + \sigma_f^0. \quad (39)$$

Значения коэффициентов $C_1 \div C_6$ приведены в таблице 7, в которой знак минус относится к сжимающим напряжениям.

Таблица 7

Значения коэффициентов $C_1 \div C_6$ при $\nu = 0,3$ (составлена авторами)

Граничные условия		C_1	C_2	В центре		У контура			
				$C_3 = C_4$	$C_5 = C_6$	C_3	C_4	C_5	C_6
Шарнирное опирание по контуру	контур свободно скользит	0,376	1,436	1,778	0,295	0	0,755	0	-0,43
	контур не смещается	2,660	1,436	1,778	0,905	0	0,755	0,610	0,183
Защемл. по контуру	контур свободно скользит	0,857	5,862	2,860	0,500	4,400	1,320	0	-0,33
	контур не смещается	2,762	5,862	2,860	0,976	4,400	1,320	0,476	0,145

Наконец, рассмотрим случай, когда очаг коррозии моделируется абсолютно гибкой круглой пластинкой, то есть изгибная жесткость не учитывается. В этом случае в уравнениях деформирования гибкой круглой пластинки можно пренебречь членом, содержащим D , и тогда они примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{h}{r} \frac{d\Phi}{dr} \frac{dw}{dr} &= -\Psi, \\ \frac{d}{dr} (\Omega^2 \Phi) &= -\frac{E}{2r} \left(\frac{dw}{dr} \right)^2. \end{aligned} \quad (40)$$

В случае, когда очаг коррозии представляет собой круглую мембрану радиуса R , нагруженную равномерно распределенным поперечным давлением, а контур мембраны не смещается, то величина прогиба в ее центре составит:

$$w_{\max} = 0,662 \left[\frac{q}{E} \left(\frac{R}{h} \right)^4 \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (41)$$

а максимальное напряжение в центре:

$$\sigma_{\max} = 0,423 \left[E \left(\frac{qR}{h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (42)$$

Описанным выше способом не составляет труда определить продолжительность инкубационного периода для заданного закона коррозионного износа конструкции под антикоррозионным покрытием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.Г., Хадеев В.М. Расчет конструкций, подверженных коррозионному износу (учебное пособие). Иваново, 1991, (ИИСИ, СПИ). 102 с.
2. Овчинников И.Г., Дворкин М.С., Кудайбергенов Н.Б. К расчету напряженного состояния и долговечности конструкций с защитным покрытием в условиях воздействия агрессивной среды // Сборник науч. трудов Казах. хим. технол. ин-та, вып.1, 1993, Шымкент.
3. Овчинников И.Г., Айнабеков А.И., Кудайбергенов Н.Б. Инженерные методы расчета конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах (учебное пособие). Изд-во КазХТИ, Шымкент, 1994. 131 с.
4. Ovchinnikov I.G., Dvorkin M.S., Kudaybergenov N.B. Data bank of theoretical models of corrosion damage // Metal Structures. The Ninth International Conference. Final Report Krakow (Poland) 1996.
5. Ovchinnikov I.G., Shein A.A. Mavzovin V.S. The simulation of corrosio-nous – mechanical behaviour of the tanks and pipelines constructions with polymer protective sheeting // Lightweight structures in civil engineering. Local Seminar of IASS POLISH CHARTER. Warsaw, 6 December, 1996, p. 135-136.
6. Овчинников И.Г., Кудайбергенов Н.Б., Шеин А.А. Эксплуатационная надежность и оценка состояния резервуарных конструкций (монография). Саратов. гос. техн. ун-т. Саратов.1999. 316 с.
7. Наумова Г.А., Овчинников И.Г. Расчеты на прочность сложных стержневых и трубопроводных конструкций с учетом коррозионных повреждений. СГТУ. Саратов.2000. 227 с.
8. Макаров В.Н., Овсянников С.В., Овчинников И.Г. «Антикоррозионная защита мостовых сооружений». Саратов. Научное издание. Издат. Центр «Наука». 2007. 192 с.
9. Распоров О.Н., Овчинников И.Г., Распоров К.О. Комплексная защита. Необходимость и целесообразность комплексной антикоррозионной защиты металлических, бетонных и железобетонных элементов мостовых сооружений // Дороги России 21 века. 2009, № 4, с. 98-101.
10. Распоров К.О., Распоров О.Н., Овчинников И.Г. Антикоррозионная защита АЗС и мостов // Дорожная держава, 2009, № 20, с. 58-60.
11. Родичев Л.В., Каримов З.Ф. Физическое моделирование процессов коррозии металла, протекающих под слоем антикоррозионной защиты // Строительство трубопроводов. 1993. № 6. – С. 29-32.
12. О прогнозировании времени жизни антикоррозионных покрытий по стали Ст3 / Е.В. Горохов, Ю.Б. Высоцкий, А.П. Доня и др. // Защита металлов. 1994. Т. 30. № 2. – С. 191-195.
13. Карякина М.И. Физико-химические основы процессов формирования и старения покрытий. – М.: Химия, 1980. – 198 с.

