

УДК624.04

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ КОРРОЗИИ И ПОВРЕЖДЕННОСТИ МАТЕРИАЛА

**М. М. Фридман**, канд. техн. наук,  
[mark17@i.ua](mailto:mark17@i.ua)  
ORCID: 0000-0003-3819-2776

Криворожский металлургический  
институт Национальной  
металлургической академии  
Украины,  
50006, Украина, Днепропетровская обл.,  
г. Кривой Рог, ул. Степана Тильги, 5

*Многие ответственные элементы строительных и машиностроительных конструкций при своей эксплуатации находятся в сложных условиях работы (высокая температура, агрессивная среда и т.д.). В этом случае они могут быть подвержены двойному эффекту: коррозии и поврежденности материала. Коррозия приводит к уменьшению сечения конструкции, в результате чего в ней увеличиваются напряжения. В свою очередь, поврежденность материала сопровождается появлением в нем микротрещин и пустот, в результате неупругой деформации (ползучести), что приводит к ухудшению его физических характеристик (например, модуля упругости) и резкому снижению величин напряжений, при которых происходит разрушение конструкции. В этой работе рассматривается оптимизация изгибаемых элементов прямоугольного сечения, эксплуатируемых в условиях, способствующих появлению как коррозии, так и поврежденности материала. В качестве уравнения коррозии принимается модель В. М. Долинского, учитывающая влияние напряжений на коррозионный износ конструкций. Как кинетическое уравнение, описывающее изменение поврежденности материала, используется модель Ю. Н. Работнова. Критерием оптимальности служит минимум массы конструкции. Оптимизируется высота изгибаемого прямоугольного элемента по его длине с использованием принципа равноповрежденности в конечный момент жизни конструкции. Предложенный в работе подход может быть использован при решении аналогичных задач оптимального проектирования конструкций, работающих в условиях коррозии и поврежденности материала, с использованием как аналитических решений, так и численных методов.*

**Ключевые слова:** коррозия, поврежденность материала, оптимизация.

### Введение

Конструкции, эксплуатируемые в определенных условиях (высокая температура, агрессивная среда и т.д.) могут быть подвержены двойному эффекту: коррозии и поврежденности материала. Первый фактор приводит к уменьшению сечения конструкции и, как следствие, к увеличению в ней напряжений. Что касается поврежденности материала: появления в нем микротрещин и пустот, в результате неупругой деформации (ползучести), то она приводит к ухудшению физических характеристик (например, модуля упругости) и резкому снижению величин напряжений, при которых происходит разрушение конструкции. Для учета повреждений Л. М. Качановым [1, 2] предложена кинетическая модель изменения поврежденности материала, характеризующаяся параметром сплошности, изменяющимся от 1 в исходном состоянии до 0 в момент разрушения. В работе Ю. Н. Работнова [3] используется аналогичное уравнение кинетики поврежденности материала, где в качестве изменяющегося параметра принята величина поврежденности  $\bar{\omega}$ , изменяющаяся от 0 до 1. Другие модификации данной модели выполнены в работах Я. Леметри и Я. Л. Чебоши [4, 5]. Используя принцип «отделимости» и введя параметр нормированного времени, зависящего от напряжения, вышеперечисленные модели (в случае одномерных растягивающих напряжений) модернизированы в работе В. П. Голуба [6]. Новый подход определения поврежденности конструкций иллюстрирован на примере статических и циклических нагрузок. Оригинальная модель поврежденности предложена также Л. А. Сосновским и С. С. Щербаковым [7]. Обзору исследований данного направления посвящены работы [8, 9].

Проблемы оптимизации конструкций, эксплуатируемых в условиях поврежденности материала, изложены в публикациях А. Г. Костюка [10–14].

Оптимизация элементов конструкций в условиях коррозии рассмотрена в работах [15–19].

В данной статье проведено исследование в области оптимального проектирования конструкций с учетом двух факторов: коррозии и поврежденности материала на примере изгибаемых элементов прямоугольного сечения.

