

## Об одной особенности оптимального проектирования конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой

Г. В. Филатов

Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск, Украина

*Проведены обширные численные эксперименты по исследованию зависимости функции влияния напряженно-деформированного состояния конструкции на скорость коррозионного процесса от жесткости оптимизируемой конструкции. При оптимальном проектировании конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой, предлагается применение метода многократной идентификации математических моделей коррозионного разрушения. Исследуются теоретические аспекты проблемы. Приводится методика определения параметров математической модели коррозионного разрушения, обеспечивающих эволюционный переход конструкции в оптимальное состояние.*

**Ключевые слова:** оптимальное проектирование, скорость коррозии, математическое моделирование, многократная идентификация.

### Обозначения

- $\beta$  – параметр, учитывающий влияние напряженно-деформированного состояния на скорость коррозионного процесса
- $\delta$  – текущее значение глубины коррозионного поражения
- $t$  – время коррозии
- $\varepsilon_i, \sigma_i$  – интенсивность деформаций и напряжений
- $\sigma_{\text{пор}}$  – пороговое значение напряжения, ниже которого влияние напряженно-деформированного состояния на скорость коррозионного процесса отсутствует
- $\alpha$  – скорость коррозии ненапряженного металла
- $f$  – оператор, представляющий собой функцию интенсивности напряжений и деформаций
- $\delta_f^{\varepsilon}$  – экспериментальная глубина коррозионного поражения
- $\beta^-, \beta^+$  – соответственно нижняя и верхняя границы изменения параметра влияния напряженно-деформированного состояния на скорость коррозионного процесса
- $x_i^-, x_i^+$  – соответственно нижняя и верхняя границы управляющих переменных
- $r$  – число ограничений
- $m$  – число управляющих переменных
- $\Delta$  – толщина стенки оптимальной оболочки
- $R$  – радиус срединной поверхности оболочки
- $A_{\text{опт}}$  – оптимальное значение площади оболочки
- $J$  – критерий качества – целевая функция в виде суммы квадратов разности между экспериментальными и расчетными значениями глубины коррозионного поражения

**Введение.** Процесс оптимального проектирования конструкций можно рассматривать как эволюцию конструкции от неоптимального состояния к оптимальному, что сопровождается изменением ее геометрических параметров и напряженно-деформированного состояния (НДС). Влияние НДС на скорость коррозионного процесса учитывается с помощью специальных параметров (коэффициентов) математической модели коррозионного разрушения конструкции. В большинстве работ, посвященных оптимальному проектированию конструкций [1–4], взаимодействующих с агрессивной средой, эти параметры принимаются постоянными. Приведенные в настоящей работе результаты численного экспериментирования на ЭВМ и теоретические исследования дают основание утверждать, что это не так: в процессе эволюции конструкции параметры, характеризующие влияние НДС на скорость коррозии, являются функцией изменения НДС и изменяются до “оптимальной” величины, обеспечивающей переход конструкции в оптимальное состояние. Игнорирование этого факта может привести к серьезному искажению результатов оптимизации. Относительная погрешность получаемых решений по сравнению с истинными оптимальными решениями в отдельных случаях может составить несколько десятков процентов.

**1. Численное экспериментирование на ЭВМ.** Объектом исследования служили безмоментная цилиндрическая оболочка, нагруженная внутренним давлением (рис. 1,а), коррозионное разрушение происходит на внутренней поверхности стенки; гладкая цилиндрическая оболочка, сжатая в осевом направлении; статически определимая балка с прямоугольным поперечным сечением (рис. 1,б), коррозионное разрушение происходит на верхней и нижней поверхностях; статически определимая сварная балка двутаврового профиля (рис. 1,в), коррозионное разрушение происходит на верхней и нижней поверхностях.

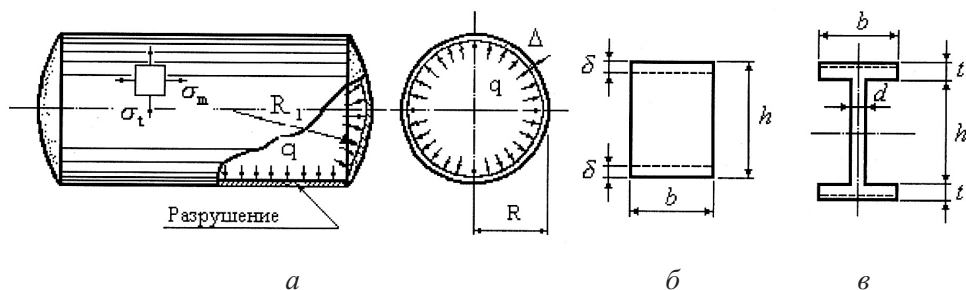


Рис. 1. Объекты для численного экспериментирования.

