

## АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСЛЕ СВАРКИ КОНСТРУКЦИЙ СЛОЖНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ С КРИВОЛИНЕЙНЫМИ ТРАЕКТОРИЯМИ СВАРНЫХ ШВОВ

Р. В. Никифоров<sup>1</sup>, О. В. Муругова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>nikiforov\_svarka@mail.ru, <sup>2</sup>murugova.oxana@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Статья посвящена математическому моделированию сварочных процессов для части корпуса авиационного двигателя в среде ANSYS/Mechanical. Для имитации сварочного источника был использован трехмерный источник – двойной эллипсоид Голдака. Математическая формула источника была преобразована для движения по сложным криволинейным траекториям. Был проведен тепловой анализ, были изучены тепловые поля. Далее, взяв распределения температур на каждом временном шаге как граничные условия деформационной задачи, был проведен структурный анализ.

**Ключевые слова:** сварка; остаточные напряжения; математическое моделирование; ANSYS; тепловые поля; двойной эллипсоид Голдака.

### ВВЕДЕНИЕ

Технологический процесс сварки является важным этапом при производстве современных авиационных двигателей. Процесс сварки сопровождается резкими изменениями температуры, что может породить ряд дефектов, например, трещинообразование

Для тонкой настройки режимов требуется проводить ряд дорогостоящих натурных экспериментов, и для их уменьшения целесообразно развивать современные методы численного моделирования.

В данной статье предлагается рассмотреть промежуточные результаты моделирования сварки части узла авиационного корпуса с целью определения режимов сварки с наименьшим уровнем напряжений.

### ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Моделирование остаточных сварочных напряжений проводилось в инженерном пакете Ansys/Mechanical в два этапа:

1) проведение термического анализа для получения распределения тепловых полей;

2) проведение деформационного анализа на основе результатов термического анализа.

Для описания температурного поля  $T(x, y, z, t)$  в части авиационного корпуса использовали дифференциальное нелинейное уравнение теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right),$$

где  $\rho(T)$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $c(T)$  – теплоемкость, Дж/кг·°С;  $\lambda(T)$  – теплопроводность, Вт/м·°С.

Для имитации нагрева использовалась математическая модель двойного полуэллипсоида Голдака [1].

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}Q}{a_h b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \exp \left( -\frac{3x^2}{a_h^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{c_h^2} \right);$$

где  $a, b, c$  – это полуоси эллипсоида, а  $Q$  – тепловой поток.

Данная формула была преобразована в функцию движения источника нагрева в среде ANSYS.

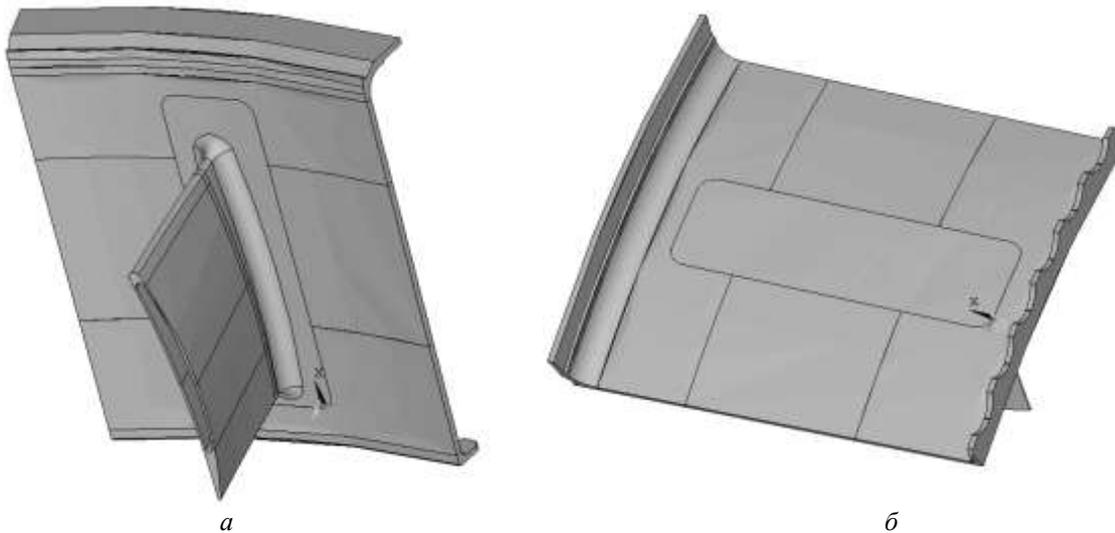


Рис. 1. Геометрия элемента авиационного корпуса в разных проекциях. (а), (б)

В пакете ANSYS была построена геометрическая модель элемента авиационного корпуса (рис. 1). Была построена конечно-элементная сетка переменного размера: мелкая в зоне шва и ЗТВ и крупная на остальных участках.

Так как для данной геометрии сварка идет не линейно прямо, а по сложным криволинейным траекториям, функции движения источника нагрева были параметризованы.

