

УДК 532.595

О.И. КОВЧ

Государственное Предприятие КБ "Южное"

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Разработана основанная на применении метода конечных элементов методика определения напряжений пластинчатых конструкций, подверженных одновременному действию температурных и силовых нагрузок. Методика позволяет определить области пластических деформаций. Это позволяет прогнозировать картину растрескивания поверхности. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния конструкции при различных схемах ее крепления.

Ключевые слова: трещина, деформация, заделка, конечный элемент, температура, шарнир.

О.І. КОВЧ

Державне Підприємство КБ "Південне"

### ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗТРИСКУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Розроблена, на підставі використання метода кінцевих елементів, методика для визначення напруги пластинчатих конструкцій, які піддаються одночасній дії температурних та силових навантажень. Методика дозволяє визначати області пластичних деформацій. Це дозволяє прогнозувати картину розтріскування поверхні. Проведено аналіз навантажено-деформованого стану конструкції при різних схемах її кріплення.

Ключові слова: тріщина, деформація, затискання, кінцевий елемент, температура, шарнір.

О.І. КОВЧ

Design office "Yuzhnoye"

### RESEARCHING THE CRAKING SURFACES AT THERMOPOWER LOADING

The methodology for the determining of the stress in plate structures which are subjected to the simultaneous action of temperature and power loads is worked out. It is based on the using of the finite element method. The methodology allows to define the areas of plastic deformation. It allows to predict the pattern of the surface cracking. The analysis of stress-strain state of the structure under different schemes of its fastening is conducted.

Keywords: crack, deformation, jamming, finite element, temperature, joint.

#### Постановка проблемы

Изучаются напряжения и остаточные деформации в наружном слое 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:

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

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  $\{\varepsilon'\}$ , обусловленной внешними нагрузками, и тепловой деформации  $\{\varepsilon^t\}$ , т.е.

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon'\} + \{\varepsilon^t\}.$$

Отсюда определяем величину упругой деформации:

$$\{\varepsilon'\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon^t\}.$$

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

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

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 уравнения движения:

$$(\lambda + 2\mu)\Delta u_i - (\lambda + \mu) \cdot \frac{\partial}{\partial x_i} (\operatorname{div} u) - \gamma \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - F_i = 0. \quad (5)$$

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 последних исследований и публикаций

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 максимальных остаточных деформаций на наружных поверхностях конструкций. Исследование прочности и надежности пластин с трещинами 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 зон растрескивания наружных поверхностей конструкции в условиях нестационарных температурных и силовых воздействий в связанной термоупругой постановке.

#### Формулирование цели исследования

Целью данного исследования является разработка методики определения максимальных напряжений, влияющих на растрескивание наружных поверхностей пластинчатых конструкций, подверженных одновременному действию температурных и силовых нагрузок.

#### Изложение основного материала исследования

Предложенная методика позволяет определить области пластических деформаций. Это, в свою очередь, позволяет прогнозировать картину растрескивания наружных поверхностей. Проведем анализ вариантов крепления корпуса для повышения срока эксплуатации конструкции.

Рассмотрим 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 пластинок 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 5-слойная модель по пластинам толщиной 4 см, 4-слойная по пластинам толщиной 3 см, состоящая для рассматриваемой конструкции из 240000 элементов.

В наружном слое толщиной 0,1 см проводились исследования картины растрескивания поверхностей.

Закрепление короба рассматривалось как жесткое защемление по соответствующим местам крепления основания к фундаменту – схема 1 крепления корпуса.

Рассматривался диапазон температур от 80–300°С. Давление на боковые поверхности принималось равным  $P_1=1,8 \text{ кгс/см}^2$  и  $P_2=-0,55 \text{ кгс/см}^2$ .

На рис. 1 представлена геометрическая модель короба со схемой 1 крепления корпуса. Через  $P_1, P_2$  обозначено действующее давление. На рис. 2 представлена геометрическая модель короба со схемой 2 крепления. На рис. 3 представлена геометрическая модель короба со схемой 3 крепления. На рис. 4 показана конечно-элементная модель пластин и зоны максимальных остаточных напряжений.

