

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ І  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

УДК 531.2

О.І. КОВЧ, О.О. СТРЕЛЬНИКОВА

Державне підприємство "Конструкторське бюро "Південне"  
Інститут проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАН України  
Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна**АНАЛІЗ СХЕМ ПРИКЛАДАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ  
МІЦНОСТІ ЗВАРНИХ ШВІВ З УРАХУВАННЯМ ВЗАЄМНОГО ВПЛИВУ РІЗНИХ  
ДЕФЕКТІВ**

Метою даного дослідження є вивчення концентрації напружень в зварних швах конструкцій, підданих одночасної дії інтенсивних силових і температурних факторів. Розглядаються пластинчасті конструкції. Вважається, що в зварних швах, які з'єднують пластини, можуть знаходитись тріщини, пори та інші дефекти. Зміна тиску і температури по поверхнях пластин може істотно вплинути на розкриття тріщин у звареному шві. В роботі досліджені три розрахункових схеми, що характеризують силовий і температурний впливи на пластинчасту конструкцію. Аналіз величин коефіцієнтів інтенсивності напружень за трьома запропонованими розрахунковим схемам довів, що результати відрізняються в межах від 0,5% до 2%, проте час розрахунку за першою схемою істотно менший, і визначені коефіцієнти інтенсивності напружень відрізняються не більше ніж на 1% від даних, отриманих аналітичним методом. Саме така схема може бути використана для швидкої оцінки стану конструкції.

Ключові слова: силове навантаження, температурне навантаження, включення, пора, зварний шов, метод скінченних елементів

О.И. КОВЧ, Е.А. СТРЕЛЬНИКОВА

Государственное предприятие "Конструкторское бюро "Южное"  
Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины  
Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина**АНАЛІЗ СХЕМ ПРИЛОЖЕНИЯ НАГРУЗОК ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ  
ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ ШВОВ С УЧЕТОМ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ  
РАЗЛИЧНЫХ ДЕФЕКТОВ**

Целью данного исследования является изучение концентрации напряжений в сварных швах конструкций, подверженных одновременно воздействию интенсивных силовых и температурных факторов. Рассматриваются пластинчатые конструкции. Предполагается, что в сварных швах, соединяющих пластины, могут находиться трещины, поры и другие дефекты. Изменение давления и температуры по поверхностям пластин может существенно повлиять на раскрытие трещин в сварном шве. В работе исследованы три расчетных схемы, характеризующие силовое и температурное воздействие на пластинчатую конструкцию. Анализ величин коэффициентов интенсивности напряжений по трем предложенным расчетным схемам показал, что результаты отличаются в пределах от 0,5% до 2%, однако время расчета по первой схеме существенно меньше, и определенные коэффициенты интенсивности напряжений отличаются не более чем на 1% от данных, полученных аналитическим методом. Именно такая схема может быть использована для быстрой оценки состояния конструкции.

*Ключевые слова: силовое нагружение, температурное нагружение, включение, пора, сварной шов, метод конечных элементов*

O.I. KOVCH, E.A. STRELNIKOVA

YUZHNOYE design office

A.N. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine

Kharkiv National University named after V.N. Karazin

## ANALYSIS OF SCHEMES OF LOAD APPLICATIONS FOR MODELING THE STRENGTH OF WELD SEAMS WITH THE ACCOUNT OF MUTUAL INFLUENCE OF VARIOUS DEFECTS

*The main objective of this research is to study the stress concentration in welded joints of structures subjected to simultaneous action of intensive force and temperature factors. Plate structures are considered. It is assumed that in the welds connecting the plates, there may be cracks, pores and other defects. Three calculation schemes characterizing the force and temperature effects on the plate structure have been studied. Analysis of the stress intensity factors for the three proposed calculation schemes showed that the results differ from 0.5% to 2%. An approach based on the finite element method for determining a stress-strained state in the weld with pores and an inclusion is developed. The method makes it possible to estimate mutual influence of the inclusion on the origin and crack opening in the pore. This method will make it also possible to made recommendation on increasing the period of operation of the welded seams. The special feature of the studies is in creating different loads by time, by the depth of the plates, by the length of the plates and welded seams. Different temperatures are considered. The different types of finite elements are used for modeling the zone of pores. In this paper, we investigate the mutual effect of pores, inclusions, and cracks using various schemes of applying loads to the plates making up the box. For each model, calculations were made for three calculation schemes. Calculation scheme 1 provides maximum values of pressure and temperature over the entire surface of the box. Calculation scheme 2 supposes that the pressure varies both in height and width of the plate during time, the maximal temperature is applied over the entire surface. Calculation scheme 3 supposes that the temperature varies both in height and width of the plate at each moment of time, and the pressure is maximal across the entire plate. The maximum stresses are calculated in the welded seam with pores and inclusion. The comparison of results obtained by the three proposed calculation schemes is accomplished. The maximal stresses in inclusions are slightly influenced and are independent of the finite elements choice. But the maximal stresses near pores are different for different type of elements. Although the difference is not drastic it is testified about necessarily of additional research concern with the choice of the appropriate finite element for welded seam cracking analysis. The classical solid element requires essentially more computational efforts. The mutual influence of defects such as pores, inclusions, cracks on the crack propagation in the welded seam is significant with decreasing the minimum distance between the defects. As shown by calculation, the design scheme 1 gives the largest values of stresses and displacements.*