**Постановка задачи**

Рассмотрим оптимизацию изгибаемых элементов прямоугольного сечения, эксплуатируемых в условиях коррозии и поврежденности материала. Критерием оптимальности принимается минимум массы конструкции. Оптимизируется высота изгибаемого прямоугольного элемента по его длине с использованием принципа равноповрежденности в конечный момент жизни конструкции, смысл которого будет пояснен ниже.

В качестве уравнения коррозии принимается модель В. М. Долинского [20], учитывающая влияние напряжений на коррозионный износ конструкций (рис. 1)

$$\frac{dH}{dt} = -2(\alpha + \beta|\sigma_{\max}|), \quad (1)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – постоянные коэффициенты;  $H_0$  и  $H$  – начальная и текущая высота прямоугольного сечения;  $\sigma_{\max}$  – максимальные напряжения в текущем сечении.

Принимается, что коррозии подвержены верхняя и нижняя грани сечения, причем в одинаковой степени (посредством взятия по модулю максимальных напряжений), о чем и свидетельствует коэффициент 2 в (1).

В качестве кинетического уравнения, описывающего изменение (от 0 до 1) параметра поврежденности материала  $\bar{\omega}$ , принимается модель Ю. Н. Работнова [3]

$$\frac{d\bar{\omega}}{dt} = a_k \left( \frac{\sigma_{\max}}{1 - \bar{\omega}} \right)^{b_k}, \quad (2)$$

где  $a_k$  и  $b_k$  – константы.

Так как поврежденность материала обычно происходит при высоких температурах, при определении напряжений в балке будем учитывать эффект ползучести. Считаем, что скорость деформации зависит от напряжения по степенному закону, т.е. закон ползучести принимается в виде [3]

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^n, \quad (3)$$

где  $A_1$  и  $n$  – постоянные при данной температуре величины.

При  $n=1$  получаем распределение напряжений в упругом элементе, при  $n \rightarrow \infty$  – в элементе из идеально пластического материала. На практике значение  $n$  обычно не превышает 12.

С учетом гипотезы плоских сечений  $\dot{\epsilon} = \dot{\chi}z$ , из (3) находим

$$\sigma = k\dot{\epsilon}^{1/n} = k(\dot{\chi}z)^{1/n}, \quad (4)$$

где  $k = 1/A_1^n$ ;  $\dot{\chi}$  – скорость изменения кривизны нейтрального слоя.

Принимая ширину прямоугольного сечения постоянной по длине балки и равной  $B$ , запишем выражение для изгибающего момента в сечении  $x$  при произвольном моменте времени  $t$

$$M(x) = \int \sigma z dA = k(\dot{\chi})^{1/n} * 2B \int_0^{H/2} z^{1+1/n} dz = \frac{k(\dot{\chi})^{1/n} BH^{2+1/n}}{2^{1+1/n}(2+1/n)}.$$

Отсюда  $k(\dot{\chi})^{1/n} = \frac{M 2^{1+1/n}(2+1/n)}{BH^{2+1/n}}.$

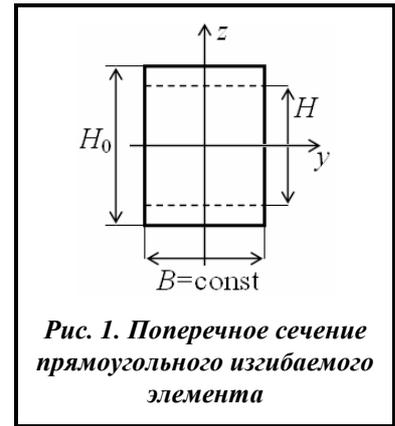
Подставляя это выражение в (4), при  $z=H/2$ , имеем

$$\sigma_{\max} = \frac{Mm}{BH^2}, \quad (5)$$

где  $m=2(2+1/n)$ .

