

## ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСЛЕ СВАРКИ НА ГЕОМЕТРИЯХ С БОЛЬШИМ КОЛИЧЕСТВОМ 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 проблеме математического моделирования остаточных напряжений после сварки на сложных геометриях с большим количеством сварных швов. При математическом моделировании остаточных напряжений после сварки на сложных конструкциях возникли следующие проблемы: требуется избыточно большое время расчета и избыточные затраты при сохранении результатов расчета. В статье описана возможность по переносу полей напряжений и деформаций с мелкой сетки на более крупную сетку. Приведен алгоритм в виде блок-схемы по переносу деформаций. Приведены результаты.

**Ключевые слова:** сварка; остаточные напряжения; математическое моделирование; ANSYS; поле температур; поле напряжений; блок-схема; алгоритм.

### ВВЕДЕНИЕ

Современное авиастроение все чаще и чаще сталкивается с задачами и проблемами, решить которые без применения наукоемкого аппарата математического моделирования становится сложно. Одна из таких задач – сварка тонкостенных ажурных конструкций со множеством сварных швов и расчет остаточных напряжений после проведения работ.

В данной статье предлагается рассмотреть одну из проблем, с которой можно столкнуться при проведении математического моделирования, а именно избыточность требуемых мощностей для решения задачи.

### АЛГОРИТМ РАБОТЫ

Математическое моделирование остаточных напряжений после сварки для сложных геометрий целесообразно проводить с помощью конечно-элементного моделирования. Для этого исходная геометрия разбирается на конечные элементы, называемые сеткой.

От размера элементов и их количества существенно зависит время и погрешность расчета. При моделировании на небольших моделях лучше использовать сетки переменного размера – мелкую в зоне термического воздействия (ЗТВ) и непосредственно в зоне сварного шва и крупную в других областях. Однако даже это не всегда может полностью облегчить рассчитываемую модель. Рассмотрим эту проблему на примере узла авиационного двигателя (рис. 1, а).

В рассматриваемой модели предполагается моделирование 15ти сварных швов (рис. 1, а) для оценки уровня остаточных напряжений после сварки. В связи с тем, что нужно узнать суммарный эффект от напряжений после всех сварочных работ, нельзя «обрезать» модель и считать деформации только на одном секторе.

Была построена конечно-элементная сетка переменного размера – мелкая в зоне шва и ЗТВ и более крупная на остальной геометрии (рис. 2). Количество элементов сетки – 500 тыс.

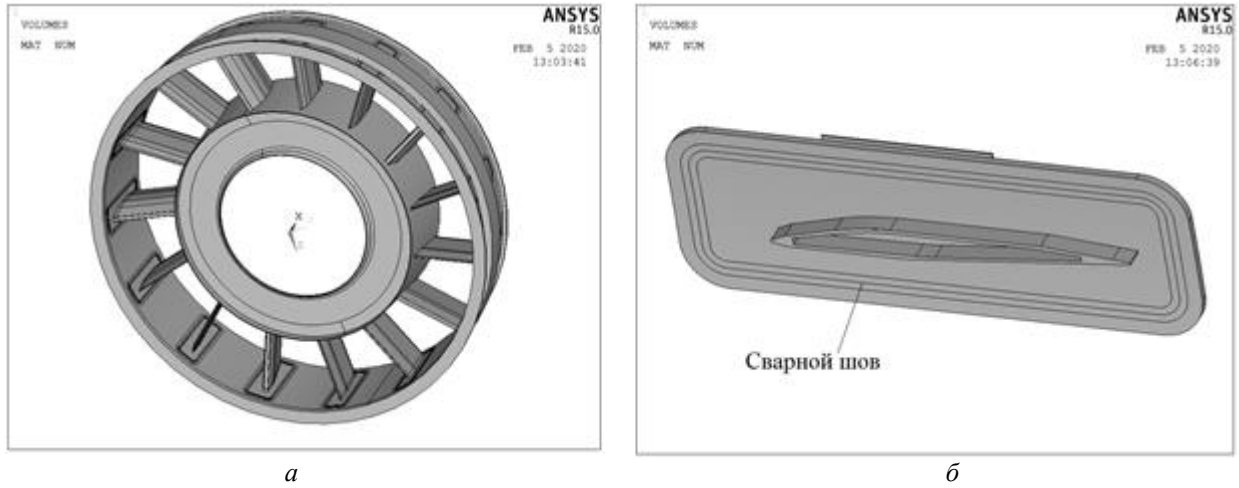


Рис. 1. Общий вид геометрии узла авиационного двигателя (а) и фрагмент геометрии со сварным швом (б)