*Keywords: force loading, thermal loading, inclusion, pore, welded seam, finite element method.*

### Постановка проблемы

Для принятия решения о продолжении дальнейшей эксплуатации силовой конструкции необходимо использовать минимальный временной отрезок. Важную роль в расчетах на прочность занимает метод приложения и анализ действующих нагрузок. Быстро и эффективно дать заключение о состоянии конструкции, работа которой происходит при интенсивных несимметричных силовых и температурных воздействиях является сложной задачей.

### Анализ последних исследований и публикаций

Наиболее опасной в такой конструкции является зона сварных швов, в которой имеются поры, трещины и включения, где наблюдаются максимальные остаточные деформации. Исследование прочности и надежности пластин с трещинами представлены в ряде источников [1–7]. Для определения несимметричных силовых и температурных факторов, используем компьютерный расчет с учетом связанности температурной и силовой компонент [8–11]. Такой расчет позволит учесть влияние изменения давления и температуры на концентрацию напряжений в сварном шве. Отметим, что решение задач в связанной постановке может занимать сотни часов работы компьютера. Оценка величины коэффициентов интенсивности напряжений в вершине трещин в зависимости от вида приложенной нагрузки и соответствующего времени расчета является главной целью проводимого исследования.

### Цель исследования

В статье проведено исследование различных схем приложения нестационарных температурных и силовых воздействий в расчете сварных швов конструкции в связанной термоупругой постановке с учетом взаимного влияния различных дефектов.

Целью данного исследования является определение затрачиваемого времени на решение задачи и точность определения напряженно-деформированного состояния конструкции при различных методах приложения нагрузок.

### Изложение основного материала исследования

Рассмотрим три схемы приложения нагрузок к коробу.

Схема 1. Максимальные температуры и давления прилагаются к пластинам короба аналогично работе [11].

Для тестирования расчетной схемы 2 предлагаем рассмотреть задачу об асимметричном ударе по пластинам короба, затухающие во времени.

Применим следующее асимптотическое решение для компонент напряжения в окрестности вершины трещины [12]:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_1(t)}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(1)}(\theta) + \frac{K_{11}(t)}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(1)}(\theta) + \sigma_{ij}^{(R)}(r, \theta, t) + O\left(r^{\frac{1}{2}}\right), \quad r \rightarrow 0. \quad (1)$$

Здесь  $r, \theta$  – полярные координаты в вершине трещины.

Асимптотическое решение (1) состоит из сингулярной и регулярной частей. Поэтому для оценки направления распространения трещины воспользуемся структурно-временным критерием [12].

Основная особенность расчета динамического разрушения по такому критерию состоит в том, что он позволяет рассчитывать время до разрушения рассматриваемого элемента конструкции. Это дает возможность по-новому и достаточно просто определять направление разрушения в области с трещиной. При этом определяется время до разрушения  $t$  на каждом луче, исходящем из вершины трещины под углом  $\theta$  ( $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ ). Предполагается, что трещина разрастается в направлении, на котором время до разрушения  $t$  минимально.

Для исследования расчетной схемы 3 решим тепловую задачу с приложением температурных нагрузок и определим прочность шва в виде сквозной задачи.