Для описания процесса коррозионного поражения конструкций были рассмотрены две математические модели – Овчинникова и Карпунина соответственно [5]:

$$\frac{d\delta}{dt} = \beta \varepsilon_i (\sigma_i - \sigma_{\text{пор}}) + \alpha = \beta f_i + \alpha; \quad (1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \beta \sigma_i + \alpha = \beta f_i + \alpha, \quad (2)$$

где  $\beta$  – параметр, учитывающий влияние НДС на скорость коррозионного процесса, определяется путем идентификации математической модели по экспериментальным данным;  $\delta$  – текущее значение глубины коррозионного поражения;  $t$  – время коррозии;  $\varepsilon_i$ ,  $\sigma_i$  – соответственно интенсивность деформаций и напряжений;  $\sigma_{\text{пор}}$  – пороговое значение напряжения, ниже которого влияние НДС на скорость коррозионного процесса отсутствует: при  $\sigma_i \leq \sigma_{\text{пор}}$  принимают  $(\sigma_i - \sigma_{\text{пор}}) = 0$ ;  $\alpha$  – скорость коррозии ненапряженного металла;  $f_i = \varepsilon_i(\sigma_i - \sigma_{\text{пор}})$  для модели (1) и  $f_i = \sigma_i$  для модели (2).

Эксперимент проводился при  $\sigma_{\text{пор}} = 0$  и  $\alpha = 0$ . Для определения глубины коррозионного поражения применялся метод конечноразностной аппроксимации. Заменяя дифференциалы конечными разностями  $d\delta \approx \Delta\delta$ ;  $dt \approx \Delta t$ , получаем [6]

$$\begin{aligned} \delta(t_1) - \delta(t_0) &= \beta f_0(t_1 - t_0); \\ \delta(t_2) - \delta(t_1) &= \beta f_1(t_2 - t_1); \\ &\dots\dots\dots \\ \delta(t_n) - \delta(t_{n-1}) &= \beta f_{n-1}(t_n - t_{n-1}). \end{aligned} \tag{3}$$

Складывая первые  $j$  уравнений (3), получаем глубину коррозионного поражения для времени  $t_j$ :

$$\delta(t_j) = \beta \sum_{k=1}^j f_{k-1}(t_k - t_{k-1}), \quad k = 1, 2, \dots, j. \tag{4}$$

В выражениях (1)–(4) оператор  $f$  представляет собой функцию интенсивности напряжений и деформаций для модели (1) и функцию интенсивности напряжений для модели (2).

Общая постановка задачи идентификации параметра влияния НДС на скорость коррозионного процесса  $\beta$  как задачи математического программирования состоит в следующем. Выбирается целевая функция в виде суммы квадратов разности между экспериментальными и расчетными значениями глубины коррозионного поражения:

$$J = \sum_{j=1}^n \{\delta_j^3 - \delta(t_j)\}^2 = \sum_{j=1}^n \left\{ \delta_j^3 - \beta \sum_{k=1}^j f_{k-1}(t_k - t_{k-1}) \right\}^2 \tag{5}$$

и минимизируется при выполнении ограничения:

$$\beta^- \leq \beta \leq \beta^+, \tag{6}$$

где  $\delta_j^3$  – экспериментальная глубина коррозионного поражения;  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  – соответственно нижняя и верхняя границы изменения параметра влияния НДС на скорость коррозионного процесса.

Общая постановка задачи оптимального проектирования заключается в следующем. Принимая в качестве целевой функции площадь поперечного сечения каждого из исследуемых объектов, а в качестве оптимизируемых параметров – размеры поперечных сечений этих объектов, и, полагая, что эти параметры являются управляющими переменными, получаем задачу математического программирования: найти минимум целевой функции

$$A = F(\mathbf{X}), \quad (7)$$

где  $\mathbf{X}$  – вектор управляющих переменных.