В этом случае, с учетом (5), уравнения (1) и (2) имеют вид

$$\frac{dH}{dt} = -2\left(\alpha + \frac{\beta Mm}{BH^2}\right), \quad (6)$$



**Рис. 1. Поперечное сечение прямоугольного изгибаемого элемента**

$$\frac{d\bar{\omega}}{dt} = a_k \left( \frac{Mm}{BH^2} \right)^{b_k} \frac{1}{1-\bar{\omega}} \quad (7)$$

### Решение уравнений коррозии и поврежденности материала

Сравнивая уравнения (6) и (7), можно прийти к выводу, что процесс коррозии не зависит от поврежденности материала, в то время как  $\bar{\omega}(t)$  зависит от коррозии. В силу этого уравнение коррозии можно рассматривать отдельно. При его решении учитывается влияние напряженного состояния на кинетику коррозии.

Разделим переменные в уравнении (6) и проинтегрируем обе части

$$\int_{H_0}^{H_T} \frac{dH}{1 + \frac{\beta Mm}{BH^2 \alpha}} = -2\alpha \int_0^T dt,$$

где  $T$  – время жизни конструкции.

После интегрирования имеем

$$2\alpha T = H_0 - H_T + \sqrt{\frac{\beta Mm}{B\alpha}} \left( \arctg H_T \sqrt{\frac{B\alpha}{\beta m M}} - \arctg H_0 \sqrt{\frac{B\alpha}{\beta m M}} \right). \quad (8)$$

Для решения уравнения (7) разделим переменные и, подставив из уравнения (6) выражение  $dt$ , проинтегрируем обе части

$$\int_0^1 (1-\bar{\omega})^{b_k} d\bar{\omega} = -\frac{a_k}{2\alpha} \left( \frac{Mm}{B} \right)^{b_k} \int_{H_0}^{H_T} \frac{dH_1}{H_1^{2b_k-2} \left( H_1^2 + \frac{\beta Mm}{B\alpha} \right)}.$$

Принимая  $b_k > 1,5$  (что наиболее часто встречается на практике), после интегрирования имеем

$$\frac{1}{b_k+1} = \frac{a_k}{2\beta} \left( \frac{Mm}{B} \right)^{b_k-1} \left[ \frac{1}{2b_k-3} \left( \frac{1}{H_T^{2b_k-3}} - \frac{1}{H_0^{2b_k-3}} \right) + \int_{H_0}^{H_T} \frac{dH_1}{H_1^{2b_k-4} \left( H_1^2 + \frac{\beta Mm}{B\alpha} \right)} \right]. \quad (9)$$

### Задача оптимизации

В результате получено два уравнения (8) и (9) с двумя неизвестными:  $H$  и  $H_0$ . Решая их совместно для каждого фиксированного значения  $x$ , из принципа равноповрежденности в конечный момент жизни конструкции (когда  $\bar{\omega} = 1$ ), находится оптимальное распределение высот изгибаемого элемента  $H_0(x)$  по его длине, дающее минимум массы конструкции. Последнее утверждение справедливо в силу зависимости

$$V = \int_0^L A(x) dx = 2B \int_0^L H_0(x) dx.$$

### Частные случаи решения

Полученное интегральное выражение поврежденности материала (9) удастся упростить в двух частных случаях. Так, при  $b_k = 2$  имеем

$$\frac{2\beta B}{3a_k Mm} = \frac{1}{H_T} - \frac{1}{H_0} + \sqrt{\frac{B\alpha}{\beta Mm}} \left( \arctg H_T \sqrt{\frac{B\alpha}{\beta Mm}} - \arctg H_0 \sqrt{\frac{B\alpha}{\beta Mm}} \right). \quad (10)$$

При  $b_k = 3$  получим

$$\frac{\beta}{2a_k} \left( \frac{B}{mM} \right)^2 = \frac{1}{3H_T^3} - \frac{1}{3H_0^3} + \frac{B\alpha}{\beta Mm} \left( \frac{1}{H_T} - \frac{1}{H_0} \right) + \left( \frac{B\alpha}{\beta Mm} \right)^{3/2} \left( \operatorname{arctg} H_0 \sqrt{\frac{B\alpha}{\beta Mm}} - \operatorname{arctg} H_T \sqrt{\frac{B\alpha}{\beta Mm}} \right) \quad (11)$$

В качестве примера рассмотрим оптимизацию консольной балки с силой  $F$  на конце (рис. 2). В этом случае  $M=Fx$ .

