

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ COMPUTER-AIDED DESIGN

УДК 681.5.015
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-49-61>

Поступила в редакцию | Received 17.06.2026
Подписана в печать | Accepted 07.07.2026
Опубликована | Published 30.09.2026

Развитие компьютерной технологии моделирования остаточных сварочных явлений

М. В. Жуковец

E-mail: mikhail.zhukavets@mail.ru

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь*

Аннотация

Цели. Целями работы являются демонстрация возможности применения компьютерной технологии моделирования остаточных сварочных явлений, сравнение с результатами аналитического расчета классических примеров сварных конструкций, представление проекта программного комплекса по автоматизации расчета остаточных явлений сварных конструкций.

Методы. Предлагается силовой метод расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) сварных конструкций общего назначения на примере расчета балочных и оболочечных сварных конструкций. Приводится описание существующих подходов для расчета сварочных явлений, а также программного комплекса, реализующего силовой метод расчета НДС сварных конструкций. Анализируются перспективы перехода на параллельные архитектуры и дальнейшего развития и применения силового метода.

Результаты. Показана хорошая сходимость результатов расчета деформаций сварных конструкций в сравнении с аналитическими методами и возможность автоматизации создания компьютерных моделей расчета остаточных сварочных явлений на примере проекта программного комплекса.

Заключение. Представлены главные направления развития и преимущества технологии: снижение трудоемкости, интеграция в САПР, оптимизация сборочных процессов, масштабируемость. Описаны перспективы перехода на параллельные архитектуры.

Ключевые слова: компьютерная технология, компьютерные модели, сварные конструкции общего назначения, остаточные сварочные явления, напряженно-деформированное состояние, силовой метод расчета, аналитические методы расчета, программный комплекс, параллельные архитектуры

Для цитирования. Жуковец, М. В. Развитие компьютерной технологии моделирования остаточных сварочных явлений / М. В. Жуковец // Информатика. – 2026. – Т. 23, № 3. – С. 49–61. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-49-61>.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Development of computer technology for modeling residual welding phenomena

Mikhail V. Zhukavets

E-mail: mikhail.zhukavets@mail.ru

*The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus,
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus*

Abstract

Objectives. The objectives of the work are to demonstrate the possibility of applying computer technology for modeling residual welding phenomena and compare them with the results of analytical calculations for classic welded structures. A software package project for automating the calculation of residual welding phenomena is presented.

Methods. The principles of applying the force-based method for calculating the stress-strain state (SSS) of general-purpose welded structures are demonstrated using the example of beam and shell welded structures. A description of existing approaches for calculating welding phenomena is provided, as well as a software package implementing the force-based method for calculating the SSS of welded structures. Prospects for transitioning to parallel architectures and further development and application of the force-based method are analyzed.

Results. Good convergence of the results of calculating deformations of welded structures in comparison with analytical methods and the possibility of automating the creation of computer models for calculating residual welding phenomena are shown, using the example of a software complex project.

Conclusion. The main directions of development and advantages of the technology are highlighted: reduction of labor intensity, CAD integration, optimization of assembly processes, and scalability. Prospects for transitioning to parallel architectures are discussed.

Keywords: computer technology, computer models, general-purpose welded structures, residual welding phenomena, stress-strain state, force calculation method, analytical calculation methods, software package, parallel architectures

For citation. Zhukavets M. V. *Development of computer technology for modeling residual welding phenomena*. Informatika [Informatics], 2026, vol. 23, no. 3, pp. 49–61 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-49-61>.

Conflict of interests. The author declares of no conflict of interest.

Введение

Актуальность развития компьютерных технологий моделирования остаточных явлений (напряжений и деформаций) дуговой сварки обусловлена необходимостью повышения надежности ответственных конструкций и снижения затрат на их производство. Можно выделить главные аспекты актуальности:

1. Возможность прогнозирования ресурса сварных конструкций: компьютерное моделирование позволяет выявлять критические зоны на этапе проектирования.
2. Снижение материальных и временных затрат: компьютерное моделирование позволяет отказаться от многочисленных дорогостоящих натурных экспериментов, снижая трудоемкость и расход металла.