В качестве целевой функции может быть рассмотрена площадь поперечного сечения оптимизируемого объекта, его объем или масса либо какой-нибудь энергетический критерий. В данной работе такой целевой функцией является площадь поперечного сечения. В качестве оптимизируемых параметров (управляющие переменные) принимаются геометрические параметры конструкции, например размеры ее поперечных сечений. Требуется найти минимум целевой функции (7) при выполнении ограничений по прочности, жесткости и устойчивости:

$$g_j(\mathbf{X}) \leq |g_j| \quad (8)$$

и геометрических ограничений, накладываемых на область допускаемых параметров:

$$g_S = (x_i - x_i^- \geq 0; x_i^+ - x_i \geq 0), \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad S = 1, 2, \dots, r, \quad (9)$$

где  $x_i^-$ ,  $x_i^+$  – соответственно нижняя и верхняя границы управляющих переменных;  $r$  – число ограничений;  $m$  – число управляющих переменных.

Для реализации и оптимизации задач идентификации математических моделей используется один из блуждающих алгоритмов метода случайного поиска глобального экстремума функции [7].

Исследование проводилось в несколько этапов. На первом этапе для каждого из рассматриваемых объектов выбиралась стартовая точка в области допускаемых решений, для которой выполнялась идентификация математических моделей коррозионного разрушения (1), (2). Под точкой следует понимать значение целевой функции и соответствующие геометрические параметры конструкции. В результате идентификации модели определялся коэффициент влияния НДС на скорость коррозионного процесса  $\beta$ , с использованием которого из выбранной стартовой точки выполнялась оптимизация объекта. В процессе поиска фиксировалась информация о промежуточных точках в виде значений целевой функции и геометрических параметров поперечных сечений. Из этих промежуточных точек для каждого из объектов отбиралось по 30 точек в порядке убывания целевой функции, для каждой из которых выполнялась идентификация математических моделей (1) и (2). Результаты идентификации заносились в таблицы и на основании полученной информации строились графики зависимости параметра влияния НДС на скорость коррозии от жесткости поперечных сечений конструкции.

Т а б л и ц а 1

**Результаты многократной идентификации при оптимальном проектировании  
безмоментной тонкостенной оболочки**

Стартовая точка			Параметры оптимизации			
$A$ , см <sup>2</sup>	$\Delta$ , см	$R$ , см	$\beta$	$A_{\text{опт}}$ , см <sup>2</sup>	$\Delta$ , см	$\delta$ , см
2310,60	3,645	100,89	0,2197	960,12	1,529	0,4464
2205,32	3,406	103,05	0,1922	947,84	1,473	0,3909
2180,92	3,450	100,61	0,1979	941,10	1,498	0,4152
2160,24	3,393	101,33	0,1925	935,92	1,490	0,4070
2020,42	3,214	100,05	0,1736	920,26	1,465	0,3817
2004,77	3,166	100,78	0,1659	909,46	1,447	0,3647
1988,27	3,165	100,01	0,1684	911,96	1,451	0,3688
1996,11	3,152	100,79	0,1644	907,82	1,445	0,3623
1853,72	2,950	100,01	0,1433	885,38	1,409	0,3265
1668,68	2,641	100,56	0,1158	854,1	1,359	0,2768
1654,97	2,618	100,61	0,1137	851,67	1,355	0,2727
1576,85	2,251	111,49	0,0970	838,16	1,256	0,1738
1472,29	2,343	100,01	0,0920	824,77	1,313	0,2301
1230,37	1,944	100,73	0,0730	784,56	1,249	0,1661
1132,29	1,752	102,86	0,0574	762,48	1,214	0,1309
1027,42	1,608	101,69	0,0501	753,63	1,199	0,1169
1022,49	1,622	100,33	0,0432	756,01	1,203	0,1206
1018,77	1,610	100,71	0,0426	755,05	1,202	0,1191
1010,42	1,590	101,14	0,0412	752,85	1,198	0,1156
990,19	1,575	100,06	0,0413	753,05	1,199	0,1158
959,80	1,523	100,30	0,0384	748,45	1,191	0,1085
953,28	1,511	100,41	0,0378	747,46	1,190	0,1070
938,32	1,491	100,16	0,0370	746,19	1,188	0,1050
944,36	1,503	100,00	0,0374	746,83	1,189	0,1060
942,88	1,499	100,11	0,0373	746,70	1,188	0,1057
938,80	1,494	100,01	0,0372	746,51	1,188	0,1055
936,25	1,488	100,14	0,0374	746,79	1,189	0,1060
934,52	1,486	100,09	0,0376	747,79	1,189	0,1065
933,87	1,486	100,02	0,0376	747,14	1,189	0,1065
932,42	1,484	100,00	0,0376	747,19	1,189	0,1065