Переходя к безразмерным величинам, обозначив  $T_* = 2\alpha T \sqrt{\frac{B\alpha}{\beta mFL}}$ ,

$$\xi = x/L, \quad \chi_0 = H_0 \sqrt{\frac{B\alpha}{\beta mFL}}, \quad \chi_T = H_T \sqrt{\frac{B\alpha}{\beta mFL}}, \quad D = \frac{2\beta}{3a_k} \sqrt{\frac{B\beta}{mFL\alpha}},$$

$D_1 = \frac{\beta}{2a_k} \sqrt{\frac{B\beta^3}{mFL\alpha^3}}$ , имеем следующие трансформации уравнений (8), (10) и (11):

$$T_* = \chi_0 - \chi_T + \sqrt{\xi} \operatorname{arctg} \frac{(\chi_T - \chi_0)\sqrt{\xi}}{\xi + \chi_T\chi_0}. \quad (12)$$

$$D = \frac{\xi}{\chi_T} - \frac{\xi}{\chi_0} + \sqrt{\xi} \operatorname{arctg} \frac{(\chi_T - \chi_0)\sqrt{\xi}}{\xi + \chi_T\chi_0}. \quad (13)$$

$$D_1 = \frac{\xi^2}{3} \left( \frac{1}{\chi_T^3} - \frac{1}{\chi_0^3} \right) + \xi \left( \frac{1}{\chi_0} - \frac{1}{\chi_T} \right) - \sqrt{\xi} \operatorname{arctg} \frac{(\chi_T - \chi_0)\sqrt{\xi}}{\xi + \chi_T\chi_0}. \quad (14)$$

Остановимся вначале на решении задачи в случае  $b_k=2$ . Вычитая уравнение (13) из (12), получим

$$T_* - D = \chi_0 - \chi_T + \frac{\xi}{\chi_0} - \frac{\xi}{\chi_T}.$$

Отсюда

$$\chi_T = A_2 - \sqrt{A_2^2 - \xi},$$

где

$$A_2 = \left( \chi_0 + \frac{\xi}{\chi_0} + D - T_* \right) / 2 \quad (15)$$

Подставив выражение (15), например, в (12), имеем трансцендентное уравнение с одним неизвестным  $\chi_0$ . Задаваясь  $0 \leq \xi \leq 1$ , его решение можно найти, например, с помощью одного из эффективных алгоритмов метода случайного поиска [21].

В случае  $b_k=3$ , складывая уравнение (12) и (14), получим

$$T_* + D = \chi_0 - \chi_T + \frac{\xi^2}{3} \left( \frac{1}{\chi_T^3} - \frac{1}{\chi_0^3} \right) + \xi \left( \frac{1}{\chi_0} - \frac{1}{\chi_T} \right).$$

Записывая это выражение относительно  $\chi_T$ , имеем следующее уравнение:

$$\chi_T^4 + \left( T_* + D_1 - \chi_0 + \frac{\xi^2}{3\chi_0^3} - \frac{\xi}{\chi_0} \right) \chi_T^3 + \xi \chi_T^2 - \frac{\xi^2}{3} = 0.$$