3. Возможность оптимизировать параметры режима сварки: компьютерное моделирование помогает подобрать лучшее соотношение сварочного тока, скорости сварки и теплоотвода, чтобы минимизировать деформации, вызванные неравномерным нагревом металла.

4. Лучшее понимание сложности физических процессов: компьютерное моделирование позволяет наглядно представить сложные высокотемпературные теплофизические и термомеханические процессы.

5. Цифровизация производства: внедрение информационных систем для определения параметров сварки разнородных материалов является частью глобального перехода к Индустрии 4.0.

1. Развитие теории и методов расчета напряжений и деформаций сварных конструкций

Суть представленного в статье нового силового подхода – это развитие метода собственных деформаций, имеющего единую физическую природу с упрощенными теориями расчета сварочных напряжений и деформаций. Изобретателем метода собственных деформаций (Inherent Strain Method) [1, 2] является легендарный японский ученый Юкио Уэда (Yukio Ueda), который предложил измерять или вычислять деформацию в зоне шва один раз, а затем прикладывать ее как нагрузку к большой модели. Это позволило с высокой точностью предсказывать перекосы огромных судовых секций.

Метод собственных деформаций – это подход в механике твердого деформируемого тела, основанный на анализе внутренних деформаций, возникающих без внешней нагрузки. Он используется для расчета напряжений, вызванных структурными изменениями, неравномерным нагревом или сваркой. В сварке метод применяется для определения остаточных напряжений и деформаций, возникающих из-за неравномерного распределения температур. Собственные деформации в этом контексте называют остаточными напряжениями после остывания.

Главное преимущество метода собственных деформаций заключается в том, что вместо моделирования всего сложного процесса нагрева и остывания во времени (что требует огромных ресурсов) метод фокусируется на финальном результате – собственной деформации, которая остается в металле после термического цикла.

Из теории метода делается предположение, что из-за локального нагрева металл расширяется, но ему мешают окружающие холодные участки. Происходит пластическая деформация (собственная деформация), которую прикладывают к упругой модели детали как эквивалентную нагрузку. В результате система приходит в равновесие и происходят итоговые коробления и распределение напряжений в теле конструкции.

Основные достоинства метода собственных деформаций заключаются в скорости расчета – метод в десятки раз быстрее, чем полноценный термомеханический расчет, и позволяет считать огромные сборки или детали с тысячами слоев 3D-печати. Необходимую точность расчета можно достичь при правильной калибровке (на основе небольших тестовых образцов), что дает результаты, близкие к реальным замерам. Этот метод сейчас является стандартом в программном обеспечении для моделирования аддитивного производства (Ansys Additive, Simufact Additive, Netfabb).

Следует упомянуть упрощенные методы расчета сварочных напряжений и деформаций, созданные советскими учеными. Такие методы возникли как инженерная альтернатива сложным термомеханическим задачам для быстрого проектирования сварных конструкций. В основе многих упрощенных методов лежит теория Окерблома (разработанная советским ученым Н. О. Окербломом в 1940–50-х гг.), которая заменила трудоемкие математические вычисления. В 1958 г. книга [3] была переведена на английский язык и издана в Лондоне [4], получив мировое признание, что сделало метод Окерблома стандартом международного уровня.

Упрощенные теории расчета позволяют оценить состояние конструкции без сложных конечно-элементных моделей. В их основе лежат допущения о жесткопластическом поведении металла и линейном распределении температур.

Основные подходы упрощенных теорий расчета НДС:

1. Теория Г. А. Николаева (метод сечений) [5]. Основана на гипотезе плоских сечений. Предполагается, что в зоне нагрева выше критической температуры металл течет пластически, а после остывания там остаются остаточные напряжения, равные пределу текучести. Это позволяет аналитически рассчитать прогиб и укорочение.

2. Метод фиктивных (усадочных) сил [6]. Сварной шов и прилегающая зона рассматриваются как источник внутренних растягивающих сил. Предполагается, что шов (зона сплавления (ЗС)) сжимается, но основной металл ему мешает. Зная погонную энергию сварки, можно вычислить усадочную силу и определить общую деформацию сварной конструкции.