Приведем в качестве примера выборку из 30 промежуточных точек, полученных при оптимальном проектировании безмоментной оболочки с использованием математической модели коррозионного разрушения Овчинникова (1) – табл. 1. В левой части табл. 1 представлены текущие (начальное,

промежуточные и конечное) значения целевой функции и геометрических параметров оболочки, в правой части – значения параметра влияния НДС на скорость коррозионного процесса, полученные в результате идентификации модели коррозионного разрушения для текущих точек, принимаемых в качестве стартовых. Там же приведены оптимальные значения целевой функции и величины геометрических параметров оболочки, полученные при оптимальном проектировании оболочки из промежуточных точек с соответствующими параметрами влияния НДС. В правой части табл. 1 даны сведения о глубине коррозионного поражения для каждого из оптимальных проектов.

Для первых двух объектов значения целевой функции (площади поперечного сечения) и жесткости сечений совпадают, так как именно площадь поперечных сечений определяет их жесткость. На рис. 2 представлены зависимости параметра влияния НДС на скорость коррозионного процесса от жесткости поперечных сечений безмоментной оболочки. Видно, что вместе с убыванием жесткости поперечных сечений уменьшаются также значения параметров влияния НДС на скорость коррозионного процесса.

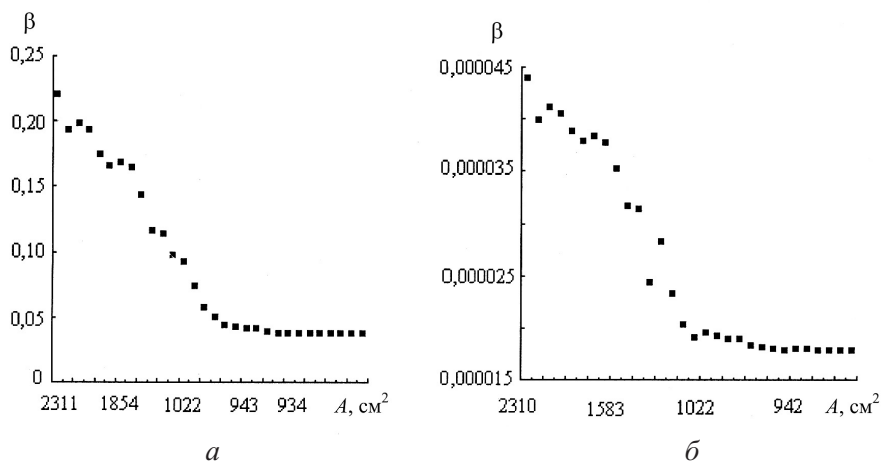


Рис. 2. Зависимость параметра влияния НДС на скорость коррозионного процесса  $\beta$  от жесткости поперечных сечений безмоментной оболочки: а, б – модели (1) и (2) соответственно.

При изгибе геометрическим фактором жесткости поперечного сечения балок является осевой момент инерции. Поэтому для изгибаемых балок зависимость параметра влияния НДС на скорость коррозионного процесса определялась не по величине целевой функции, т.е. площади, а по жесткости поперечного сечения (рис. 3).

Из рис. 3, как и из рис. 2, видно, что с уменьшением жесткости поперечных сечений уменьшается и параметр влияния НДС на скорость коррозионного процесса. Этот эффект наблюдается во всем интервале изменения жесткости поперечных сечений рассмотренных выше объектов.