Для его решения применим метод Феррари. Тогда  $\chi_T = y - b$ , где  $b = (T_* + D_1 - \xi/\chi_0 + \xi^2/3\chi_0^3)/4$ ;  $y = \sqrt{t/2} - \sqrt{-p - t/2 - q/\sqrt{2t}}$ ;  $p = 3c - 3b^2$ ;  $q = 4b^3 - 6cb$ ;  $c = \xi/6$ ;

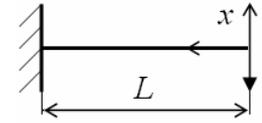


Рис. 2. Расчетная схема балки

$$t = z_1 - r_1/3; \quad z_1 = \sqrt[3]{-q_1/2 + \sqrt{D_*}} + \sqrt[3]{-q_1/2 - \sqrt{D_*}}; \quad D_* = (p_1/3)^3 + (q_1/2)^2; \quad p_1 = (3s_1 - r_1^2)/3;$$

$$r_1 = 6c - 6b^2; \quad q_1 = 2r_1^3/27 - r_1s_1/3 + t_1; \quad t_1 = -q^2; \quad s_1 = p^2 - r; \quad r = 6cb^2 + e - 3b^4; \quad e = -\xi^2/3.$$

После того как найдена зависимость между  $\chi_0$  и  $\chi_T$ , задаваясь  $0 \leq \xi \leq 1$ , решается уравнение (12), как в предыдущем случае, с помощью метода случайного поиска. В результате в обоих случаях (при  $b_k=2$  и  $b_k=3$ ) имеем оптимальное по высоте очертание консольной балки минимальной массы.

### Численные результаты

В качестве численной иллюстрации рассмотрим следующие варианты расчета: при  $b_k=2$ :  $T_a^*=1$ ,  $D_a=0,5$  и  $T_b^*=0,8$ ,  $D_b=0,4$ ; при  $b_k=3$ :  $T_c^*=1$ ,  $D_{1c}=0,375$  и  $T_d^*=0,8$ ,  $D_{1d}=0,3$ . Условно принимаем, что варианты  $b$  и  $d$  соответствуют упругому элементу ( $n=1, m=6$ ), а варианты  $a$  и  $c$  – элементу из идеально-пластического материала ( $n \rightarrow \infty; m=4$ ). Поэтому  $T_a^*/T_b^* = D_a/D_b = T_c^*/T_d^* = D_{1c}/D_{1d}$ . Выбор коэффициентов

$D_1$  по отношению к коэффициентам  $D$  в соответствующих вариантах можно осуществить следующим образом. Так как  $D_1/D = 3/4 \cdot \beta/\alpha$ , то, принимая  $\beta/\alpha=1$ , имеем  $D_1=0,75D$ .

Оптимальные очертания высоты консольной балки  $\chi_0(\xi)$  и ее вид в момент разрушения (конечный момент жизни конструкции)  $\chi_T(\xi)$  для всех вариантов показан на рис. 3.

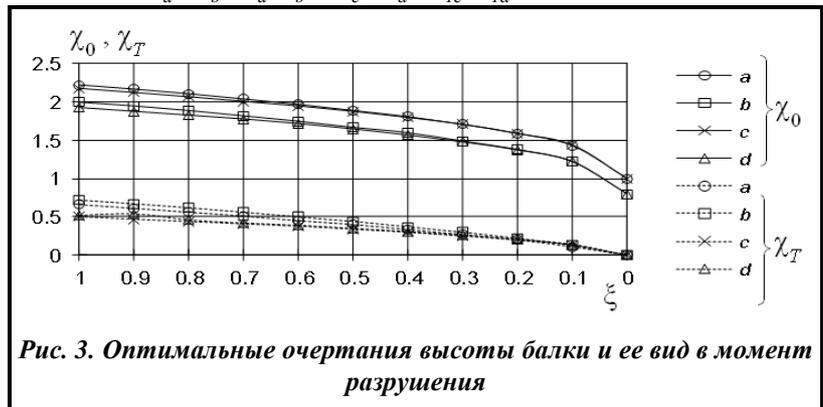


Рис. 3. Оптимальные очертания высоты балки и ее вид в момент разрушения

### Выводы

Поставлена и решена задача оптимального проектирования изгибаемых элементов прямоугольного сечения, эксплуатируемых в условиях коррозии и поврежденности материала.

