

УДК 621.791:539.375

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

**А.А. Миронов, В.М. Волков**

*Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева*

Решается задача оценки надежности сварных тонкостенных конструкций при статическом нагружении. Стохастический характер прочности конструкций обусловлен дефектностью сварных соединений. В качестве критерия разрушения для поверхностных дефектов используется ранее предложенное авторами условие достижения максимальной величиной мембранной составляющей пластического раскрытия трещины критического значения. Плотность распределения вероятностей глубины дефектов определяется по соответствующей плотности для обнаруженных дефектов и вероятности обнаружения дефектов (POD). Для распределения случайной величины числа трещиноподобных дефектов по закону Пуассона задача сводится к определению вероятности отсутствия в сварном соединении трещин с раскрытием, превышающим допускаемое значение. Рассмотрен случай исправления недопустимых дефектов, когда надежность соединения определяется пропущенными при контроле дефектами. Приведены численные расчеты надежности сварных соединений по результатам их ультразвукового контроля.

**Ключевые слова:** сварное соединение, дефект, критерий разрушения, вероятность обнаружения дефекта, надежность.

### **Введение**

Рассматривается проблема оценки надежности тонкостенных конструкций для случая, когда стохастический характер их прочности связан с дефектностью сварных соединений. Параметры, определяющие условия нагружения и свойства материала, считаются детерминированными величинами. Дефектность сварных соединений оценивается по результатам их неразрушающего контроля.

В рамках рассматриваемой проблемы требуется решение следующих задач: формулировка критерия разрушения элемента конструкции, содержащего несквозной дефект в виде несплошности материала; определение фактических параметров дефектов сварного соединения по данным неразрушающего контроля; построение расчетной модели надежности сварного соединения, содержащего дефекты.

### **1. Критерий разрушения**

Наиболее опасными являются трещиноподобные дефекты. Под разрушением тонкостенного элемента конструкции с несквозным трещиноподобным дефектом

будем понимать разрушение ослабленной дефектом части толщины элемента с образованием сквозного дефекта, что приводит к нарушению герметичности и является недопустимым для таких объектов, как сосуды давления, трубопроводы. Рассматриваемая задача имеет ряд особенностей. Как показывают многочисленные исследования [1–3], разрушение в условиях нормальных температур носит вязкий характер и сопровождается переходом ослабленной дефектом части толщины элемента в пластическую стадию деформирования, что требует использования критериев нелинейной механики разрушения. Несквозной дефект в виде плоской трещины представляет собой двумерный объект и характеризуется, как минимум, двумя параметрами: глубиной и протяженностью. Критерий разрушения должен отражать совокупность критических значений этих параметров.

В работе [4] показана возможность использовать в качестве критерия разрушения тонкостенных элементов конструкций с поверхностными трещинами условие достижения максимальной величиной мембранной составляющей раскрытия трещины критического значения:

$$\delta = \delta_c. \quad (1)$$

К преимуществам данного критерия относятся линейность постановки задачи в рамках модели Дагдейла и учет поддерживающей роли прилегающих к дефекту областей, проявляющейся в способности материала деформироваться без разрушения после достижения в ослабленном сечении предела прочности.

Величина раскрытия трещины для случая плоских элементов конструкций определяется выражением:

$$\delta = \alpha c, \quad (2)$$

где

$$\alpha = \frac{4\sigma_F}{\pi E} \left( \frac{\sigma_R}{\sigma_F} - 1 + \frac{h}{s} \right) \ln \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}, \quad \phi = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sigma - (1 - h/s)\sigma_F}{\sigma_R - (1 - h/s)\sigma_F},$$

$c$  – полудлина и  $h$  – глубина трещины,  $s$  – толщина элемента конструкции,  $\sigma$  – напряжение растяжения элемента конструкции,  $\sigma_F$  – напряжение в сечении  $s - h$ ,  $\sigma_R$  – напряжение в пластической области на линии продолжения трещины. Для случая вязкого разрушения  $\sigma_F$  принимается равным пределу прочности,  $\sigma_R$  – полусумме пределов прочности и текучести материала. В практических расчетах следует учитывать, что положительные значения раскрытия трещины реализуются при выполнении условия  $h > s(1 - \sigma/\sigma_F)$ .

## 2. Параметры дефектов сварного соединения

Данные о дефектах, получаемые по результатам неразрушающего контроля, зависят от надежности контроля. Показателем надежности контроля является вероятность  $P(h)$  обнаружения дефекта (ВОД), локализованного в области поиска, которая зависит от глубины дефекта  $h$  и метода контроля [5, 6].