3. Метод Н. О. Окерблома [7] – упрощенный графический и аналитический способ определения деформаций изгиба. Он связывает коэффициент поперечной усадки с площадью поперечного сечения шва и жесткостью конструкции.

Следует упомянуть фундаментальный труд К. М. Гатовского и В. А. Кархина [8], ставший классическим пособием для вузов и настольной книгой инженеров в области физики и механики сварочных процессов. Пособие описывает законы распределения температурных полей в металлах ($T(x, y, z, t)$), механизмы формирования термических и структурных напряжений, методы прогнозирования и способы снижения остаточных деформаций тонколистовых и массивных конструкций. Это пособие до сих пор считается базовым для студентов машиностроительных и кораблестроительных специальностей.

Автор настоящей статьи на основе трудов доктора технических наук С. В. Медведева [9, 10] создал новые модели и алгоритмы компьютерного моделирования при дуговой сварке. Фактически научная работа является продолжением развития упрощенных теорий расчета НДС сварных конструкций, представленных в трудах Г. А. Николаева [5], Н. Н. Рыкалина [6], Н. О. Окерблома [3, 4, 7], К. М. Гатовского и В. А. Кархина [8].

Методика включает в себя модели и алгоритмы прогнозирования остаточного ресурса и работоспособности сварных конструкций с учетом их внутреннего напряженного состояния. Она позволяет снизить время создания моделей прогнозирования остаточных явлений при дуговой сварке на этапах конструкторской и технологической подготовок. Программный комплекс на основе новой методики дает возможность реализовывать модели и алгоритмы как в программном обеспечении на базе открытых кодов, так и в версиях для суперкомпьютерного окружения.

Все вышеприведенное позволяет в совокупности значительно уменьшить время расчета сварных конструкций общего назначения, а также дает возможность конструкторской службе в приемлемое время получить представление о величине и направлении остаточных деформаций с закладываемыми на сборочных чертежах допусками.

2. Новый подход расчета напряжений и деформаций сварных конструкций

Принципы данного метода (силового) подробно описаны в статье [11], где было указано, что главным источником изложенной концепции силового метода являются положения упрощенной теории сварочных напряжений и деформаций [9, 10, 12]. За прошедшее время метод был доработан на базе конечно-элементного программного комплекса *Salome* (версия 9.7.0). Зона термического влияния (ЗТВ) и ЗС стали задаваться на основе базовых примитивов (цилиндров), центры которых совпадают с точкой приложения сварочного источника (рис. 1). Центры примитивов повторяют траекторию движения сварочного источника. Примитивы в конечно-элементных комплексах очень удобны в плане автоматизированной параметризации и последующего разбиения геометрических тел на конечные элементы. Кроме того, при преобразовании поверхностей примитивов в контактные поверхности уменьшается количество ошибок конечно-элементной сетки. На рис. 1 показана геометрия ЗТВ и ЗС нахлесточного сварного соединения двух пластин.

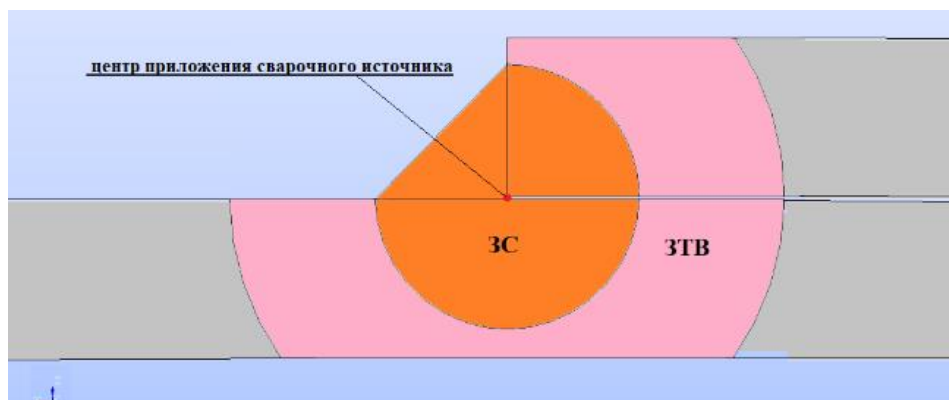


Рис. 1. Геометрия ЗТВ и ЗС нахлесточного сварного соединения

Fig. 1. Geometry of the HAZ (heat-affected zone) and FZ (fusion zone) of the lap welded joint

Силовой метод заменяет собой термомеханическую задачу. Поэтому параметры, важные при моделировании тепловых процессов: температурные коэффициенты линейного расширения α , теплопроводность λ , объемная теплоемкость C' , коэффициент теплоотдачи с поверхности α_m , заменяются на силы (давление, равное пределу текучести металла σ_T).

