

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ ШВОВ  
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Постановка проблемы.**

Изучаются напряжения в области сварных швов пластинчатой конструкции в условиях нестационарных температурных и силовых воздействий.

В данной работе рассмотрим пластинчатую конструкцию, представляющую собой короб (корпус), состоящий из пластин, шарнирно-опертых по нижней пластине (рис. 1).

Предположим, что процесс деформирования не является адиабатическим или изотермическим, тогда появляется приращение температуры  $\Delta T = T - T_0$ , где  $T = T(x, t)$  - температура тела в точке  $x = (x_1, x_2, x_3)$  в рассматриваемый момент времени  $t$ , а  $T_0$  - температура тела в той же точке в исходном недеформированном состоянии в начальный момент времени.

При изменении температуры на величину  $\Delta T = T - T_0$  в некоторой точке  $x = (x_1, x_2, x_3)$  конструкции объем малой окрестности, окружающей эту точку, изменится пропорционально  $\Delta T$ ; при этом возникнут тепловые деформации

$$\varepsilon_{ij}^t = \alpha_{ij}(T - T_0), \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (1)$$

или, в матричной записи

$$\{\varepsilon^t\} = \{\alpha\}(T - T_0), \quad (2)$$

где  $\alpha_{ij}$  - матрица коэффициентов теплового расширения (1/град).

Для случая изотропного тела расширение во всех направлениях происходит одинаково и, следовательно, можем записать

$$\alpha = \alpha \cdot \delta_{ij},$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплового расширения,  $\delta_{ij}$  - символ Кронекера ( $\delta_{ij} = 1$  при  $i = j$ ,  $\delta_{ij} = 0$  при  $i \neq j$ ).

Для ортотропного тела коэффициенты теплового расширения могут быть различными по осям упругой симметрии, т.е. имеет место равенство

$$\alpha = \alpha_i \cdot \delta_{ij},$$

Полная деформация  $\{\varepsilon\}$  в рассматриваемой точке равна сумме упругой деформации,  $\{\varepsilon^t\}$  обусловленной внешними нагрузками, и тепловой деформации  $\{\varepsilon^t\}$ , т.е.

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^t\} + \{\varepsilon^t\}.$$

Отсюда определяем величину упругой деформации

$$\{\varepsilon^t\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon^t\}.$$

Тогда напряжения в линейно-упругом теле можно определить по закону Гука (формула (6) из [7])

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda(\varepsilon_{kk} - \gamma T)\delta_{ij} \quad (3)$$

где  $\lambda, \mu$  - постоянные Ламе,

$\gamma$  - термомеханическая постоянная,  $\gamma = (3\lambda + 2\mu)\alpha_t$ ,

$\alpha_t$  - коэффициент теплового расширения,

$T$  - температура.

Это известные соотношения Дюамеля-Неймана.

Компоненты тензора деформаций  $\{\varepsilon\}$  выражаются через перемещения  $u_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) соответствующих точек тела согласно соотношениям Коши

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

Требуется определить напряженно-деформированное состояние упругой пластины в условиях температурного и силового воздействий, т.е. удовлетворить уравнениям движения

$$(\lambda + 2\mu)\Delta u_i - (\lambda + \mu)\frac{\partial}{\partial x_i}(\text{div}\mathbf{u}) - \gamma\frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - F_i = 0$$

уравнению теплопроводности [2], соотношениям Дюамеля-Неймана (3),

соотношениям Коши (4), уравнениям совместности деформаций [8], а также начальным и граничным условиям.

Задача решалась по времени.

**Анализ публикаций по теме исследования.**

Развитие современной техники требует создания новых конструкций, работа которых происходит под действием многократных, несимметричных силовых и температурных факторов. Наиболее нагруженными в таких конструкциях являются зоны сварных швов, места стыковки конструктивных элементов, технологические отверстия. Исследование прочности и надежности сварных швов представлены в ряде источников [1-7]. В работе [8] предложен подход, основанный на использовании метода конечных элементов для расчета термоупругого поведения конструкции, рассматривается связанная постановка задачи термоупругости. Среди работ, посвященных решению связанных задач термоупругости, отметим исследования [9-10]

В данной статье рассмотрен пример расчета сварных швов конструкции в условиях нестационарных температурных и силовых воздействий в связанной термоупругой постановке.

**Цель статьи.**

Целью данного исследования является разработка методики определения напряжений в сварных швах пластинчатых конструкций, подверженных одновременному действию температурных и силовых нагрузок. Методика позволяет определить места наибольшей концентрации напряжений, области пластических деформаций. Это позволяет прогнозировать места развития микродефектов.