Ovchinnikov Igor Georgievich

Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Russia, Saratov
Perm national research polytechnic university, Russia, Perm
Moscow state automobile & road technical university
Sochi branch, Russia, Sochi
E-mail: bridgesar@mail.ru

Ovchinnikov Ilya Igorevich

Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Russia, Saratov
Moscow state automobile & road technical university
Sochi branch, Russia, Sochi
E-mail: bridgeart@mail.ru

Ellala Faouzi ben Abdullaziz

National Institute of Engineers of Gabes, Tunis, Gabes
E-mail: Faouzi.Ellala@enig.rnu.tn

Evaluation of durability of protective coatings on metal bridge structures

Abstract. The problem of prediction of durability of protective coatings on steel structures for bridges is considered. Proposed two groups of models of loss of efficiency coatings: because of discontinuity of the coating and as a result of a limit stress in the coatings. The basic relationship of models are considered, held their identification.

Keywords: steel structures for bridges; corrosive wear; corrosion protection; durability; the model wear; protective coatings

REFERENCES

1. Ovchinnikov I.G., Hadeev V.M. (1991). Raschet konstruktsij, podverzhennyh korrozionnomu iznosu. [*Calculation of structures subject to corrosive wear.*] Ivanovo: IISI, SPI, p. 102.
2. Ovchinnikov I.G., Dvorkin M.S., Kudajbergenov N.B. (1993). K raschetu naprjazhennogo sostojanija i dolgovechnosti konstruktsij s zaschitnym pokrytiem v uslovijah vozdejstvija agressivnoj sredy. [*To the calculation of the stress state and the durability of structures with a protective coating under conditions of exposure to an aggressive medium.*] Shymkent: Kazakh Chemical Technological Institute.
3. Ovchinnikov I.G., Ajnabekov A.I., Kudajbergenov N.B. (1994). Inzhenernye metody rascheta konstruktsij, `ekspluatirujuschih v agressivnyh sredah. [*Engineering methods for calculating structures operating in corrosive environments.*] Shymkent: Kazakh Chemical Technological Institute, p. 131.
4. Ovchinnikov I.G., Dvorkin M.S., Kudaybergenov N.B. (1996). Data bank of theoretical models of corrosion damage. *Metal Structures. The Ninth International Conference.*
5. Ovchinnikov I.G., Shein A.A., Mavzovin V.S. (1996). The simulation of corrosio-nous – mechanical behaviour of the tanks and pipelines constructions with polymer protective sheeting. *Lightweight structures in civil engineering*, 6, pp. 135-136.

6. Ovchinnikov I.G., Kudajbergenov N.B., Shein A.A. (1999). `Ekspluatatsionnaja nadezhnost' i otsenka sostojanija rezervuarnyh konstruksij. [*Operational reliability and assessment of the state of tank structures.*] Saratov: Sarat. state. tech. un-t, p. 316.
7. Naumova G.A., Ovchinnikov I.G. (2000). Raschety na prochnost' slozhnyh sterzhnevyyh i truboprovodnyh konstruksij s uchetom korrozionnyh povrezhdenij. [*Calculations on the strength of complex rod and pipeline structures taking into account corrosion damage.*] Saratov: Sarat. state. tech. un-t, p. 227.
8. Makarov V.N., Ovsjannikov S.V., Ovchinnikov I.G. (2007). Antikorroziionnaja zaschita mostovyh sooruzhenij. [*Anticorrosive protection of bridge structures.*] Saratov: Scientific publication. Published. Center "Science", p. 192.
9. Rasporov O.N., Ovchinnikov I.G., Rasporov K.O. (2009). Comprehensive protection. Necessity and expediency of complex anticorrosive protection of metal, concrete and ferro-concrete elements of bridge constructions. *Roads of Russia of 21 centuries*, 4, pp. 98-101. (in Russian).
10. Rasporov K.O., Rasporov O.N., Ovchinnikov I.G. (2009). Anticorrosive protection of filling stations and bridges. *The road power*, 20, pp. 58-60. (in Russian).
11. Rodichev L.V., Karimov Z.F. (1993). Physical modeling of metal corrosion processes occurring under a layer of corrosion protection. *Pipeline construction*, 6, pp. 29-32. (in Russian).
12. Gorohov E.V., Vysotskij Ju.B., Donja A.P. and etc. (1994). On the prediction of the lifetime of anticorrosive coatings for steel St3. *Protection of metals*, 2(30), pp. 191-195. (in Russian).
13. Karjakina M.I. (1980). Fiziko-himicheskie osnovy protsessov formirovaniya i starenija pokrytij. [*Physico-chemical basis of the formation and aging of coatings.*] Moscow: Chemistry, p. 198.