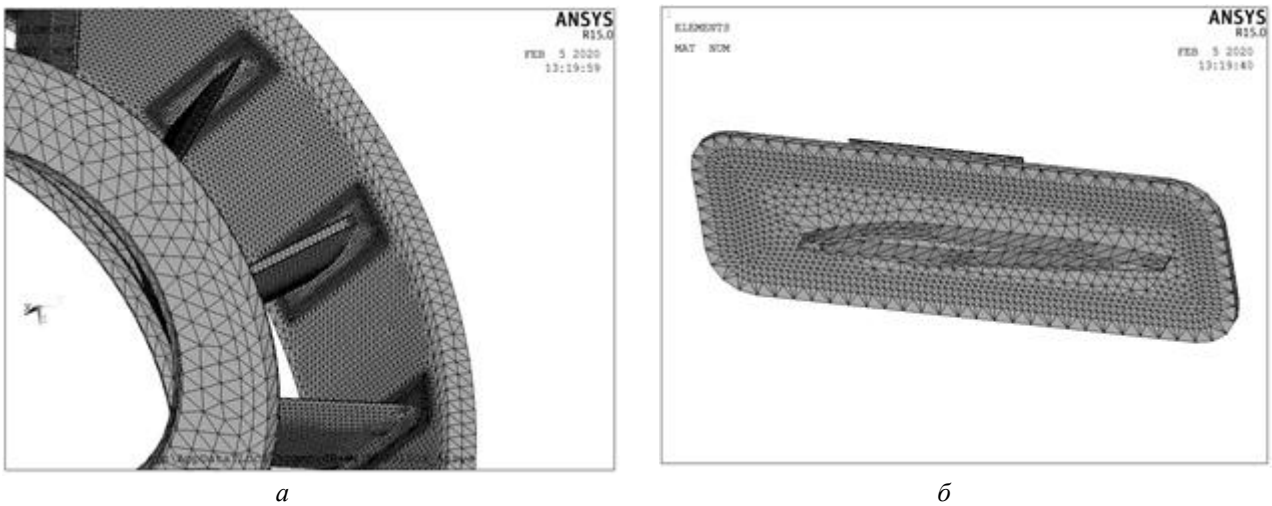


Рис. 2. Вид конечно-элементной сетки на общем плане (а) и для области вокруг сварного шва (б)

Специфика моделирования напряженно-деформированного состояния в том, что сначала надо провести тепловой анализ, а потом, беря распределение температур на каж-

дом шаге как граничные условия, можно рассчитать получаемые деформации (однако стоит отметить, что при анализе деформаций можно сохранять не каждый шаг расчета).

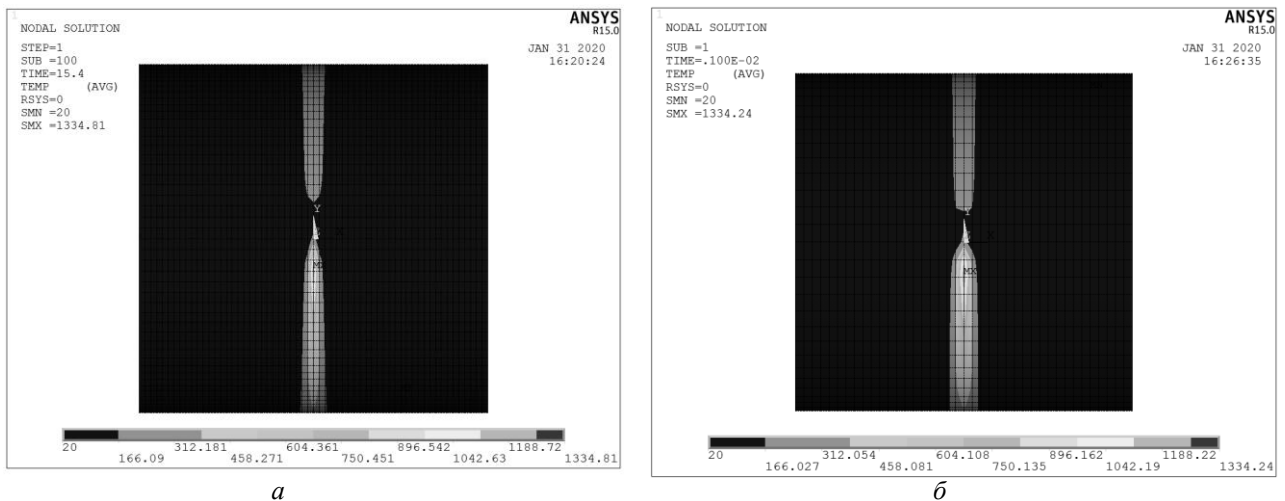


Рис. 3. Пример переноса поля температур с мелкой сетки (а) на более крупную (б)