На рис. 3,б представлена зависимость параметра влияния НДС от величины момента инерции  $J_z$  поперечного сечения сварной балки двутаврового профиля по модели (1). Балка такого профиля обладает той особенностью, что до определенного момента жесткость ее поперечного сечения при оптимальном проектировании убывает одновременно с уменьшением целевой

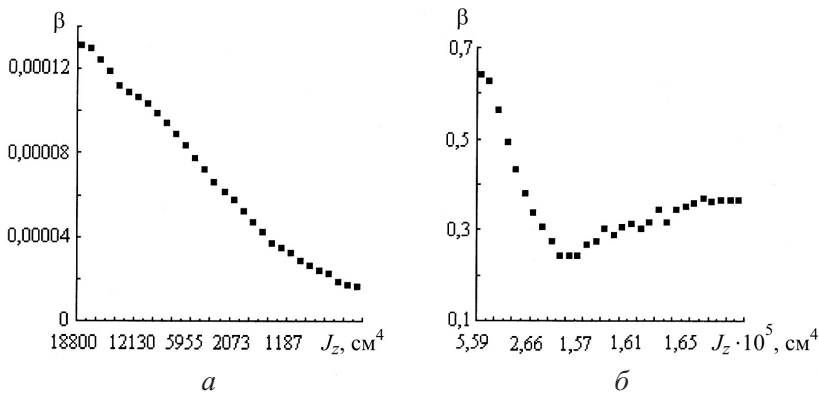


Рис. 3. Зависимости параметра влияния НДС на скорость коррозионного процесса  $\beta$  от жесткости поперечных сечений изгибаемой балки с прямоугольным поперечным сечением (а), с двуглавым профилем (б) для модели (1).

функции. Затем на графике наблюдается излом, и параметр влияния НДС начинает расти, несмотря на то что целевая функция продолжает уменьшаться.

Объяснить это можно, если изменение параметра влияния НДС на скорость коррозии связывать не с изменением целевой функции, а изменением жесткости поперечного сечения балки в процессе ее эволюции. С некоторого момента балка, пытаясь сохранить несущую способность при уменьшении площади поперечного сечения (целевой функции), начинает вытягиваться в вертикальном направлении, перпендикулярном нейтральному слою, при этом увеличивается ее жесткость (рис. 3,б).

От места излома кривой (рис. 3,б) жесткость начинает увеличиваться. Одновременно начинает повышаться и параметр влияния НДС  $\beta$ . Это доказывает, что имеет место зависимость параметра влияния НДС на скорость коррозионного процесса от жесткости конструкции при ее эволюции. Подобный эффект наблюдается также при использовании математической модели Карпунина.

На втором этапе исследований выбранные ранее 30 точек принимались в качестве стартовых и из них для каждого из рассматриваемых объектов выполнялась оптимизация с соответствующими этим точкам параметрами влияния НДС на скорость коррозионного процесса. По результатам расчетов построены зависимости найденных таким образом оптимальных решений в виде минимальных площадей поперечных сечений от величины параметров влияния НДС. На рис. 4 представлены соответствующие графики для безмоментной оболочки.

Анализ приведенных графиков показывает, что оптимальные значения целевой функции, найденные из стартовых точек, взятых вдали (большая жесткость, большой параметр влияния НДС на скорость коррозии) и вблизи цели, значительно различаются. Для разных объектов это может составлять от 8 до 90% в зависимости от выбора первой стартовой точки. Качество оптимального решения существенно зависит от величины параметра влияния НДС на скорость коррозионного процесса. Чем меньше коэффициент влияния НДС, тем выше качество оптимального решения.

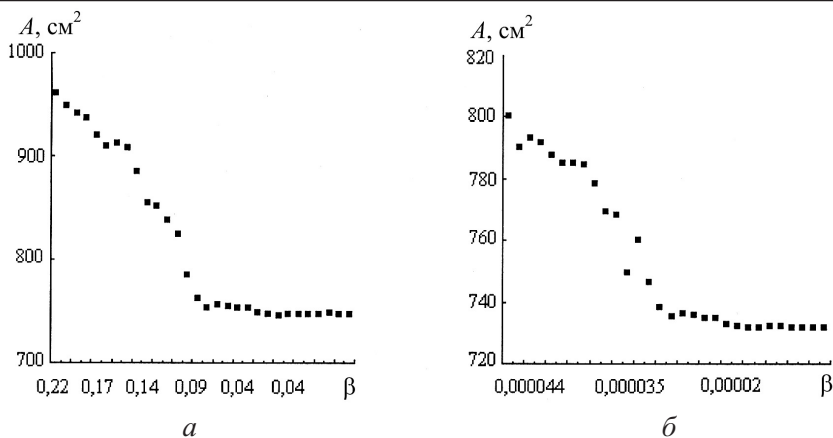


Рис. 4. Зависимости оптимальных решений от величины параметра  $\beta$  для безмоментной оболочки:  $a, б$  – модели (1), (2) соответственно.