Что касается полученных результатов, то, как видно из рис. 3, во всех оптимальных проектах  $\chi_T(0)=0$ , а  $\chi_0(0)=T^*$ . Первое равенство свидетельствует о том, что нет перерасхода материала в сечении с нулевым напряжением. В свою очередь, неравенство нулю  $\chi_0(0)$  объясняется тем, что коррозия действует и в ненапряженном сечении, а его величина вытекает непосредственно из уравнения (12) при  $\chi_T=0$  и  $\xi \rightarrow 0$ .

Сравнивая оптимальные проекты  $a$  и  $c$ , соответственно, с проектами  $b$  и  $d$ , можно прийти к выводу, что учет ползучести дает увеличение начальной массы консольных балок в среднем на 15%; при этом величина напряжения, при которой происходит разрушение, также увеличивается, о чем свидетельствует параметр  $\chi_T(\xi)$ .

Изменение величины  $b_k$  (при равном  $T^*$ ) незначительно отражается на оптимальном очертании  $\chi_0(\xi)$ . При этом она существенно влияет на величину напряжения в момент разрушения, причем чем больше  $b_k$ , тем оно выше.

В заключение следует отметить, что предложенный подход к решению задач оптимального проектирования конструкций, работающих в условиях коррозии и поврежденности материала, может быть реализован при решении аналогичных задач, с использованием как аналитических решений, так и с помощью численных методов.

### Литература

1. Качанов Л. М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 308 с.
2. Качанов Л. М. О времени разрушения в условиях ползучести. *Изв. АН СССР. Отд-ние техн. наук.* 1985. № 8. С. 26–31.
3. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
4. Lemaitre J. How to use damage mechanics. *Nucl. Eng. Design.* 1984. Vol. 80. Iss. 2. P. 233–245. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(84\)90169-9](https://doi.org/10.1016/0029-5493(84)90169-9)

