

*Досліджено взаємний вплив пор у зварному шві в умовах не симетричного термосилового навантаження у відмінності від [1]. Досліджено залежність геометричних характеристик ланцюжка пор на розкриття тріщин у зварному шві. Розроблено методіку на підставі методу скінченних елементів визначення напружено-деформованого стану у зварному шві навколо пор. Методіка дозволяє в просторі оцінити взаємний вплив пор на зародження і розкриття тріщин. Методіка дозволяє збільшувати термін експлуатації зварних швів*

*Ключові слова: пора, тріщина, деформація, напруга, термосилове навантаження, кінцевий елемент, зварний шов*

*Исследовано взаимное влияние пор в сварном шве в условиях не симметричной термосиловой нагрузки в отличие от [1]. Исследована зависимость геометрических характеристик цепочки пор на раскрытие трещин в сварном шве. Разработана методика на основании метода конечных элементов определения напряженно-деформированного состояния в сварном шве вокруг пор. Методика позволяет в пространстве оценить взаимное влияние пор на зарождение и раскрытие трещин. Методика позволит увеличить срок эксплуатации сварных швов*

*Ключевые слова: пора, трещина, деформация, напряжение, термосиловая нагрузка, конечный элемент, сварной шов*

УДК 532.595

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51869

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ПОР В СВАРНОМ ШВЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТЕРМОСИЛОВОЙ НАГРУЗКИ

**Е. А. Стрельникова**

Доктор технических наук, профессор,  
старший научный сотрудник  
Отдел прочности и оптимизации  
Институт проблем машиностроения  
им. А. Н. Подгорного НАН Украины  
ул. Дм. Пожарского, 2/10,  
г. Харьков, Украина, 61046  
E-mail: elena15@gmx.com

**О. И. Ковч**

Инженер  
Конструкторское бюро Южное  
ул. Криворожская, 3,  
г. Днепропетровск, Украина, 49008  
E-mail: olegkovch@gmail.com

## 1. Введение

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.

Для продления срока работы сварных швов с порами необходима методика, определяющая главные напряжения, влияющие на раскрытие возникающих трещин в порах.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В работе [1] предложен подход, основанный на использовании метода конечных элементов для расчета термоупругого поведения конструкции под симметричной нагрузкой, рассматривается связанная постановка задачи термоупругости. Результаты [1] позволяют судить лишь о рабочей плоскости, которая уменьшается за счет пустот, вследствие чего можно видеть лишь оценку плоской задачи, а не многоосной.

В работе [2] предложен расчет наружных разрезов для расчета термоупругого поведения конструкции под симметричной нагрузкой, рассматривается связанная постановка задачи термоупругости. Расчет наружного разреза [2] не укажет поведение материала над и под порой и результат переходит в плоское решение задачи. В работе [3] предложен расчет наружных дефектов для расчета поведения конструкции под симметричной нагрузкой и малых температурах. Расчет наружных дефектов [3] не позволит увидеть пространственное поведение трещины. В работе [4] предложен расчет одноосного нагружения наружных дефектов под симметричной нагрузкой и малых температурах. Решение плоской задачи в [4] не позволяет должным образом увидеть картину растрескивания пор по длине шва и поведение трещины (возможное слипание, а не раскрытие). В работе [5] предложен расчет многоосного нагружения наружных дефектов под симметричной нагрузкой и малых температурах. Результаты [5] не показывают зависимости между температурой и давлением на пространственное влияние пор в сварном шве. В работе [6] предложен расчет многоосного нагружения пор под симметричной нагрузкой и высокими температурами. Результаты работы [6] дают оценку влияния главных напряжений в порах, но не влияние сдвигающих и каса-

тельных напряжений на развитие трещин в порах. В работе [7, 8] предложено решение связанных задач термоупругости под симметричной нагрузкой и высокими температурами. Однако в этих трудах не нашел отражения вопрос, связанный с несимметричной термосиловой нагрузкой. В работе [9] предложен подход, основанный на использовании инженерного анализа для расчета статически нагруженных конструкций. Тем не менее, из приведенных в ней результатов недостаточно ясна картина растрескивания сварного шва. В работе [10] предложен подход, основанный на результатах испытаний и использования инженерного анализа для расчета статически нагруженных конструкций. Методика из [10] позволяет делать качественный анализ, а не численный, подтверждающий работоспособность сварного шва.