Зависимость  $P(h)$  для ультразвукового контроля может быть получена из анализа корреляционной связи «амплитуда сигнала – глубина дефекта». Результаты исследований такой связи для эхо-метода и зеркально-теневого метода контроля приведены в [7].

На амплитуду сигнала, отраженного от дефекта, влияет множество факторов: форма, шероховатость, объемность, заполненность, ориентация дефекта, – что поз-

воляет для условной плотности распределения вероятностей случайной величины амплитуды ультразвукового сигнала  $A$  принять нормальный закон:

$$f(a/h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}d_{a/h}} e^{-(a-m_{a/h})^2/(2d_{a/h}^2)}.$$

Значение ВОД в этом случае получим из выражения:

$$P(h) = P(A > a_n) = \int_{a_n}^{\infty} f(a/h) da = 1 - \Phi\left(\frac{a_n - m_{a/h}}{d_{a/h}}\right),$$

где  $a$  – порог фиксации ультразвукового сигнала, а

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Плотность распределения вероятностей глубины обнаруженных дефектов  $f_{0h}(h)$  определяется на основе гистограмм результатов неразрушающего контроля. Использование понятия ВОД как отношения числа обнаруженных дефектов к числу всех дефектов при фиксированной их глубине позволяет осуществить переход от гистограмм обнаруженных дефектов к гистограммам всех дефектов и в пределе получить связь между плотностями распределения вероятностей глубины обнаруженных  $f_{0h}(h)$  и всех дефектов  $f_h(h)$ :

$$f_h(h) = \frac{f_{0h}(h)}{P(h)} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda},$$

где

$$\lambda = \lambda_0 \int_0^{\infty} \frac{f_{0h}(h)}{P(h)} dh$$

– интенсивность (число дефектов, приходящееся на единицу длины сварного соединения) всех дефектов;  $\lambda_0$  – интенсивность обнаруженных дефектов.

### 3. Расчетная модель надежности сварного соединения

Условие безотказной работы сварного соединения, содержащего дефект в виде трещины, записывается с учетом критерия разрушения (1) в виде:

$$\Delta_c - \Delta > 0,$$

где  $\Delta$ ,  $\Delta_c$  – соответственно раскрытие и критическое раскрытие трещины – независимые случайные величины.

Надежность сварного соединения с трещиноподобным дефектом определяется выражением [8]:

$$R_1 = P(\Delta_c - \Delta > 0) = \int_0^{\infty} f_{\delta}(\delta) \int_{\delta}^{\infty} f_{\delta_c}(\delta_c) d\delta_c d\delta = 1 - \int_0^{\infty} f_{\delta}(\delta) F_{\delta_c}(\delta) d\delta. \quad (3)$$

При отсутствии статистических данных по критической величине раскрытия трещины используем детерминированное значение допускаемой величины раскрытия  $[\delta]$ . В этом случае выражение (3) примет вид:

$$R_1 = 1 - \int_{[\delta]}^{\infty} f_{\delta}(\delta) d\delta.$$

Закон распределения  $f_{\delta}(\delta)$  определяется через плотности распределения вероятностей  $f_h(h)$  и  $f_c(c)$ :

$$f_{\delta}(\delta) = \int_0^{\infty} f(\delta/h) f_h(h) dh,$$

где

$$f(\delta/h) = f_c(\alpha^{-1}\delta) \left| \frac{dc}{d\delta} \right| = f_c(\alpha^{-1}\delta) \alpha^{-1}$$

– условная плотность распределения вероятностей случайной величины раскрытия  $\Delta$ , выражение для которой получено с учетом зависимости (2).

Дефекты сварных соединений конструкции представляют собой последовательную систему. Для  $k$  дефектов надежность определяется выражением:

$$R(k) = \prod_{i=1}^k R_i.$$

Рассмотрим распределение случайной величины  $K$  числа трещиноподобных дефектов на участке сварного шва длиной  $x$  по закону Пуассона [9, 10]:

$$\Pi_k(x) = \frac{e^{-\lambda x} (\lambda x)^k}{k!}.$$

В этом случае согласно формуле полной вероятности надежность участка сварного шва определится выражением:

$$R(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \Pi_k(x) \prod_{i=0}^k R_i. \quad (4)$$

При одинаковых условиях нагружения и технологии сварки выражение (4) преобразуется к виду:

$$R(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \Pi_k(x) R_1^k = e^{-\lambda x(1-R_1)} = e^{-\lambda x \int_{[\delta]}^{\infty} f(\delta) d\delta} = e^{-m_{[\delta]}(x)}, \quad (5)$$

где  $m_{[\delta]}(x)$  – математическое ожидание на участке шва длиной  $x$  числа трещин с раскрытием, превышающим допустимое значение.

