

УДК 539.3

Канд. техн. наук Ю. В. Мاستиновский

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

## О РАСЧЕТЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ДИНАМИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

Рассматривается распространение волн напряжений в сварных соединениях с целью оценки концентрации напряжений в зоне сварного шва в зависимости от его геометрических и физических параметров. Задача решается методом двойных интегральных преобразований.

**Ключевые слова:** сварные соединения, волны напряжений, прочность, интегральные преобразования.

Определяющим при оценке динамической прочности любых конструкций является не статическая, а динамическая концентрация напряжений, обусловленная волновым характером распространения нагрузки [1]. Явления отражения, преломления, дифракции и интерференции волн, происходящих на границах раздела сред с различной структурой или вблизи их, могут приводить к концентрации напряжений в отдельных областях, что при определенных условиях может вызвать разрушение. Учитывая химическую и структурную неоднородность металла шва при сварке разнородных и однородных сталей, следует ожидать возникновения динамической концентрации напряжений в нем.

Предположим, что модель сварного шва представляет плоскую трехслойную среду (рис. 1), каждый слой которой имеет свои геометрические и физические характеристики.

На границе  $y=0$  к одной из сваренных деталей по нормали прикладывается нагрузка вида:

$$\sigma_0 = q_0 f(x, t), \quad f(-x, t) = f(x, t),$$

которая характеризует интенсивность и распределение импульса во времени и в пространстве.

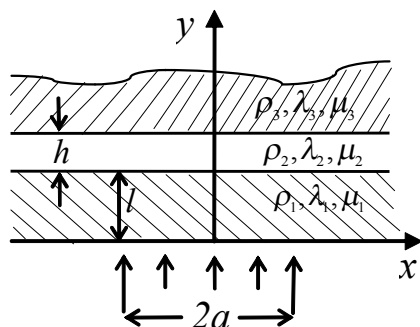


Рис. 1. Модель сварного шва

Обозначим через  $U_i, V_i$  ( $i=1,2,3$ ) компоненты перемещений для составляющих сред, а через  $\theta_i$  и  $W_i$  – расширение и искажение элемента материала. Из динамических уравнений Ляме получаем систему уравнений [2, 3]:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_i &= \frac{1}{a_i^2} \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial t^2}; & \Delta W_i &= \frac{1}{b_i^2} \frac{\partial^2 W_i}{\partial t^2}; \\ \Delta U_i &= \frac{\partial \theta_i}{\partial x} + \frac{\partial W_i}{\partial y}; & \Delta V_i &= \frac{\partial \theta_i}{\partial y} - \frac{\partial W_i}{\partial x}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{где } \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}; \quad a_i^2 = \frac{\lambda_i + 2\mu_i}{\rho_i}; \quad b_i^2 = \frac{\mu_i}{\rho_i}.$$

Если через  $X$  и  $T$  обозначить длительность действия нагрузки в пространстве и времени, то эта система должна быть решена при следующих граничных и начальных условиях:

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}^1 &= -\sigma_0 \quad \text{при } x \in X, t \in T; \\ \sigma_{yy}^1 &= \tau_{xy}^1 = 0 \quad \text{при } x \notin X, t \notin T; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} U_1 = U_2, \quad V_1 = V_2, \quad \sigma_{yy}^1 = \sigma_{yy}^2, \quad \tau_{yy}^1 = \tau_{yy}^2 \quad \text{при } y = l; \\ U_2 = U_3, \quad V_2 = V_3, \quad \sigma_{yy}^2 = \sigma_{yy}^3, \quad \tau_{xy}^2 = \tau_{xy}^3 \quad \text{при } y = l + h; \end{aligned} \quad (3)$$

$$U_i = W_i = \tau_{xy}^i = 0 \quad \text{при } x = 0; \quad (4)$$

$$U_i = V_i = \frac{\partial U_i}{\partial t} = \frac{\partial V_i}{\partial t} \quad \text{при } t = 0. \quad (5)$$

Условия (4) являются следствием симметрии нагрузки. Кроме того, все компоненты напряжений и перемещений должны стремиться к нулю на достаточно большом расстоянии от места приложения импульса нагрузки.

Задача решается методом двойных интегральных преобразований: по времени  $t$  с помощью преобразования Лапласа, по координате  $x$  – с помощью преобразования Фурье. Для удовлетворе-

ния условиям (4) величин  $U_i$  и  $W_i$  используют синус-преобразование Фурье, а для величин  $V_i$  и  $\theta_i$  – косинус-преобразование Фурье [3].