В данном исследовании рассмотрен расчет сварных швов конструкции в условиях нестационарных температурных и силовых воздействий в связанной термоупругой постановке, в связи с отсутствием в литературе численных решений этой проблемы.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью данного исследования является разработка методики определения напряжений в микродефектах (порах) сварных швов пластинчатых конструкций, подверженных одновременному действию температурных и силовых нагрузок.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- определить метод приложения нагрузок, при котором результаты расчетов должны быть приближены к полученным инженерными методами;
- выбрать оптимальное число элементов для быстрого получения верных результатов;
- создание расчетной схемы описывать суть исследования.

### 4. Методика – математическая модель, исходные данные, результаты расчетов

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

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

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

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

или, в матричной записи

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

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

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

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

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

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

Полная деформация  $\{\epsilon\}$  в рассматриваемой точке равна сумме упругой деформации,  $\{\epsilon'\}$  обусловленной внешними нагрузками, и тепловой деформации  $\{\epsilon^t\}$ , т.е.

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

Отсюда определяем величину упругой деформации

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

Тогда напряжения в линейно-упругом теле можно определить по закону Гука (формула (6) из [10])

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

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

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

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 [10], а также начальным и граничным условиям.

Задача решалась по времени.

В работе анализируется взаимное влияние двух пор диапазоном диаметров 0.25÷0.35 см. Поры находятся в сварном шве, соединяющем две пластины толщиной 4 см каждая. Рассматривались различные расстояния между порами и оценка взаимного влияния напряжений в порах на развитие трещин в сварном шве. Методика позволяет определить влияние микродефектов на дальнейшее раскрытие трещин. Это позволяет прогнозировать поведение микродефектов на общую картину прочности конструкции.

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

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

где N – количество элементов,  $\{\Phi\}$  – 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

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

или в матричной записи

$$\{\epsilon^t\} = \{\alpha\} \left[ \{\Phi\}^T \times (\{T\} - \{T_0\}) \right], \quad (7)$$

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

Подставляя (3) в уравнения равновесия (температурные перемещения внутри элемента) (3) из [11] и проводя преобразования, аналогичные выполненным при выводе соотношений (перемещения в вертикальном направлении) (7) в [11], приходим к системе уравнений равновесия конечного элемента упругого тела при наличии температурного воздействия

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

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)

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

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 термомеханики 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. Материал пластинок – сталь 10ХСНД.

Модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно равны E=2.1×10<sup>6</sup>кгс/см<sup>2</sup>; ν=0.3. Плотность материала пластинки равна ρ<sub>p</sub>=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 3-слойная модель, в месте реализации пор проведено сгущение элементов, состоящая для рассматриваемой конструкции из 130000 элементов.

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

Расчет проводился на температурные нагрузки и давление на боковые поверхности.

Рассматривался диапазон температур от 135–170 °С в сварном шве. Давление на боковые поверхности принималось равным P<sub>1</sub>=1,6 кгс/см<sup>2</sup> и P<sub>2</sub>=–0,5 кгс/см<sup>2</sup>.

На рис. 1 показан короб с местами заделки и схемой приложения нагрузки.

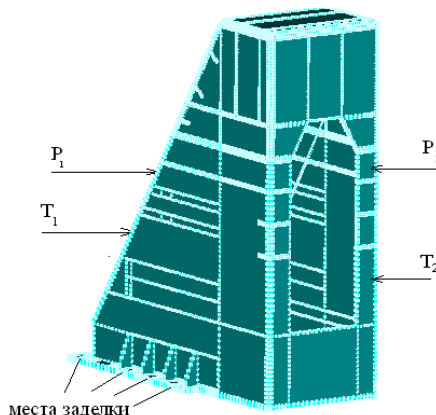


Рис. 1. Места заделки схема приложения нагрузки

На рис. 2 показана конечно-элементная модель короба.

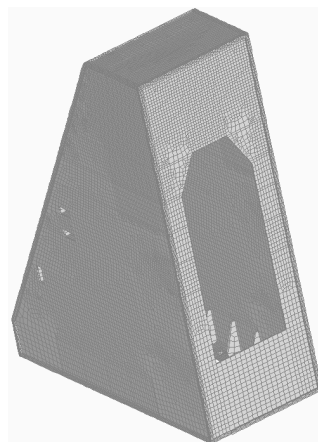


Рис. 2. Конечно-элементная модель короба

На рис. 3 показаны места максимальных напряжений в конечно— элементной модели короба по сварным швам.