Заметим, что наилучшее решение среди полученных таким образом не всегда действительно оптимальное или близкое к нему. Решение можно улучшить путем ряда уточняющих идентификаций и оптимизаций. Процесс этот носит итерационный характер. Достаточно нескольких итераций, чтобы получить окончательное, так называемое “оптимальное” значение для параметра влияния НДС на скорость коррозии, соответствующее оптимальному решению (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Результаты уточняющих идентификаций и оптимальные параметры безмоментной оболочки после уточнения параметра влияния НДС

Стартовая точка для уточняющей идентификации				Оптимальные параметры оболочки			
$A, \text{см}^2$	$\Delta, \text{см}$	$R, \text{см}$	$\beta$	$A_{\min}, \text{см}^2$	$\Delta, \text{см}$	$R, \text{см}$	$\delta, \text{см}$
747,190	1,189	100,000	0,02344254	723,600	1,152	100,002	0,0690
723,600	1,152	100,002	0,02199859	721,073	1,148	100,001	0,0651
721,073	1,148	100,001	0,02191039	720,940	1,147	100,000	0,0648
720,940	1,147	100,000	0,02180674	720,760	1,147	100,001	0,0645
720,760	1,147	100,001	0,02180620	720,750	1,147	100,001	0,0645

Как отмечалось выше, имея “оптимальный” параметр влияния НДС на скорость коррозионного процесса  $\beta$ , можно из любой точки пространства управляющих переменных определить значение целевой функции, близкое к оптимальному.

В табл. 3 приведены результаты оптимального проектирования оболочки из пяти произвольно выбранных стартовых точек. Полученные результаты (значение целевой функции, координаты точки, глубина поражения) практически совпадают с решением, принятым ранее в качестве оптимального.



Т а б л и ц а 3

Результаты поиска оптимального решения из разных стартовых точек при “оптимальном” параметре влияния НДС на скорость коррозионного процесса

Стартовая точка			Оптимальные параметры оболочки			
$A$ , см <sup>2</sup>	$\Delta$ , см	$R$ , см	$A_{\min}$ , см <sup>2</sup>	$\Delta$ , см	$R$ , см	$\delta$ , см
2513,28	2,00	200,00	720,856	1,147	100,001	0,0645
7539,84	3,00	400,00	720,781	1,147	100,004	0,0645
4398,24	2,50	280,00	720,755	1,147	100,001	0,0645
1413,72	1,50	150,00	720,846	1,147	100,006	0,0645
1413,72	1,25	180,00	720,794	1,147	100,002	0,0645

Таким образом, благодаря итерационной процедуре в виде ряда уточняющих идентификаций математической модели коррозионного разрушения и уточняющих оптимизаций удалось снизить ранее полученное оптимальное решение с  $A = 747,19$  см<sup>2</sup> до  $A = 720,75$  см<sup>2</sup>, т.е. на 3,68%, и определить “оптимальное” значение коэффициента влияния НДС на скорость коррозионного процесса.

В рамках проведенного численного эксперимента исследовалась зависимость глубины коррозионного поражения от величины параметров влияния НДС на скорость коррозии. На рис. 5 представлены соответствующие графики для безмоментной оболочки по модели (1).

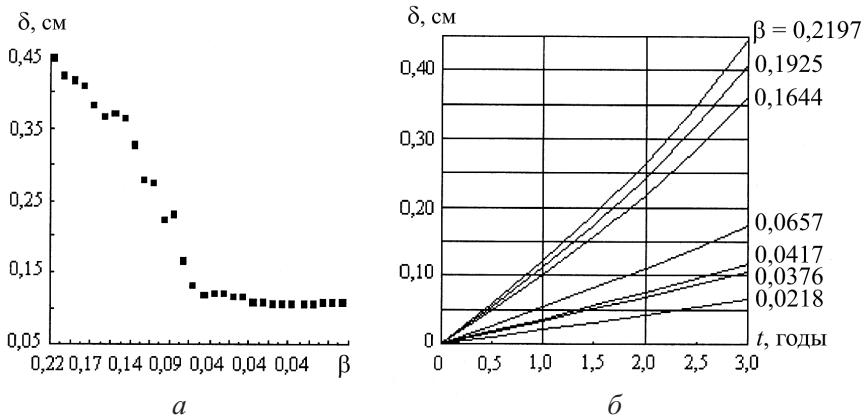


Рис. 5. Зависимость глубины коррозионного поражения  $\delta$  от величины параметра влияния НДС  $\beta$  (а) и времени коррозии при различных значениях  $\beta$  (б).