Для решения связанной термоупругой задачи требуется также определение следующих параметров: удельной теплопроводности, удельной теплоемкости и температуры короба. С достаточной точностью эти величины могут быть определены по зависимостям (5–7)  $\lambda_0, c_{p0}, T_0$  из [13]:

$$\begin{aligned}\mu(T) &= 3,4 \cdot 10^{-8} \cdot T^{0.69}, \\ \lambda(T) &= \lambda_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0.75}, \\ c_p(T) &= c_{p0} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0.165}.\end{aligned}$$

Тепловой поток, подводимый к пластинам короба, вследствие конвективного теплообмена при натекании струи на пластины короба, определяется по формуле, приведенной в [14]:

$$q_k = \alpha \cdot (T - T_w).$$

Здесь  $\alpha$  – коэффициент теплообмена, (Вт/(м<sup>2</sup>·К));  $T$  – температура газа, (К);  $T_w$  – температура стенки, (К).

В работе исследовано взаимное влияние пор, включений, раковин диаметром (0,0015–0,0025 м) на раскрытие трещин различной длины (0,006–0,012 см), с использованием различных схемы приложения силовых и температурных нагрузок к пластинам, составляющим короб.

Для решения нестационарной задачи предлагается использовать пошаговый алгоритм по времени [11].

Исходные данные по геометрии модели и физико-механическим характеристикам материала используем из работы [11]. Предполагаем, что включения и трещины находятся в сварном шве, соединяющем две пластины толщиной 4 см каждая. Считаем, что трещина имеет длину  $L$ , а микровключение, (раковина, пора) находится на расстоянии  $L_1$  от трещины, рис. 1б).

Построена базовая конечно-элементная модель короба с использованием трехмерных элементов типа "solids". На рис. 1 б) показана конечно-элементная модель конструкции и сварного шва с дефектами, соединяющего две пластины. В работе исследованы три расчетных схемы, характеризующих силовое и температурное воздействие на пластинчатую конструкцию.

Расчетная схема 1 характеризуется тем, что к пластинам приложены максимальные как давление, так и температура, одинаковые по всей поверхности короба. При использовании расчетной схемы 2 предполагается, что величина давления изменяется равномерно как по высоте, так и по ширине пластины в каждый момент времени, а приложенная температура имеет максимальное значение, постоянное по всей поверхности. В расчетной схеме 3 принято, что величина температуры равномерно изменяется как по высоте, так и по ширине пластины в каждый момент времени, а величина приложенного давления максимальна и одинакова по всей поверхности.

Исследование картины растрескивания поверхностей внутри сварного шва при наличии различных дефектов проводилось с использованием трех указанных схем приложения температур и давления.

#### **Анализ результатов численного расчета по теме исследования.**

Рассматривались прямоугольные пластинки с такими 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. Материал пластинок – сталь 10ХСНД. Модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно равны  $E=2.1 \cdot 10^6$  кгс/см<sup>2</sup>;  $\nu=0.3$ . Плотность материала пластинки равна  $\rho=0.0079$  кг/см<sup>3</sup>.

В табл. 1-3 приведены данные расчетов и приложенная температурная нагрузка. Так, при рассмотрении взаимного влияния трещины и поры по схемам 1 и 2 прикладывалась температура  $210^{\circ}$ , по схеме 3 прикладывалась температура, изменяющаяся в пределах  $110^{\circ}$ – $210^{\circ}$ . Пределы изменения давления во всех рассмотренных расчетных схемах принимались равными  $3000$ – $3360$  кг/см<sup>2</sup>. Расчет по времени проводился в интервале от 0 до 10 сек.