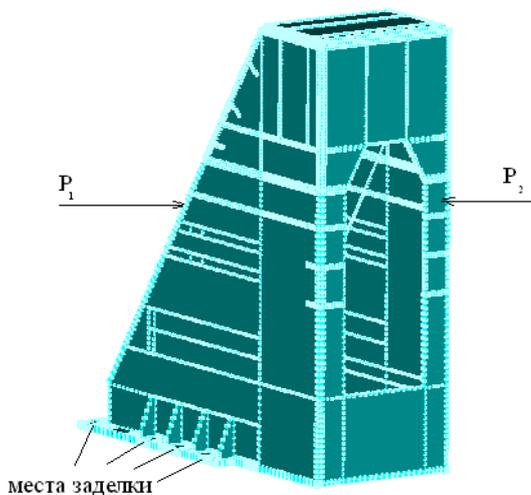


Рис. 1. Геометрическая модель короба со схемой 1 крепления

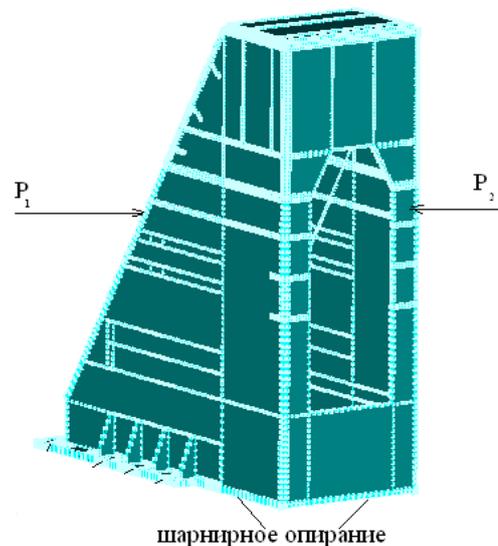


Рис. 2. Геометрическая модель короба со схемой 2 крепления

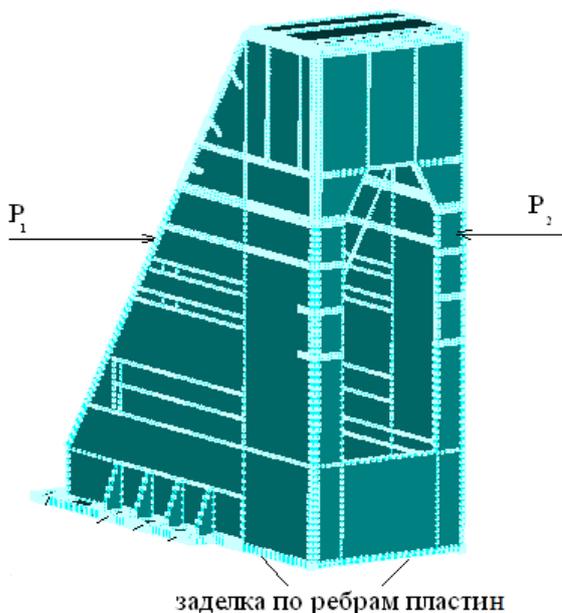


Рис. 3. Геометрическая модель короба со схемой 3 крепления

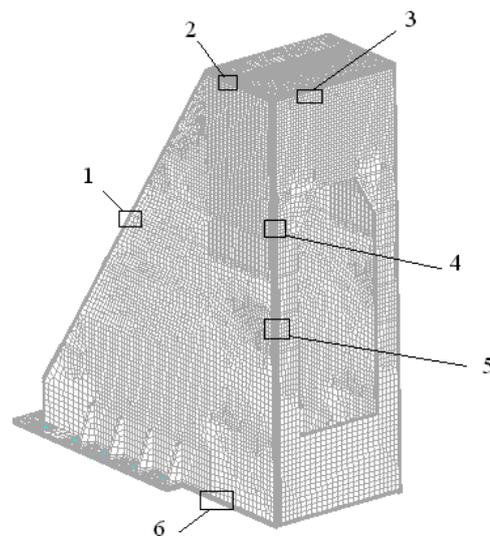


Рис. 4. Конечно-элементная модель короба с зонами максимальных остаточных деформаций

Расчет проводился на температурные нагрузки и давление на боковые поверхности. Исходные данные и результаты расчета для схем 1–3 крепления корпуса приведены в табл. 1–3 соответственно.