Полученное выражение (5) определяет надежность сварного соединения как вероятность отсутствия на рассматриваемом участке трещин с раскрытием, превышающим допустимое значение [9].

Рассмотрим совокупность сварных соединений конструкции, отличающихся условиями нагружения, технологией сварки. Выражение для надежности конструкции примет вид:

$$R = \prod_j R_j(x) = e^{-\sum_j m_{[\delta]_j}},$$

где  $R_j(x)$  определяется по выражению (5) для каждого типа сварного соединения.

Дефектность сварного соединения изменяется после проведения контроля и

исправления недопустимых дефектов. Надежность соединения в этом случае будет зависеть только от дефектов, пропущенных при контроле [9]. Плотность распределения вероятностей раскрытия для пропущенных дефектов определится выражением:

$$f_{\delta_*}(\delta) = \frac{\lambda}{\lambda_*} \int_0^{\infty} f(\delta/h)(1-P(h))f_h(h)dh,$$

где

$$\lambda_* = \lambda \int_0^{\infty} (1-P(h))f_h(h)dh$$

– интенсивность пропущенных дефектов.

Управлять надежностью конструкции со сварными соединениями можно объемом контроля и его достоверностью.

#### 4. Результаты расчетов

Для иллюстрации рассмотренного подхода к оценке надежности сварных соединений использованы результаты исследований дефектности швов, приведенные в работах [7, 10]. Для плотности распределения вероятностей протяженности дефектов при различных технологиях сварки по данным работы [10] принят закон Вейбулла:

$$f_c(2c) = 0,085(2c)^{-0,5} e^{-(2c)^{0,5}/5,9}.$$

Законы распределения вероятностей глубины непроваров для односторонних швов с разделкой кромок в зависимости от толщины свариваемых элементов приняты по данным работ [6, 7]:

$$f_h(h) = \frac{1}{1,045h} e^{-(\ln h - 0,429)^2/0,3478} \quad \text{– для толщины } s = 8 \text{ мм};$$

$$f_h(h) = \frac{1}{1,296h} e^{-(\ln h - 0,497)^2/0,5346} \quad \text{– для толщины } s = 10 \text{ мм}.$$

В расчетах использованы механические характеристики, соответствующие стали 10 [4]: предел текучести  $\sigma_{0,2} = 235$  МПа, предел прочности  $\sigma_b = 384$  МПа,  $\delta_c = 0,4$  мм,  $[\delta] = \delta_c/3 = 0,133$  мм. Оценка надежности сварных соединений выполнена для условий испытания при напряжениях  $\sigma = \sigma_{0,2}/1,1$ . Результаты расчетов надежности в зависимости от протяженности  $x$  и толщины  $s$  соединений при интенсивности дефектов  $\lambda = 1,5 \text{ м}^{-1}$  представлены на рис. 1.

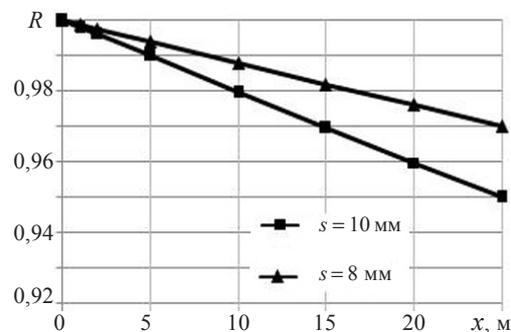


Рис. 1

Анализ изменения надежности сварного соединения в зависимости от объема контроля с последующим исправлением недопустимых дефектов выполнен на примере односторонних швов с разделкой кромок при толщине свариваемых элементов  $s = 10$  мм. Для оценки ВОД в анализе использованы данные по корреляционной зависимости «глубина непровара – амплитуда сигнала», полученные в работе [7]:  $m_{alh} = (7 + 0,95h)$  дБ,  $d_{alh} = 2,8$  дБ,  $a_n = 6$  дБ. Результаты расчетов надежности соединения в зависимости от его протяженности  $x$  и объема контроля  $V$  представлены на рис. 2.