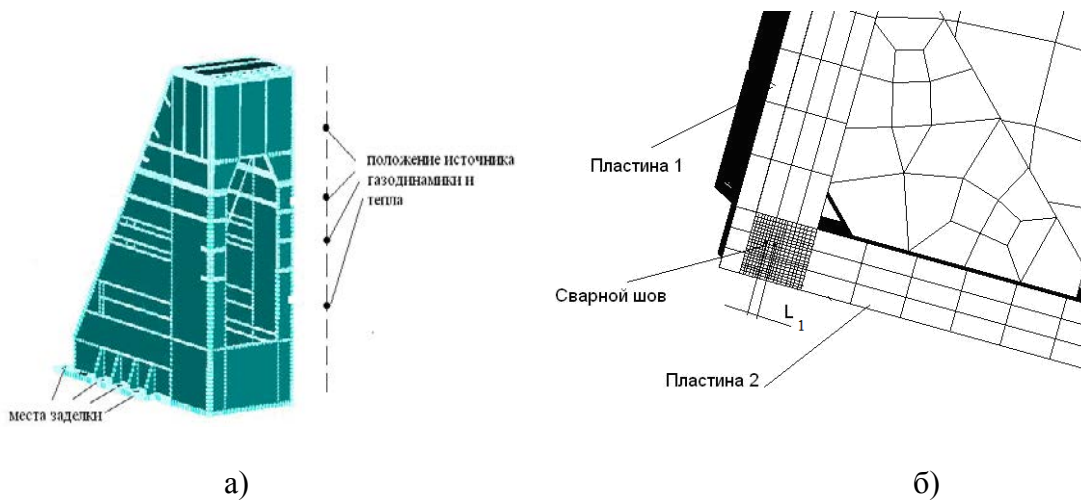


Рис. 1. Схема приложения нагрузок и конечно-элементная модель.

В работе анализируется влияние различных схем приложения термосиловой нагрузки на картину развития трещин в сварном шве при наличии различных дефектов, находящихся в непосредственной близости от трещины.

Для первой расчетной схемы коэффициент интенсивности напряжений, полученный методом конечных элементов, обозначен  $K_{Срасч1}$  при максимальной величине как давления, так и температуры.

Для второй расчетной схемы коэффициент интенсивности напряжений, полученный методом конечных элементов, обозначен  $K_{Срасч2}$ . Отметим, что величина этого коэффициента немного меньше полученного по первой расчетной схеме, так как вклад в развитие трещины от давления меньше, чем от температуры.

Для третьей расчетной схемы коэффициент интенсивности напряжений, полученный методом конечных элементов, обозначен как  $K_{Срасч3}$ . Величина этого коэффициента значительно меньше, так как вклад в развитие трещины от температуры значительно выше, чем от давления.

Рассматривались различные положения трещины и поры относительно сварного шва. Введены следующие обозначения:  $T$  – температура;  $L$  – длина трещины;  $L_1$  – расстояние между включением и трещиной;  $K_{Срасч}$  – коэффициент интенсивности напряжений полученный методом конечных элементов (для различных схем нагружения);  $K_{Стаб}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений.

Таблиця 1

Результаты расчета: поры и трещина

$T, ^\circ\text{C}$	$L, \text{ м}$	$L_1, \text{ м}$	$K_{\text{Срасч1}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Срасч2}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Срасч3}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Стаб}}, \text{ МПа м}^{1/2}$
110-210	0,006	0,003	25	24,5	24	45,6
	0,008	0,003	37	36,4	36,2	45,11
	0,010	0,003	44	43,6	43,2	46,3
	0,012	0,003	48	47,8	47,5	46,3

Таблиця 2

Результаты расчета: включение и трещина

$T, ^\circ\text{C}$	$L, \text{ м}$	$L_1, \text{ м}$	$K_{\text{Срасч1}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Срасч2}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Срасч3}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Стаб}}, \text{ МПа м}^{1/2}$
110-210	0,006	0,003	24	23,4	23,2	45,6
	0,008	0,003	34	33,6	33,4	45,11
	0,010	0,003	42	41,7	41,5	46,3
	0,012	0,003	49	48,8	48,6	46,3

Таблиця 3

Результаты расчета: раковина и трещина

$T, ^\circ\text{C}$	$L, \text{ м}$	$L_1, \text{ м}$	$K_{\text{Срасч1}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Срасч2}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Срасч3}}, \text{ МПа м}^{1/2}$	$K_{\text{Стаб}}, \text{ МПа м}^{1/2}$
110-210	0,006	0,003	29	28,4	28,1	45,6
	0,008	0,003	41	40,5	40,2	45,11
	0,010	0,003	46	45,7	45,3	46,3
	0,012	0,003	47	46,8	46,5	46,3

### Выводы

Результаты проведенных расчетов позволили сделать следующие выводы.

Оценка времени расчетов показала, что применение расчетной схемы 1 дает время расчета 40-50 минут; расчетной схемы 2 – 36-48 часов; расчетной схемы 3 – 18-28 часов.

Качественная оценка показала, что расчетная схема 1 работает в запас прочности; ее использование дает минимальное время расчета, при этом отличие по результатам составляет не более 1% от критического коэффициента интенсивности напряжений, полученного аналитическим методом [15]. Как показали вычисления, расчетная схема 1 дает наибольшие значения напряжений и перемещений. Именно такая схема может быть использована для быстрой оценки состояния конструкции.