Была проведена имитация сварки по сложным криволинейным траекториям со внутренней стороны корпуса. Было произведено множество экспериментов для достижения требуемой зоны проплавления.

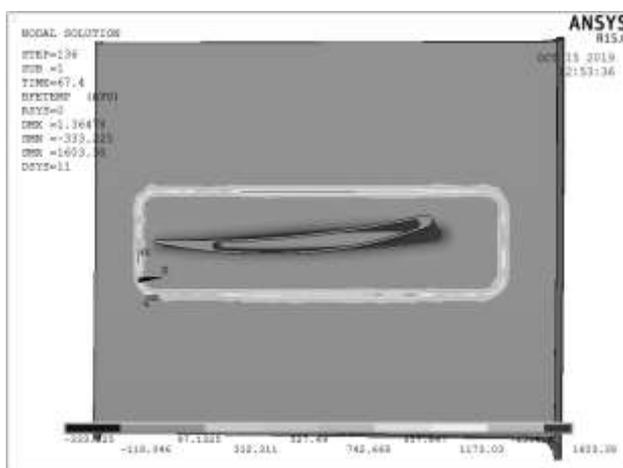
Далее, беря результаты теплового анализа (рис. 2, а) как граничные условия для

деформационного, был проведен деформационный анализ с целью определения остаточных напряжений после сварки (рис. 2, б).

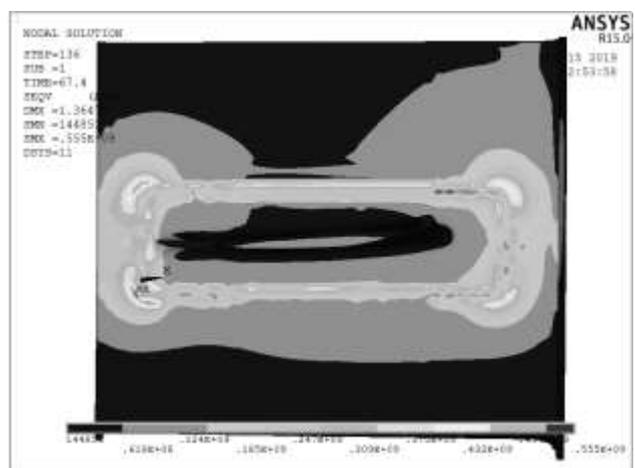
#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение современных методов математического моделирования позволяет существенно снизить количество натурных экспериментов на этапе освоения изготовления изделия.

Технология использования параметризованных источников тепла, совмещенная с технологией переноса систем локальных координат, позволяет получить гибкую систему для моделирования однотипных сварных соединений.



а



б

Рис. 2. Результаты теплового (а) и деформационного (б) анализов

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Атрощенко В. В., Никифоров Р. В., Муругова О. В.** Моделирование структурно-фазовых превращений при сварке высокопрочных трубных сталей с учетом различных вариантов поставки стали // Сварка и диагностика. 2018. №2. С. 48-51. [V. V. Atrochenko, R. V. Nikiforov, and O. V. Murugova, "Modeling of structural-phase transformations during welding of high-strength pipe steels taking into account various options for the supply of steel," (in Russian), in Svarka i diagnostika, no. 2, pp. 48-51, 2018.]

## ОБ АВТОРАХ

**НИКИФОРОВ Роман Валентинович**, доцент каф. СЛАТ. Дипл. инженер (УГАТУ, 2009). Канд. техн. наук по сварке, родственным процессам и технологиям (МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014). Иссл. в обл. моделирования сварочных процессов.

**МУРУГОВА Оксана Владимировна**, асп. каф. СЛАТ. Дипл. магистра машиностроения (УГАТУ, 2017). Готовит дис. о моделировании сварочных процессов.

## METADATA

**Title:** Analysis of residual stresses after welding of structures of complex spatial geometry with curved linear welds

**Authors:** R. V. Nikiforov <sup>1</sup>, O. V. Murugova <sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> nikiforov\_svarka@mail.ru, <sup>2</sup> murugova.oxana@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (22), pp. 109-111, 2020. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The article is devoted to mathematical modeling of welding processes for a part of the aircraft engine body in the ANSYS / Mechanical environment. To simulate a welding source, a three-dimensional source was used - a double ellipsoid of Goldak. The mathematical formula of the source was transformed to move along complex curved paths. Thermal analysis was carried out, thermal fields were studied. Further, taking the temperature distributions at each time step as the boundary conditions of the deformation problem, a structural analysis was carried out.

**Key words:** welding, residual stresses, mathematical modeling, ANSYS, thermal fields, Goldak double ellipsoid.

**About authors:**

**NIKIFOROV, Roman Valentinovich**, assistant professor, Dept. of Department of Welding, Foundry and Additive Technologies, Dipl. Engineer (UGATU, 2009). Cand. of Tech. Sci. (MSTU named after N.E. Bauman, 2014).

**MURUGOVA, Oksana Vladimirovna**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Department of Welding, Foundry and Additive Technologies, Master of Engineering (UGATU, 2017).