Видно, что глубина коррозионного поражения с уменьшением параметра влияния НДС на скорость коррозии также уменьшается, достигая минимальной величины при “оптимальном” значении  $\beta$  (рис. 5,а). Этот эффект наблюдается для всех рассматриваемых объектов и обеих математических моделей коррозионного разрушения.

Рис. 5,б иллюстрирует зависимость глубины коррозионного поражения от времени коррозии для различных значений  $\beta$ . Видно, что скорость корро-

зии, вызванная влиянием НДС, будет наименьшей при “оптимальных” значениях параметра  $\beta$ . Отсюда следует, если объект находится в оптимальном состоянии, то скорость коррозии, вызванная влиянием НДС, будет наименьшей.

**2. Теоретические аспекты исследуемой проблемы.** Сформулируем теорему: функция влияния НДС на скорость коррозионного процесса прямо пропорциональна жесткости оптимизируемой конструкции. Докажем это.

Для этого сформулируем критерий качества. Применительно к математическим моделям, учитывающим влияние НДС на скорость коррозионного процесса, критерий имеет вид [6]

$$J = \sum_{j=1}^n [\delta(t_j) - \delta_j^3]^2 = \sum_{j=1}^n \left[ \alpha t_j + \beta \sum_{k=1}^j f_{k-1}(t_k - t_{k-1}) - \delta_j^3 \right]^2. \quad (10)$$

Возьмем частные производные от функционала (10) по параметрам  $\alpha$  и  $\beta$  и приравняем полученные выражения нулю:

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha} = \alpha \sum_{j=1}^n t_j^2 + \beta \sum_{j=1}^n \left[ t_j \sum_{k=1}^j f_{k-1}(t_k - t_{k-1}) \right] - \sum_{j=1}^n \delta_j^3 t_j = 0; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial \beta} = \alpha \sum_{j=1}^n \left[ t_j \sum_{k=1}^j f_{k-1}(t_k - t_{k-1}) \right] + \beta \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{k=1}^j f_{k-1}(t_k - t_{k-1}) \right]^2 - \\ - \sum_{j=1}^n \left[ \delta_j^3 \sum_{k=1}^j f_{k-1}(t_k - t_{k-1}) \right] = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Решая уравнение (12) при скорости коррозии ненапряженного металла  $\alpha = 0$  относительно параметра влияния НДС на скорость коррозии  $\beta$ , получаем

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^n \delta_j^3}{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^j f_{k-1}(t_k - t_{k-1})}. \quad (13)$$

Из выражения (13) следует, что параметр  $\beta$  зависит не только от состояния среды, но и от функции НДС  $f$ . Функция влияния НДС на скорость коррозионного процесса всегда обратно пропорциональна жесткости конструкции. Значит, зависимость параметра влияния НДС  $\beta$  от жесткости конструкции является прямо пропорциональной: с понижением жесткости конструкции уменьшается и величина параметра влияния НДС на скорость корро-

зионного процесса, что подтверждается результатами численного эксперимента.

Из этой теоремы следует: “оптимальное” значение параметра влияния НДС на скорость коррозионного процесса обеспечивает сходимость поиска к оптимальному решению без дополнительной процедуры многократной идентификации математической модели.

Сформулируем последовательность действий при оптимальном проектировании конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой, с учетом влияния НДС.

1. Записывается задача нелинейного математического программирования (7)–(9).

2. Из произвольной стартовой точки области оптимизируемых параметров выполняется поиск оптимального решения в соответствии с выбранным критерием качества при параметре влияния НДС на скорость коррозионного процесса  $\beta = 0$ , что соответствует нейтральной среде.