В процессе остывания в ЗТВ и ЗС преобладают высокие продольные растягивающие напряжения, достигающие σ_T , но так как ЗТВ ограничивает основной металл конструкции, то эти напряжения в зоне ЗТВ меняют знак и преобразуются в поперечные сжимающие напряжения. Растягивающие напряжения остаются на концах ЗТВ и ЗС.

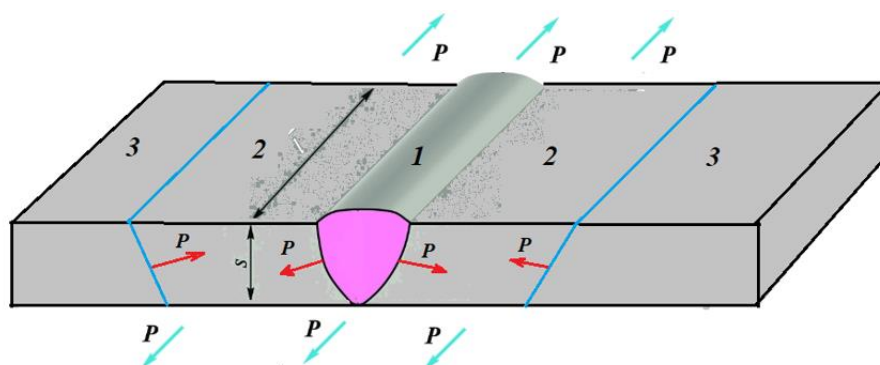


Рис. 2. Схема приложения давлений, равных σ_T , на модель свариваемых пластин при использовании силового метода: 1 – ЗС, 2 – ЗТВ, 3 – основной металл

Fig. 2. Scheme of pressure application equal to the yield strength on the model of welded plates using the force method: 1 – FZ, 2 – HAZ, 3 – base material (metal)

Для воссоздания поперечной усадочной силы $P_{ус.п}$ давление, равное σ_T металла, прикладывается на границе ЗС и ЗТВ, ЗТВ и основного металла. При этом создается эффект растяжения ЗС и сжатия ЗТВ. На концах ЗС и ЗТВ прикладывается растягивающая сила, равная σ_T металла. Схема приложения давлений на примере стыкового шва показана на рис. 2.

3. Применение компьютерной технологии на классических примерах сварных конструкций

Для проверки работоспособности метода был взят пример из современного учебника А. С. Куркина [13, с. 158–159], где с помощью аналитического метода был рассчитан прогиб балки от сварки швов. Сечение балки – тавр (рис. 3), сваренный из пластин двухсторонним угловым швом. К полке тавра таким же швом приварено поперечное ребро. Материал сварной конструкции – сталь обычного качества: $\sigma_T = 240$ МПа, $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $C' = 5 \text{ Дж}/(\text{см}^3 \cdot \text{К})$.