Анализ величин критических коэффициентов интенсивности напряжений по трем расчетным схемам показал, что они отличаются в пределах от 0,5% до 2%. Применение расчета в полной связанной постановке по схемам 2 и 3 для определения возможности продления срока службы конструкции для подобных типов нагрузок неприемлемо для быстрой оценки состояния конструкции.

В дальнейшем предполагается оценить математическое ожидание времени до разрушения конструкции при нестационарном нагружении при наличии различных дефектов в сварных швах.

### 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. Даутов Р.З. Введение в теорию метода конечных элементов / Р.З. Даутов, М.М. Карчевский. — Казань: Казанский госуд. университет, 2004. — 239 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.
11. Стрельникова О. Дослідження взаємного впливу включення на ланцюжку пор в зварному шві під впливом термосилового навантаження / О. Стрельникова, О. Ковч // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2016. — Т. 3. — № 7 (81). — С. 9-14.
12. Морозов Н.Ф. Проблемы динамики разрушения твердых тел / Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров. — СПб, 1997. — 132 с.
13. Беляев Н.М. Управление вектором тяги и теплообмен в ракетных двигателях на твердом топливе / Н.М. Беляев, В.М. Ковтуненко, Ф.И. Кондратенко. — Москва, 1968. — 420 с.
14. Авдуевский В.С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / В.С. Авдуевский. — М.: Машиностроение, 1992. — 528 с.
15. Партон В.З. Динамика хрупкого разрушения / В.З. Партон, В.Г. Борисковский. — М.: Машиностроение, 1988. — 240 с.

### References

1. Kit, G. S., Hay, M. V. Opredelenie trehmernyh temperaturnykh poley i napryazheniy v beskonechnom tele s razrezami. Izv. AN SSSR. Mehanika tverdogo tela. **5**, 60-67. (1982)
2. Kovalenko, A. D. Osnovy termouprugosti. Nauk. Dumka. Kiev. (1970)
3. Stanyukovich, A. V. Hrupkost i plastichnost zharoprochnykh materialov. Metallurgiya. Moscow. (1967)

4. Kit, G. S., Poberezhnyy, O. V. Nestacionarnaya zadacha termouprugosti dlya plastinki s treschinoy pri nalichii teplootdachi s bokovyh poverhnostey. Fiziko-himicheskaya mehanika materialov. **12**, 4, 73-78. (1976)
5. Novackiy, V. Teoriya uprugosti. Mir. Moscow. (1975)
6. Prochnost pri malociklovom nagruzhennii. Pod. red. S. V. Serensena. Nauka. Moscow: (1975).
7. Novackiy, V. Dinamicheskie zadachi termouprugosti. Mir. Moscow. (1970)
8. Dautov, R. Z., Karchevskiy, M. M. Vvedenie v teoriyu metoda konechnykh elementov. Kazanskiy gosud. universitet. Kazan. (2004)
9. Altuhov, E. V. Metod I.I. Vorovicha v trehmernoy teorii termodinamiki plastin. Teoret. i prikl. mehanika. **41**, 3-8. (2005)
10. Borodin, P. Yu. Dinamicheskaya svyazannaya zadacha termouprugosti v razlichnykh prostranstvennykh priblizheniyah. Mat. modelirovanie. **10**, 3, 61-82. (1998)
11. Strelnikova, O., Kovch, O. Doslidzhennya vzaemnogo vplivu vkladyuchennya na lancyuzhku por v zvarnomu shvi pid vplivom termosilovogo navantazhennya. Vostochno-Evropeyskiy zhurnal передовыh tehnologiy. **3**, 7 (81), 9-14. (2016)
12. Morozov, N. F., Petrov, Yu. V. Problemy dinamiki razrusheniya tverdyh tel. SPb. (1997)
13. Belyaev, N. M., Kovtunenکو, V. M., Kondratenko, F. I. Upravlenie vektorom tyagi i teploobmen v raketnykh dvigatelyah na tverdom toplive. Moscow. (1968)
14. Avduevskiy, V. S. Osnovy teploperedachi v aviacionnoy i raketno-kosmicheskoy tehnikе. Mashinostroenie. Moscow. (1992)
15. Parton, V. Z., Boriskovskiy, V. G. Dinamika hrupkogo razrusheniya. Mashinostroenie. Moscow. (1988)