3. Принимая в качестве стартовой найденную в процессе поиска оптимальную точку, выполняется первая уточняющая идентификация математической модели по экспериментальным данным и определяется значение  $\beta$ , которое больше нуля. Далее из оптимальной точки, как из стартовой, выполняется первая уточняющая оптимизация объекта. Полученное значение целевой функции оказывается большим, чем оптимальное, определенное для нейтральной среды.

4. Из новой, полученной таким образом точки, подозреваемой на экстремум, выполняется еще несколько уточняющих идентификаций и оптимизаций до тех пор, пока улучшение целевой функции и изменение оптимизируемых параметров уже не происходит. В этом случае считается, что процесс поиска завершен. Параметр  $\beta$  достигает оптимальной величины, а целевая функция и параметры конструкции приобретают оптимальные значения. Обычно требуется три-четыре уточняющие идентификации и оптимизации, чтобы процесс поиска сошелся.

5. Для контроля из произвольной точки оптимизируемых параметров при “оптимальном” значении параметра влияния НДС  $\beta$  выполняется оптимизация объекта. Полученные значения целевой функции и параметры конструкции должны практически совпасть с найденными в результате уточняющих идентификаций и оптимизаций.

## Выводы

1. В результате проведения многократной идентификации математических моделей коррозионного разрушения получена зависимость параметра влияния НДС на скорость коррозионного процесса от жесткости поперечных сечений конструкции при ее оптимизации. Таким образом, параметр влияния НДС не является постоянной величиной, а является функцией жесткости конструкции при ее оптимальном проектировании.

2. Установлено наличие “оптимального” значения параметра влияния НДС на скорость коррозии, основное свойство которого – его соответствие оптимальной жесткости конструкции. Если жесткость конструкции в процессе ее эволюции изменяется пропорционально целевой функции, то нали-

чие оптимальной жесткости соответствует достижению оптимального состояния конструкции по выбранному критерию качества.

3. Конструкция, находящаяся в оптимальном состоянии, обладает наименьшей скоростью коррозии, вызванной влиянием НДС.

4. Рассмотрены теоретические аспекты исследуемой проблемы: сформулирована и доказана теорема о зависимости функции влияния НДС на скорость коррозионного процесса от жесткости оптимизируемой конструкции; приведена методика определения параметров математической модели коррозионного разрушения, обеспечивающих эволюционный переход конструкции в оптимальное состояние.

## Резюме

Проведено числові дослідження залежності функції впливу напружено-деформованого стану конструкції на швидкість корозійного процесу від жорсткості конструкції, що оптимізується. При оптимальному проектуванні конструкцій, що взаємодіють з агресивним середовищем, запропоновано використання методу багаторазової ідентифікації математичних моделей корозійного руйнування. Досліджуються теоретичні аспекти проблеми. Приведено методику визначення параметрів математичної моделі корозійного руйнування, що забезпечують еволюційний перехід конструкції в оптимальний стан.

1. *Алексеев Б. Г., Зеленцов Д. Г., Почтман Ю. М.* Оптимальное проектирование ферм, подверженных коррозионному износу, на основе метода конечных элементов // Соппротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1991. – Вып. 59. – С. 72 – 76.
2. *Зеленцов Д. Г.* Расчет конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах. Стержневые системы. – Днепропетровск: УГХТУ, 2002. – 168 с.
3. *Колесник И. А., Зеленцов Д. Г., Храпач Ю. А.* Об определении рациональной формы статически неопределимых стержневых конструкций с учетом воздействия агрессивных сред // Theoretical Foundations of Civil Engineering. – Warsaw, 2001. – P. 89 – 94.
4. *Овчинников И. Г., Почтман Ю. М.* Тонкостенные конструкции в условиях коррозионного износа. Расчет и оптимизация. – Днепропетровск: ДГУ, 1995. – 192 с.
5. *Петров В. В., Овчинников И. Г., Шихов Ю. М.* Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой. – Саратов: СГУ, 1987. – 288 с.
6. *Овчинников И. Г., Хадеев В. М.* Расчет конструкций, подверженных коррозионному износу. – Иваново: ИИСИ, 1991. – 102 с.
7. *Филатов Г. В.* Оптимальне проектування конструкцій методами випадкового пошуку. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2003. – 433 с.

Поступила 10. 01. 2009