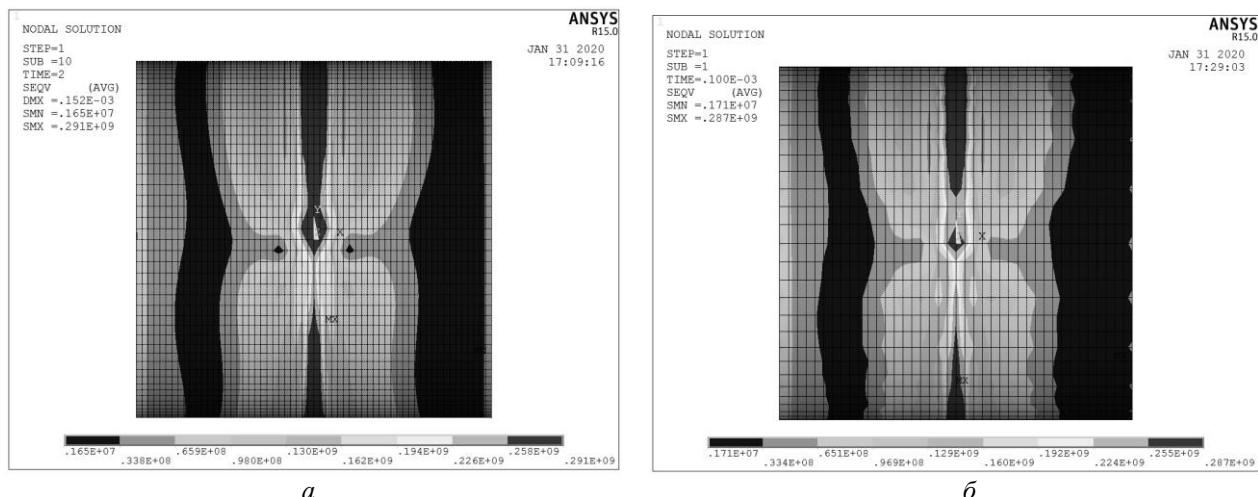


Рис. 4. Пример переноса поля напряжений с мелкой сетки (а) на более крупную (б)

Таким образом, для проведения теплового анализа для одного сварного шва требуется 6 часов расчетов и 27 ГБ памяти, а для деформационного анализа – 11 часов и 1,5 ГБ памяти на каждый сохраняемый шаг расчета.

Для уменьшения времени расчетов и компьютерной памяти был разработан алгоритм [1] по «переносу» полей напряжений и температур с одной конечно-элементной сетки на другую.

Этот метод позволяет проводить тепло-деформационный анализ на крупной во всех областях и секторах конечно-элементной сетке, кроме одного сектора, где проходит сварка. После проведения моделирования на одном секторе поля напряжений и температур «переносятся» на сетку, где текущий сектор имеет крупное разбиение, а сектор для последующей сварки – мелкое.

Рассмотрим алгоритм по переносу деформаций с одной конечно-элементной сетки на другую (рис. 5).



Рис. 5. Блок-схема алгоритма по переносу деформаций

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм был успешно протестирован для тепловой (рис. 3) и деформационной (рис. 4) задач. Использование данного метода позволяет существенно снизить время расчетов и занимаемую память для сложных проектов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mapping stresses when using ANSYS mechanical APDL [Электронный ресурс]. URL: <https://www.simutechgroup.com/tips-and-tricks/fea-articles/384-mapping-stresses-when-using-ansys-mechanical-apdl> (дата обращения 20.03.2020). [Mapping stresses when using ANSYS mechanical APDL (2020, Mart 20) [Online]. Available: <https://www.simutechgroup.com/tips-and-tricks/fea-articles/384-mapping-stresses-when-using-ansys-mechanical-apdl>]

### 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. магистр 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. 2 (23), pp. 101-104, 2020. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The article is devoted to the problem of mathematical modeling of residual stresses after welding on complex geometries with a large number of welds. In mathematical modeling of residual stresses after welding on complex structures, the following problems arose: excessively long calculation time and excessive costs were required while saving the calculation results. The article describes the possibility of transferring stress and strain fields from a fine mesh to a larger mesh. An algorithm is presented in the form of a block diagram for the transfer of deformations. The results are given.

**Key words:** welding, residual stress, mathematical modeling, ANSYS, temperature field, stress field, block diagram, algorithm.

**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).