Для решения связанной задачи термоупругости применим метод конечных элементов. Произведем аппроксимацию температурного поля (скалярной функции) в пределах конечного элемента

$$T = \Phi_k * T_k = \{\Phi\}^T \{T\}, k=1,2,\dots,N, \quad (5)$$

$N$  – количество элементов,

где  $\{\Phi\}$  – матрица (вектор) функций формы элемента,

$\{T\} = (T_1, T_2, \dots, T_N)^T$  – значения температуры в узлах элемента.

Здесь и ниже используется правило суммирования по повторяющимся индексам, т.е. выражение вида  $a_i b_i$  следует рассматривать как сумму  $\sum a_i b_i$ .

Тогда выражение (1) примет вид

$$\varepsilon_{ij}^t = \alpha_{ij} * \Phi_k * (T_k - T_{0k}), \quad (6)$$

или в матричной записи

$$\{\varepsilon^t\} = \{\alpha\} \{ \{\Phi\}^T * (\{T\} - \{T_0\}) \}, \quad (7)$$

где  $\{T_0\}$  – вектор узловых значений начального поля температуры.

Подставляя (3) в уравнения равновесия (4.3) из [8] и проводя преобразования, аналогичные выполненным при выводе соотношений (4.7) в [8], приходим к системе уравнений равновесия конечного элемента упругого тела при наличии температурного воздействия

$$\{K\} * \{\lambda\} = \{f\}, \quad (8)$$

где, как и в [5],  $\{K\}$  – матрица жесткости тела,  $\{\lambda\}$  – вектор узловых смещений,  $\{f\}$  – вектор усилий в узлах элементов, вычисляемый теперь по следующей формуле (в матричной записи)

$$\{f\} = \int_{V_e} \bar{q} * \{\bar{\Phi}\} dV + \int_{S_e} \bar{p} * \{\bar{\Phi}\} dS + \int_{V_e} \{B\}^T * \{D\} * \{\varepsilon^t\} dV. \quad (9)$$

Последнее слагаемое в (9) представляет собой нагрузку в узлах элементов, обусловленную полем температур. Такой же вид будут иметь уравнения равновесия для всей конечно-элементной модели конструкции.

Таким образом, соотношения (7-9) дают решение задачи термпрочности при известных распределениях текущей и начальной температур тела. По сравнению с обычным расчетом (без учета теплового воздействия), в этом случае необходимо дополнительно задать матрицы коэффициентов теплового расширения, используемых в модели материалов, и узловые значения указанных температур.

Рассматривались прямоугольные пластинки размерами: пластина 1  $a = 400$  см;  $b = 2100$  см, толщиной  $h = 4$  см, пластина 2  $a = 400$  см;  $b = 1100$  см, толщиной  $h = 3$  см, пластина 3  $a = 60$  см;  $b = 1100$  см, толщиной  $h = 4$  см. Эти пластинки составляют короб и указаны на рис. 1. Материал пластинок – сталь 10ХСНД. Модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно равны  $E = 2.1 \times 10^6$  кгс/см<sup>2</sup>;  $\nu = 0.3$ . Плотность материала пластинки равна  $\rho_p = 0.0079$  кг/см<sup>3</sup>.

Разработана базовая конечно-элементная модель короба с использованием трехмерных элементов типа «solids».

Для расчета НДС при действии внутреннего давления и нагрева использовалась 4-слойная модель по пластинам толщиной 4 см, 3-слойная по пластинам толщиной 3 см. По сварным швам использовалась 4-слойная модель, состоящая для рассматриваемой конструкции из 105000 элементов.

Закрепление короба рассматривалось как жесткое защемление по соответствующим местам крепления основания к фундаменту.

На рисунке 1 представлена геометрическая модель короба, указаны номера сварных швов. Через  $P_1, P_2$  обозначено действующее давление. На рисунке 2 показана конечно-элементная модель пластин и сварного шва.