5. Chaboche J.-L. Continuous damage mechanics – a tool describe phenomena before crack initiation. *Nucl. Eng. Design*. 1981. Vol. 64. Iss. 2. P. 233–247. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(81\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0029-5493(81)90007-8)
6. Golub, V. P. Non-linear one-dimensional continuum damage theory. *Int. J. Mech. Sci.* 1996. Vol. 38. Iss. 10. P. 1139–1150. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(95\)00106-9](https://doi.org/10.1016/0020-7403(95)00106-9)
7. Сосновский Л. А., Щербаков С. С. Концепции поврежденности материалов. *Вестн. Тернопол. Нац. Техн. ун-та*. 2011. Спецвыпуск (1). С. 14–23.
8. Травин В. Ю. Оценка поврежденности материала при расчете прочности и долговечности элементов корпусных конструкций. *Изв. Тул. ун-та. Сер. Техн. науки*. 2014. Вып. 10. Ч. 1. С. 128–132.
9. Волегов П. С., Грибов Д. С., Трусов П. В. Поврежденность и разрушение: классические континуальные теории. *Физ. мезомеханика*. 2015. Т. 18. № 4. С. 68–86.
10. Костюк А. Г. Определение профиля вращающегося диска в условиях ползучести. *Прикл. математика и механика*. 1953. Т. 17. № 5. С. 615–618.
11. Рейтман М. И. Теория оптимального проектирования конструкций, сделанных из пластика, принимая во внимание фактор времени. *Механика полимеров*. 1967. № 2. С. 357–360.
12. Prager W. Optimal structural design for given stiffness in stationary creep. *J. Appl. Math. and Physics*. 1968. Vol. 19. Iss. 2. P. 252–256. <https://doi.org/10.1007/BF01601470>
13. Немировский Ю. В. Задача оптимального проектирования дисков в условиях ползучести. *Проблемы прочности*. 1971. № 8. С. 11–13.
14. Zyczkowski M. Optimal structural design in rheology. *J. Appl. Mech.* 1971. Vol. 38. Iss. 1. P. 39–46. <https://doi.org/10.1115/1.3408764>
15. Почтман Ю. М., Фридман М. М. Методы расчета надежности и оптимального проектирования конструкций, функционирующих в экстремальных условиях. Днепропетровск: Наука и образование, 1997. 134 с.
16. Fridman M. M., Zyczkowski M. Structural optimization of elastic columns under stress corrosion conditions. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2001. Vol. 21. Iss. 3. P. 218–228. <https://doi.org/10.1007/s001580050186>
17. Fridman M. M., Elishakoff I. Buckling optimization of compressed bars undergoing corrosion. *Ocean Systems Engineering*. 2013. Vol. 3. Iss. 2. P. 123–136. <https://doi.org/10.12989/ose.2013.3.2.123>
18. Fridman M. M., Elishakoff I. Design of bars in tension or compression exposed to a corrosive environment. *Ocean Systems Engineering*. 2015. Vol. 5. Iss. 1. P. 21–30. <https://doi.org/10.12989/ose.2015.5.1.021>
19. Фридман М. М. Оптимальное проектирование трубчатых стержневых конструкций, подверженных коррозии. *Проблемы машиностроения*. 2016. Т. 19. № 3. С. 37–42. <https://doi.org/10.15407/pmach2016.03.037>
20. Долинский В. М. Расчет нагруженных труб, подверженных коррозии. *Хим. и нефт. машиностроение*. 1967. № 2. С. 21–30.
21. Гурвич Н. Б., Захарченко В. Г., Почтман Ю. М. Рандомизированный алгоритм для решения задач нелинейного программирования. *Изв. АН СССР. Техн. кибернетика*. 1979. № 5. С. 15–17.

*Поступила в редакцию 17.04.2019*

## **Оптимальне проектування елементів, що згинаються, в умовах корозії й пошкоджуваності матеріалу**

**М. М. Фрідман**

Криворізький металургійний інститут Національної металургійної академії України,  
50006, Україна, Дніпропетровська обл., м. Кривий Ріг, вул. Степана Тільги, 5

*Багато відповідальних елементів будівельних і машинобудівних конструкцій під час своєї експлуатації перебувають в складних умовах роботи (висока температура, агресивне середовище тощо). У цьому випадку вони можуть бути схильні до подвійного ефекту: корозії і пошкодження матеріалу. Корозія призводить до зменшення перерізу конструкції, через що в ній збільшуються напруження. У свою чергу, пошкодженість матеріалу супроводжується появою в ньому мікротріщин і порожнеч, в результаті непружної деформації (повзучості), що призводить до погіршення його фізичних характеристик (наприклад, модуля пружності) і різкого зниження величин напружень, за яких відбувається руйнування конструкції. У цій роботі розглядається оптимізація елементів прямокутного перерізу, що згинаються та експлуатуються в умовах, які сприяють появі як корозії, так і пошкодженню матеріалу. Як рівняння корозії приймається модель В. М. Долинського, що враховує вплив напружень на корозійний знос конструкцій. Як кінетичне рівняння, що описує зміну пошкодження матеріалу, використовується модель Ю. М. Работнова. Критерієм оптимальності служить мінімум маси конструкції. Оптимізується висота*

*згинального прямокутного елемента за його довжиною з використанням принципу рівнопошкоджуваності в кінцевий момент життя конструкції. Запропонований в роботі підхід може бути використаний під час розв'язання аналогічних задач оптимального проектування конструкцій, що працюють в умовах корозії і пошкодження матеріалу, з використанням як аналітичних розв'язків, так і числових методів.*

**Ключові слова:** *корозія, антикорозійні покриття, оптимізація.*