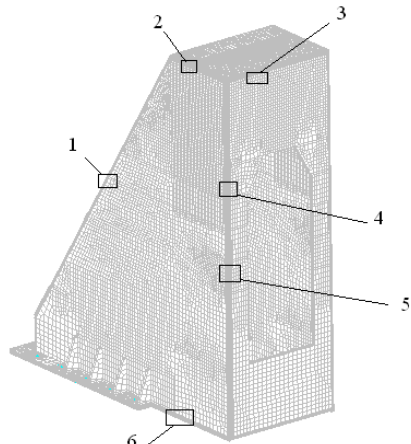


Рис. 3. Конечно-элементная модель короба с местами максимальных напряжений в сварных швах

На рис. 4 показана конечно-элементная модель пластин и сварного шва.

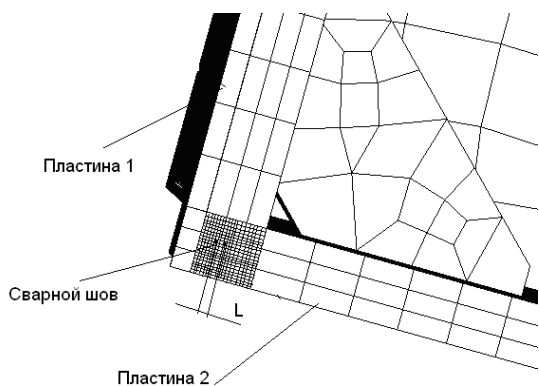


Рис. 4. Конечно—элементная модель сварного шва и пластин

Исходные данные и результаты расчета приведены в табл. 1 для пор диаметром 0.25 см.

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета для пор диаметром 0.25 см

L, мм	T, °C	$\sigma_{0,2t}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$ , кгс/см <sup>2</sup>
0,875	159	3280	3310
1,75	152	3300	3300
2,625	148	3300	3300
3,5	146	3300	3300
4,375	144	3310	3300
5,25	142	3315	3300
6,125	140	3320	3300
7	138	3320	3300

Примечание:  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  – максимальные напряжения в узле поры с максимальной температурой;  $\sigma_{0,2t}$  – минимально допустимые напряжения в сварном шве (по пределу пропорциональности); L – расстояние между порами

Исходные данные и результаты расчета приведены в табл. 2 для пор диаметром 0.3 см.

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчета для пор диаметром 0.3 см

L, мм	T, °C	$\sigma_{0,2t}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$ , кгс/см <sup>2</sup>
0,875	159	3280	3400
1,75	152	3300	3360
2,625	148	3300	3320
3,5	146	3300	3300
4,375	144	3310	3300
5,25	142	3315	3300
6,125	140	3320	3300
7	138	3320	3300

Примечание:  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  – максимальные напряжения в узле поры с максимальной температурой;  $\sigma_{0,2t}$  – минимально допустимые напряжения в сварном шве (по пределу пропорциональности); L – расстояние между порами

Исходные данные и результаты расчета приведены в табл. 3 для пор диаметром 0.35 см.

Таблица 3

Исходные данные и результаты расчета для пор диаметром 0.35 см

L, мм	T, °C	$\sigma_{0,2t}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$ , кгс/см <sup>2</sup>
0,875	159	3280	3600
1,75	152	3300	3550
2,625	148	3300	3530
3,5	146	3300	3490
4,375	144	3310	3460
5,25	142	3315	3420
6,125	140	3320	3400
7	138	3320	3360

Примечание:  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  – максимальные напряжения в узле поры с максимальной температурой;  $\sigma_{0,2t}$  – минимально допустимые напряжения в сварном шве (по пределу пропорциональности); L – расстояние между порами

Из результатов табл. 3 следует, что сварной шов с порами диаметром 0.35 см будет максимально подвержен растрескиванию.

### 5. Обсуждение результатов исследования

1. Достоинством методики является возможности оценки, какие напряжения будут оказывать главное влияние на картину растрескивания пор в пространстве.
2. Недостаток методики заключается в сложности построения модели описывающей физику исследуемого процесса.
3. Результаты исследования можно применить для продления срока эксплуатации конструкций дефекты сварных швов, которых выходят за рамки допустимых.
4. Данные исследования являются продолжением разработки методики определения напряжений и деформаций в сварных швах под воздействием не симметричной термосиловой нагрузки из [12].

5. Полученные результаты означают, что термосиловая нагрузка приведет к растрескиванию пор диаметром 0.35 см.