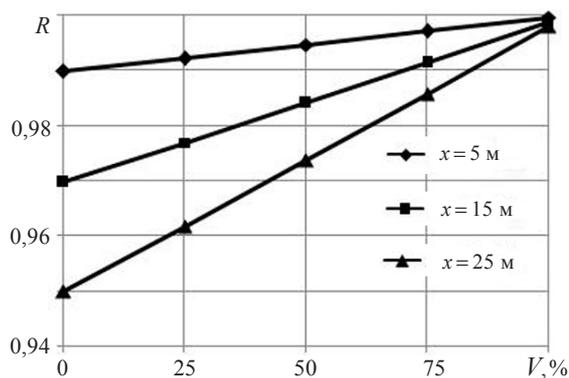


Рис. 2

Анализ результатов расчетов позволяет сделать ряд выводов. Получаемые оценки надежности сварного соединения в значительной степени зависят от точности описания закона распределения вероятностей глубины дефекта для относительно больших ее значений. Технология сварки, исключая появление дефектов большой глубины, обеспечивает требования по эксплуатационной надежности соединения. Математические методы оценки надежности сварных соединений позволяют проводить выбор необходимого объема контроля. Актуальность оценки надежности сварных соединений существенно возрастает при условии возможного роста дефектов по таким механизмам, как усталость, коррозионное растрескивание.

#### Литература

1. Даффи, А. О поведении дефектов в сосудах давления / А. Даффи, Р. Эйбер, У. Макси // Новые методы оценки сопротивления металла хрупкому разрушению. – М.: Мир, 1972. – С. 301–333.
2. Зайнуллин, Р.С. Несущая способность сварных сосудов с острыми поверхностными дефектами / Р.С. Зайнуллин // Сварочное производство. – 1981. – № 3. – С. 5–7.
3. Применение модели вязкого разрушения труб осевыми дефектами для анализа результатов натурных экспериментов / И.В. Орыняк [и др.] // Проблемы прочности. – 1996. – № 6. – С. 5–15.
4. Миронов, А.А. Модель разрушения оболочек с поверхностными трещинами / А.А. Миронов, В.М. Волков // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Н. Новгород. – 2006. – Вып. 68. – С. 45–51.
5. Шаталов, А.А. Современные проблемы неразрушающего контроля оборудования производственных объектов / А.А. Шаталов, И.Э. Власов, В.И. Иванов // Химическая техника. – 2003. – № 8. – С. 5–7.
6. Лукьянов, В.Ф. Технологическая наследственность как фактор надежности сварных соединений / В.Ф. Лукьянов // Вестник ДГТУ / Ростов н/Д. – 2005. – Т. 5, № 3(25). – С. 388–399.

7. Коновалов, Н.Н. Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений / Н.Н. Коновалов. – М.: ФГУП НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2004. – 132 с.

8. Волков, В.М. Предельная прочность, надежность и остаточный ресурс тонкостенных конструкций с повреждениями / В.М. Волков, А.А. Миронов, А.Е. Жуков // Надежность и ресурс в машиностроении: Вестник ВГАВТ / Н. Новгород. – 2006. – Вып. 16. – С. 36–52.

9. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

10. Волченко, В.Н. Оценка и контроль качества сварных соединений с применением статистических методов / В.Н. Волченко. – М.: Издательство стандартов, 1974. – 160 с.

[22.05.2009]

### **ESTIMATING THE RELIABILITY OF WELDED JOINTS OF THIN-WALLED STRUCTURES BASED ON THE RESULTS OF THEIR NONDESTRUCTIVE CONTROL**

**A.A. Mironov, V.M. Volkov**

The problem of estimating the reliability of welded thin-walled structures under static loading is solved. The stochastic nature of the stability of structures is determined by the presence of defects in welded joints. The earlier introduced by the present authors condition when the maximum value of the membrane component of the plastic crack opening reaches its critical value is used as the failure criterion for surface defects. The probability distribution density of the depth of defects is determined based on the corresponding density for detected defects and the probability of their detection. For the Poisson-type distribution of a random value of the number of crack-like defects, the problem is reduced to determining the probability of the absence in the welded joint of cracks with the opening in excess of the allowable value. A case of correcting unallowable defects is studied, where the reliability of the welded joints is determined by the defects overlooked during the inspection. Numerical analyses of the reliability of welded joints based on the results of the ultrasonic detection are presented.

**Key words:** welded joint, defect, failure criterion, defect detection probability, reliability.