В результате интегральных преобразований из системы уравнений (1) получаем следующие выражения изображений для перемещений:

$$u_i(q, y, p) = \frac{a_i^2 q}{p^2} (A_i \operatorname{sh} k_i y + B_i \operatorname{ch} k_i y) + \frac{b_i^2 r_i}{p^2} (C_i \operatorname{ch} r_i y + D_i \operatorname{sh} r_i y),$$

$$v_i(q, y, p) = \frac{a_i^2 k_i}{p^2} (A_i \operatorname{ch} k_i y + B_i \operatorname{sh} k_i y) - \frac{b_i^2 q}{p^2} (C_i \operatorname{sh} r_i y + D_i \operatorname{ch} r_i y),$$

$(i = 1, 2),$

$$u_3(q, y, p) = -\frac{a_3^2 q}{p^2} B_3 e^{-k_3 y} - \frac{b_3^2 r_3}{p^2} D_3 e^{-r_3 y},$$

$$v_3(q, y, p) = -\frac{a_3^2 k_3}{p^2} B_3 e^{-k_3 y} - \frac{q b_3^2}{p^2} D_3 e^{-r_3 y},$$

где  $k_i^2 = q^2 + \frac{p^2}{a_i^2}$ ,  $r_i^2 = q^2 + \frac{p^2}{b_i^2}$ ,  $(i = 1, 2, 3).$

Постоянные  $A_i, C_i$  ( $i = 1, 2$ );  $B_i, D_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) находятся из условий (2), (3), выражения которых из-за их громоздкости здесь не приводятся.

С использованием соотношений для перемещений (7) по формулам теории упругости находят выражения для изображений нормальных, касательных, максимальных касательных и главных напряжений. Например, выражения для изображений максимальных касательных напряжений имеют вид:

$$\tau_{\max}^i(q, y, p) = S_i (a_i^2 - b_i^2) (A_i \operatorname{sh} k_i y + B_i \operatorname{ch} k_i y),$$

$(i = 1, 2),$

$$\tau_{\max}^3(q, y, p) = S_3 (a_3^2 - b_3^2) B_3 e^{-k_3 y}.$$

Возвращение от изображений к оригиналам осуществляется при конкретном задании нагрузки  $\sigma_0$ . Экспериментальные исследования с применением поляризационно-оптического метода для исследования распространения волн напряжений в сварных соединениях позволяют регистрировать картину распределения только максимальных касательных напряжений. Если расчетные максимальные касательные напряжения хорошо

согласуются с полученными экспериментально, то можно утверждать, что и распределения главных напряжений, полученных аналитически, будут достоверными.

Сопоставление результатов выполненных расчетов о действии распределенной импульсной силы:

$$\sigma_0 = q_0 \delta(t) [H(x+a) - H(x-a)],$$

где  $q_0 = \text{const}$ ,  $y = 0$ ,  $H(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0 \end{cases}$

с известными экспериментальными данными и решениями показывает удовлетворительное их совпадение.

Установлено, что динамическая концентрация напряжений образуется в зоне, прилегающей к сварному шву и существенно зависит от вида и интенсивности внешней нагрузки, геометрии шва и механических характеристик составляющих трехслойную среду, моделирующую сварной шов. После прохождения волны нагрузки через границы раздела сред происходит локализация напряжений в зоне сварного шва. Это обусловлено суперпозицией падающей и отраженной от шва волн напряжений.

Следующий этап в решении рассматриваемой проблемы состоит в дальнейшем развитии и совершенствовании модели сварного шва и методики расчета, которая позволит выявлять области концентрации напряжений и оптимизировать параметры сварного шва с целью увеличения динамической прочности сварной конструкции.

#### Список литературы

1. Николаев Г. А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций / Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. – М.: Машиностроение, 1971. – 316 с.
2. Сагомоян А. Я. Волны напряжений в сплошных средах / Сагомоян А. Я. – М.: Издательство Московского университета. 1985. – 416 с.
3. Партон В. З. Методы математической теории упругости / Партон В. З., Перлин П. И. – М.: Наука. 1981. – 688 с.

Поступила в редакцию 10.02.2014

#### Мастиновський Ю.В. Про розрахунок зварних з'єднань на динамічну міцність

*Розглядається розповсюдження хвиль напружень у зварних з'єднаннях з метою оцінки концентрації напружень у зоні зварного шва в залежності від його геометричних та фізичних параметрів. Задача розв'язується методом подвійних інтегральних перетворень.*

**Ключові слова:** зварні з'єднання, хвилі напружень, інтегральні перетворення.

#### Mastinoovsky Yu. Dynamic strength calculation of welded joints

*Stress waves propagation in welded joints is considered for the purpose of estimating the dependence of stress concentration in weld zone on geometrical and physical parameters of the weld seam. The problem is being solved by means of double integral transformation.*

**Key words:** welded joint, stress waves, strength, integral transformations.