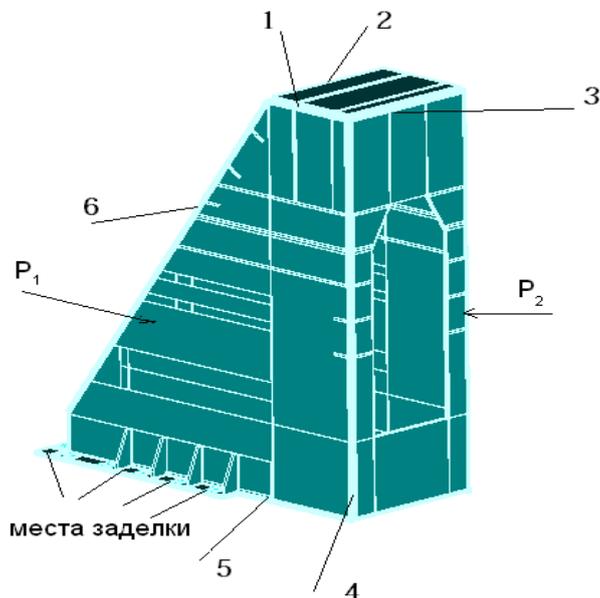


Рис. 1. Геометрическая модель короба с номерами сварных швов

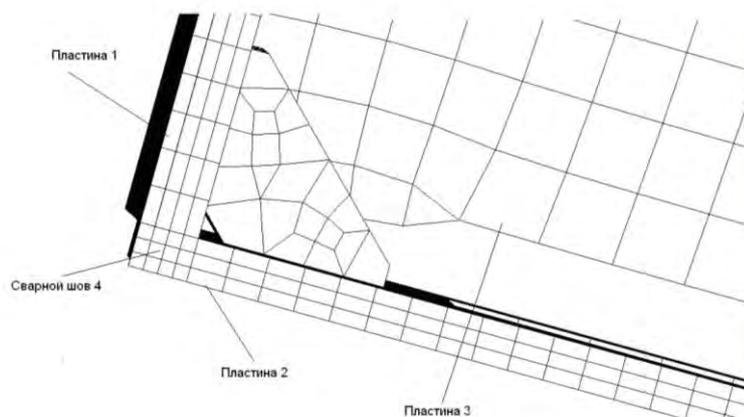


Рис. 2. Конечно-элементная модель сварного шва и пластин

Расчет проводился на температурные нагрузки и давление на боковые поверхности. Исходные данные и результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Исходные данные и результаты расчета

τ, с	T, °C	σ <sub>max</sub> , кгс/см <sup>2</sup>						σ <sub>в min</sub> , кгс/см <sup>2</sup>	η <sub>в</sub>
		1	2	3	4	5	6		
3,6	110-210	4200	2700	2800	2800	4300	3000	4320	1,0
4,4	120-270	4100	2800	2900	2900	3900	2800	4320	1,1
5,0	170-250	3600	2700	2800	2800	3500	2800	4320	1,2
5,6	150-200	3000	2600	2500	2600	2900	2300	4320	1,5
7,8	110-190	2800	2400	2400	2400	2500	2200	4320	1,7
9,6	100-140	2300	2200	2200	2200	2000	2200	4320	1,9
11,8	80-120	1600	1800	1800	1800	1500	1700	4400	2,4

Рассматривался диапазон температур от 80 - 270°C. Давление на боковые поверхности принималось равным  $P_1=1,6$  кгс/см<sup>2</sup> и  $P_2=-0,5$  кгс/см<sup>2</sup>.

где  $\sigma_{\max}$  – максимальные напряжения в сварном шве;

$\sigma_{\min}$  – минимально допустимые напряжения в сварном шве (по пределу прочности);

$\eta_b$  – коэффициент запаса прочности.

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Результаты проведенных расчетов позволили сделать следующие выводы.

Для рассматриваемой конструкции установлены некоторые количественные оценки напряжений в окрестности сварных швов. В верхнем слое боковой пластины толщиной 0,2 см достигаются напряжения, равные пределу текучести стали 10ХСНД. Отметим, что в результате остывания в этом слое присутствуют пластические деформации равные 0,001.

На границе сварного шва 4 и кромки пластины возникают предельные напряжения ( $\sigma_{\max}=2800$  кгс/см<sup>2</sup>), равные пределу пропорциональности стали 10ХСНД ( $\sigma_{0,2}=2800$  кгс/см<sup>2</sup>).

В дальнейшем предполагается анализ сварного шва 4 с учетом возможного появления трещин, возникающих при сварке.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кит Г.С., Хай М.В. Определение трехмерных температурных полей и напряжений в бесконечном теле с разрезами //Изв. АН СССР. Механика твердого тела.–1982. – №5. – С. 60 - 67.
2. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. – Киев: Наук. думка, 1970.–307с.
3. Станюкович А. В. Хрупкость и пластичность жаропрочных материалов М., Металлургия 1967. 199 с.
4. Мюнзе В. Х. Усталостная прочность сварных стальных конструкций. М., Машиностроение, 1968. 310 с.
5. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975.-872 с.
6. Прочность при малоцикловом нагружении. Под. ред. С. В. Серенсена, М., Наука, 1975. 285с.
7. Новацкий В. Динамические задачи термоупругости. - М.: Мир, 1970. - 256 с.
8. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с.
9. Алтухов Е.В. Метод И.И. Воровича в трехмерной теории термодинамики пластин. //Теорет. и прикл. механика. Донецк, 2005, вып. 41. С. 3-8.
10. Бородин П.Ю. динамическая связанная задача термоупругости в различных пространственных приближениях. Мат. моделирование.- 1998.-Т. 10, №3.-С. 61-82

КОВЧ Олег Иванович – аспирант Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины.

Научные интересы:

– методы оптимального проектирования конструкций, численные методы решения интегральных уравнений, механика разрушения.