## 6. Выводы

Результаты проведенных расчетов позволили сделать следующие выводы:

1. Из полученных результатов для пор диаметром 0.25 см в таблице 1 следует: поры в подобном сварном шве не оказывают существенного влияния друг на друга, максимальные напряжения  $\sigma_{\text{экр}}^{\text{max}}=3310$  кгс/см<sup>2</sup> не приведут к раскрытию трещин возле пор.

2. При реализации расстояния между порами  $L=0.0875$  см при диаметре пор 0.3 см, возникнут предпосылки для раскрытия трещины.

3. В поре диаметром 0.35 см подверженной максимальной температуре напряжения выше допустимых  $\sigma_{\text{экр}}^{\text{max}}=3600$  кгс/см<sup>2</sup>. В узлах вокруг поры будет происходить процесс раскрытия трещин.

4. Метод приложения нагрузок был заимствован из [12] полученные результаты удовлетворяют 3% погрешности от результатов полученных инженерным методом.

5. Для получения результатов удовлетворяющих аналитическим методам оптимальным является числом 130000 элементов.

6. Из использованных расчетных схем оптимальной для этих исследований оказалась расчетная схема из [13].

Особенность исследований заключается в задании различных нагрузок по времени, по глубине пластин, по длине пластин и сварных швов. Рассматривался анализ напряженно-деформированного состояния шва на всех этапах нагружения до полного остывания конструкции. Проведено исследование различных методов приложения нагрузки. Достоверность результатов определена использованием инженерных методов.

В дальнейшем рассмотрим оценку усталости сварного шва с учетом дальнейшего раскрытия трещины.

## Литература

1. Великоиваненко, Е. А. Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях [Текст] / Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка, А. С. Миленин, Н. И. Пивторак // Автоматическая сварка. – 2013. – № 9. – С. 26–31
2. Кит, Г. С. Определение трехмерных температурных полей и напряжений в бесконечном теле с разрезами [Текст] / Г. С. Кит, М. В. Хай // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1982. – № 5. – С. 60–67.
3. Salehi, I. Multi-axial fatigue analysis of aluminothermic rail welds under high axle load conditions [Text] / I. Salehi, A. Kapoor, P. Mutton // International Journal of Fatigue. – 2011. – Vol. 33, Issue 9. – P. 1324–1336. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2011.04.010
4. Minak, G. Fatigue properties of friction stir welded particulate reinforced aluminium matrix composites [Text] / G. Minak, L. Ceschini, I. Boromei, M. Ponte // International Journal of Fatigue. – 2010. – Vol. 32, Issue 1. – P. 218–226. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2009.02.018
5. Moreira, P. M. G. P. Fatigue behaviour of notched specimens of friction stir welded aluminium alloy 6063-T6 [Text] / P. M. G. P. Moreira, F. M. F. de Oliveira, P. M. S. T. de Castro // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – Vol. 207, Issues 1-3. – P. 283–292. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.12.113
6. Wang, Y. Thermal fatigue behavior of an iron-based laser sintered material [Text] / Y. Wang, J. Bergström, C. Burman // Materials Science and Engineering: A. – 2009. – Vol. 513-514. – P. 64–71. doi: 10.1016/j.msea.2009.01.053
7. Алтухов, Е. В. Метод И. И. Воровича в трехмерной теории термодинамики пластин [Текст] / Е. В. Алтухов // Теоретическая и прикладная механика. – 2005. – Вып. 41. – С. 3–8.
8. Ньян, Нгуен Влияние дефектов сварных швов на механические свойства корпусной стали, определяемые при статическом нагружении [Текст] / Нгуен Ньян, А. Н. Рубан // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. – 2015. – № 2. – С. 13–21.
9. Серенко, А. Н. Оценка влияния остаточных напряжений на кинетику развития усталостных трещин в сварных соединениях [Текст] / А. Н. Серенко // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2011. – № 22. – С. 156–161.
10. Новацкий, В. Динамические задачи термоупругости [Текст] / В. Новацкий. – М.: Мир, 1970. – 256 с.
11. Шимкович, Д. Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows [Текст] / Д. Г. Шимкович. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с.
12. Ковч, О. И. Исследование прочности сварных швов методом конечных элементов [Текст] / О. И. Ковч // Весник Херсонського національного технічного університету. – 2013. – № 2. – С. 159–162.
13. Ковч, О. И. Исследование растрескивания поверхностей при термосиловом нагружении [Текст] / О. И. Ковч // Весник Херсонського національного технічного університету. – 2015. – № 3. – С. 367–371.