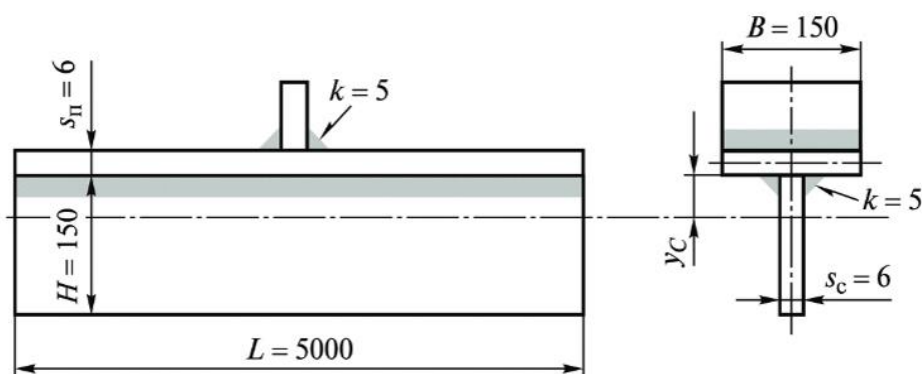


Рис. 3. Схема сварной балки

Fig. 3. Welded beam diagram

В аналитическом расчете максимальный прогиб от продольной усадки $f_{\text{прод}} = 18,4$ мм, максимальный поперечный прогиб (в середине длины балки) $f_{\text{поп}} = 0,54$ мм. Суммарный прогиб $f = f_{\text{прод}} + f_{\text{поп}} = 18,4 + 0,54 \approx 19$ мм.

В расчете аналитического примера выбиралась сварка в CO_2 . Следовательно, экспериментальный коэффициент удельного погонного тепловложения, определяющий количество энергии, которая затрачивается на проплавление единицы объема металла, $Q_v = 38$ Дж/мм³. Коэффициент Q_v важен для определения эффективной энергии сварки $q_{\text{э}}$ по площади сечения металла шва $A_{\text{напл}}$:

$$q_{\text{э}} \approx A_{\text{напл}} Q_v. \quad (1)$$

В силовом методе компьютерной технологии $A_{\text{напл}}$ ЗС определялась через поперечное сечение примитива – цилиндра с радиусом, равным катету шва $r = 5$ мм. Соответственно, $A_{\text{напл}} \approx 78,54$ мм² и $q_{\text{э}} \approx 2984,5$ Дж/мм.

Для определения ширины ЗТВ использовалась измененная формула профессора Н. Н. Рыкалина (скорость сварки $v_{\text{св}}$ принималась мгновенной) [6, 14]:

$$b_1 = q_{\text{э}} / (\delta \cdot c \cdot \gamma \cdot t_{\text{пласт}}), \quad (2)$$

где $q_{\text{э}}$ – эффективная мощность сварочной дуги (кал) без учета времени t ; δ – толщина пластины, см; c – теплоемкость металла, кал/г · град, для стали $c = 0,11$ кал/г · град; γ – удельный вес, г/см³; $t_{\text{пласт}}$ – температура изотермы зоны пластичности (ЗТВ), для стали $t_{\text{пласт}} = 650$ °C.

Согласно расчету $b_1 = 10$ мм. Соответственно, радиус объемного примитива ЗТВ-цилиндра, откладываемого от траектории движения сварочного источника, равен сумме радиуса ЗС $r = 5$ мм и ширины ЗТВ $b_1 = 21$ мм, т. е. радиус ЗТВ 26 мм.

После расчета балки по новой методике силового метода в программном комплексе *Salome* (версия 9.7.0) в решателе *Code_Aster* прогиб балки получился равным 21 мм, что находится в пределах 15 % отличия от аналитического расчета (рис. 4).

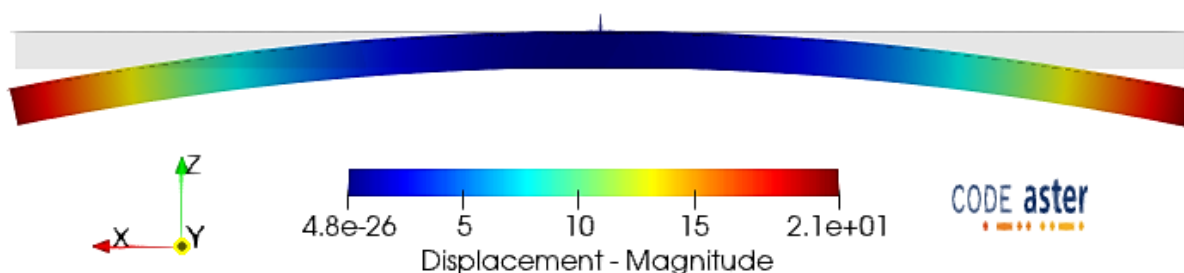


Рис. 4. Расчет прогиба балки в решателе *Code_Aster* (*Salome* (версия 9.7.0))