В табл. 1–3 используются обозначения:

$\epsilon_{\max}$  – максимальные остаточные деформации;

$\epsilon_{\min}$  – минимальные остаточные деформации, не влияющие на изменение формы пластины.

Таблица 1

**Исходные данные и результаты расчета для схемы 1 крепления**

$\tau$ , с	$T$ , °С	$\epsilon_{\max}$						$\epsilon_{\min}$
		1	2	3	4	5	6	
3,6	110-230	0,001	0,003	0,003	0,003	0,003	0,001	0,003
4,4	120-300	0,002	0,004	0,005	0,007	0,007	0,002	0,005
5,0	170-275	0,002	0,004	0,005	0,007	0,007	0,002	0,005

Таблица 2

**Исходные данные и результаты расчета для схемы 2 крепления**

$\tau$ , с	$T$ , °С	$\epsilon_{\max}$						$\epsilon_{\min}$
		1	2	3	4	5	6	
3,6	110-230	0,001	0,003	0,003	0,003	0,003	0,001	0,003
4,4	120-300	0,002	0,004	0,005	0,008	0,008	0,004	0,005
5,0	170-275	0,002	0,004	0,005	0,008	0,008	0,004	0,005

Таблица 3

**Исходные данные и результаты расчета для схемы 3 крепления**

$\tau$ , с	$T$ , °С	$\epsilon_{\max}$						$\epsilon_{\min}$
		1	2	3	4	5	6	
3,6	110-230	0,001	0,003	0,003	0,003	0,003	0,001	0,003
4,4	120-300	0,002	0,004	0,005	0,009	0,01	0,006	0,005
5,0	170-275	0,002	0,004	0,005	0,009	0,01	0,006	0,005

### Выводы

Результаты проведенных расчетов позволили сделать следующие выводы.

В верхнем слое боковой пластины толщиной 0,1 см достигаются напряжения, равные и превосходящие предел текучести стали 10ХСНД и зоны остаточных деформаций различного уровня. Отметим, что в результате остывания в этом слое присутствуют пластические деформации равные 0,0006 – 0,01 приводящие к зарождению трещин в зависимости от схемы крепления конструкции.

Зона 6 подвергается возникновению трещин, как видно из таблицы 3, что приведет к разрушению конструкции.

На боковых пластинах короба при схемах 2 и 3 крепления конструкции возникают большие остаточные деформации в зонах 4 и 5. Величины остаточных деформаций говорят о появлении трещин, которые приведут к уменьшению срока эксплуатации конструкции.

Для оптимального конструирования подобных коробов схемы крепления 2 и 3 необходимо исключить из рассмотрения.

**Список использованной литературы**

1. Кит Г.С. Определение трехмерных температурных полей и напряжений в бесконечном теле с разрезами / Г.С. Кит, М.В. Хай // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. — 1982. — №5. — С. 60—67.
2. Коваленко А.Д. Основы термоупругости / А.Д. Коваленко. — Киев: Наук. думка, 1970. — 307 с.
3. Станюкович А.В. Хрупкость и пластичность жаропрочных материалов / А.В. Станюкович. — М.: Металлургия, 1967. — 199 с.
4. Кит Г.С. Нестационарная задача термоупругости для пластинки с трещиной при наличии теплоотдачи с боковых поверхностей / Г.С. Кит, О.В. Побережный // Физико-химическая механика материалов. — 1976. — Т. 12, № 4. — С. 73—78.
5. Новацкий В. Теория упругости / В. Новацкий. — М.: Мир, 1975. — 872 с.
6. Прочность при малоцикловом нагружении / Под. ред. С.В. Серенсена. — М.: Наука, 1975. — 285 с.
7. Новацкий В. Динамические задачи термоупругости / В. Новацкий. — М.: Мир, 1970. — 256 с.
8. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows / Д.Г. Шимкович. — М.: ДМК Пресс, 2001. — 448 с.
9. Алтухов Е.В. Метод И.И. Воровича в трехмерной теории термодинамики пластин / Е.В. Алтухов // Теорет. и прикл. механика. — Донецк, 2005. — Вып. 41. — С. 3—8.
10. Бородин П.Ю. Динамическая связанная задача термоупругости в различных пространственных приближениях / П.Ю. Бородин // Мат. моделирование. — 1998. — Т. 10, №3. — С. 61—82.