Fig. 4. Calculation of beam deflection in the *Code_Aster* solver (*Salome* (version 9.7.0))

В учебнике А. С. Куркина [13] также подробно рассмотрены напряжения и деформации в цилиндрических оболочках, в частности стальных трубах. В аналитическом примере на с. 174 заданы две одинаковые стальные трубы, сваренные встык, диамет-

ром 600 мм и толщиной стенки 3 мм. Среди входных данных задана только распределенная нагрузка в результате продольной усадки $q_{yc} = 60$ Н/мм. Требовалось определить максимальный прогиб стенки трубы. В результате аналитического решения максимальный прогиб стенки трубы составил $w = 0,24$ мм.

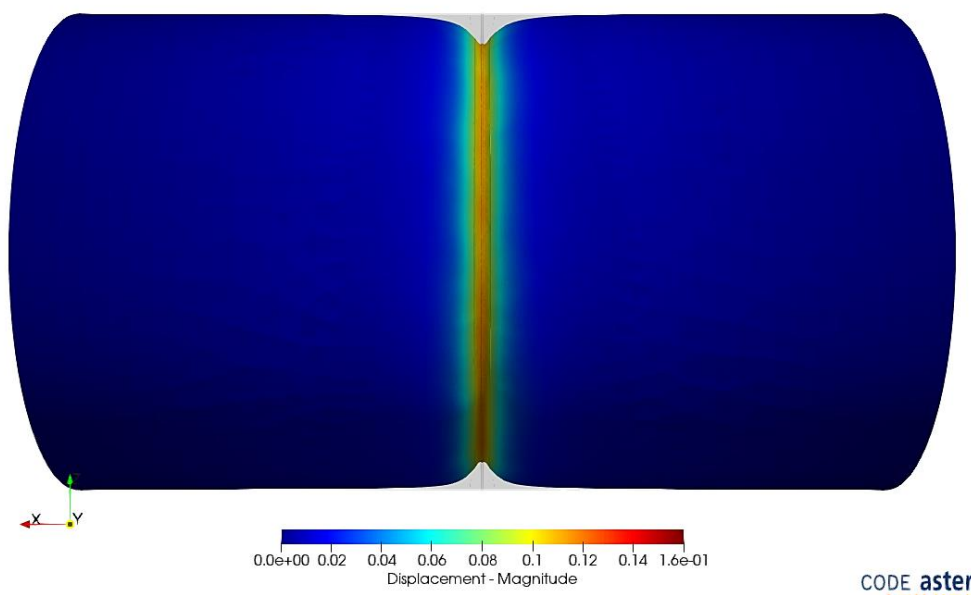


Рис. 5. Результат статического расчета деформации стальной трубы обычного качества, мм
Fig. 5. Result of the static calculation of deformation an ordinary quality steel pipe, mm

Из-за ограниченного количества входных данных для компьютерной технологии расчета НДС были приняты наиболее вероятные входные параметры – сталь обычного качества Ст3 со следующими характеристиками: $\sigma_T = 240$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, $E = 200$ ГПа. Результатом статического расчета являются прогиб и сжатие сечения трубы в районе шва 0,16 мм (рис. 5). Это значение на 33 % отличается от аналитического расчета, что обусловлено ограниченностью информации о входных данных проведения компьютерного моделирования. Главное, что не был указан вид применяемой сварки. Для этой задачи делалось предположение, что использовалась ручная дуговая сварка, для которой коэффициент удельного погонного тепловложения $Q_v = 65$ Дж/мм³. На основе данного коэффициента ширина ЗТВ составила $b_1 = 26$ мм.

4. Структура программного комплекса, последовательность работ

Для автоматизации построения ЗТВ и ЗС сварных конструкций в программном комплексе *Salome* использовался модуль визуального программирования и автоматизации *YACS*, который позволяет связывать этапы инженерного анализа (построение геометрии, сетки, расчеты в *Code_Aster*) в единые блок-схемы. На рис. 6 изображен алгоритм автоматизации моделирования сварных конструкций с помощью модуля *YACS* от момента импорта геометрической модели до расчета в решателе *Code_Aster*. Необходимым условием выполнения алгоритма является создание готовых подгружаемых схем в формате *XML*, содержащих скрипты создания геометрических тел ЗТВ и ЗС на основе

входных данных толщины стенок сварных конструкций и катетов шва (геометрия ЗС), а также взаимного расположения свариваемых стенок (торцевые, стыковые, нахлесточные швы и т. д.). Пользователь в модуле YACS вводит только начало и конец сварного шва, а подгружаемая схема генерирует внедряемые тела ЗС и ЗТВ.

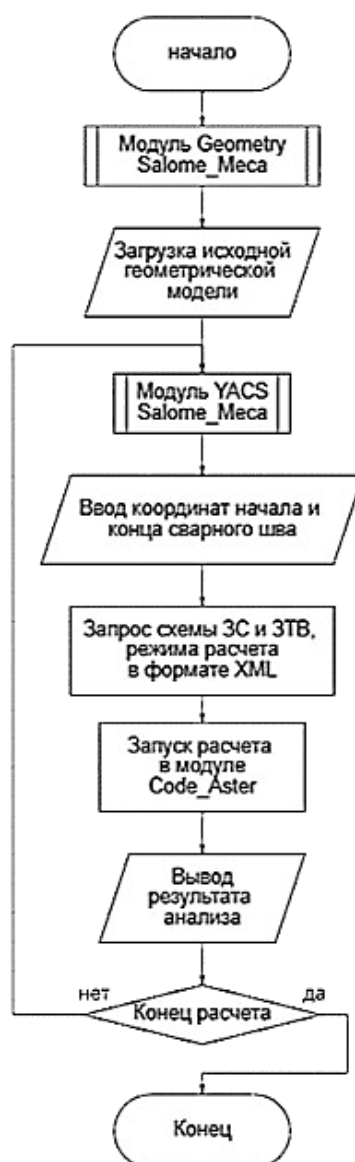


Рис. 6. Алгоритм автоматизации расчета НДС сварных конструкций в программной среде Salome

Fig. 6. Algorithm for automating the calculation of the SSS of welded structures in the Salome software environment

На рис. 7 показано внедрение ЗТВ и ЗС в промышленную деталь консоли. Главная задача на этом этапе состоит в получении слитой воедино геометрии нескольких тел и на ее основании – однородной расчетной сетки.

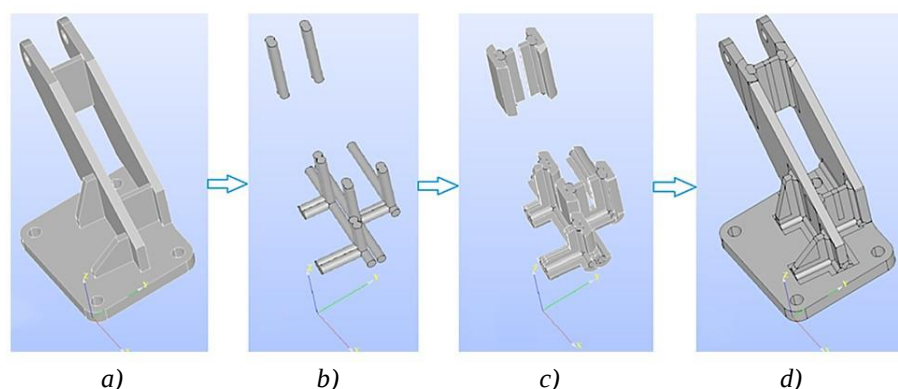


Рис. 7. Построение модели сварной конструкции консоли:

a) изначальная модель консоли; b) геометрические примитивы сварных швов (ЗС);
c) соединение геометрических примитивов ЗС и ЗТВ; d) готовая сборка консоли

Fig. 7. Construction of the model of welded cantilever structure:

a) initial model of the cantilever; b) geometric primitives of the welded seams (FZ);
c) connection of geometric primitives of the FZ and HAZ; d) finished assembly of the cantilever

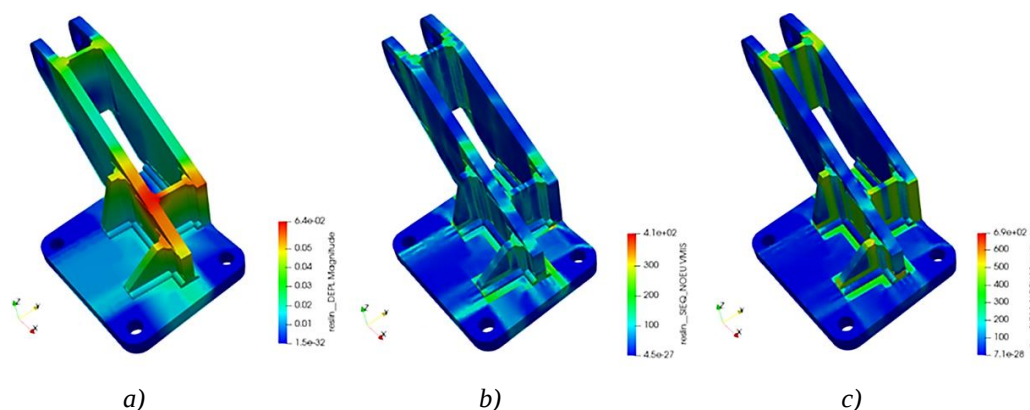


Рис. 8. Результаты статического расчета сварной конструкции консоли:

a) деформации, мм; b) напряжения по Мизесу, МПа; c) усредненные напряжения в узлах модели, МПа

Fig. 8. Results of the static calculation of welded cantilever structure:

a) deformations, mm; b) von Mises stresses, MPa; c) average nodal stresses, MPa

После внедрения геометрических тел модель должна вести себя как единое тело и воспроизводить после проведения расчета реальные остаточные явления после сварки. На рис. 8 продемонстрирован результат расчета напряжений промышленной детали консоли.

5. Перспективы перехода на параллельные архитектуры

Переход платформы Salome на параллельные архитектуры необходим для обработки сверхбольших моделей в современных инженерных расчетах. Основные перспективы и текущие возможности сосредоточены в следующих модулях: Mesh (генерация сеток) и ParaVis (визуализация).

Модуль Mesh может параллельно генерировать отдельные 3D-тела, раздельно используя NETGEN – многоплатформенный автоматический генератор сеток для систем конечно-элементного анализа (FEA).

Модуль ParaVis способен визуализировать большие данные (HPC-результаты) с помощью распределенной обработки, а именно используя возможности по клиент-серверной визуализации, что позволяет рендерить модели с миллионами элементов на удаленных кластерах. Модуль ParaVis адаптирован для работы в средах с распределенной памятью с помощью возможности графических процессоров (GPU) для ускорения отрисовки.

Кроме того, архитектура Salome основана на технологии CORBA, которая изначально проектировалась для взаимодействия компонентов в распределенных системах. Salome выступает в роли супервизора, координирующего работу внешних параллельных кодов (таких как *Code_Aster*) через интерфейсы MPI и MUMPS.

В статье [15], опубликованной в 2022 г., С. В. Медведев показал связь между вычислительными возможностями персонального компьютера и суперкомпьютерной грид-средой, а также перспективы развития суперкомпьютерной технологии прогнозирования остаточных явлений при дуговой сварке, увязанной с процессами автоматизированного проектирования сборочно-сварочной оснастки.

Заключение

Представленный силовой метод нахождения НДС сварных конструкций позволяет многократно сократить время проектирования сложных сварных узлов. При многократном увеличении сложности и протяженности сварных швов существует возможность использования суперкомпьютерных вычислений.

Главные направления развития и преимущества метода:

1. Снижение трудоемкости: переход от детального термомеханического моделирования каждого сварочного прохода к расчету приложения эквивалентных сил. Обеспечивает возможность выполнения статических расчетов сварных конструкций за минуты, а не за часы или дни.

2. Интеграция в САПР: упрощенные алгоритмы встраиваются в стандартные программные комплексы, позволяя инженерам-конструкторам оперативно оценивать технологичность узла на этапе чертежа.

3. Оптимизация сборочных процессов: быстрый расчет дает возможность инженерам легко подбирать оптимальную последовательность сварки или определять необходимый предварительный изгиб (припуск) для компенсации последующих сварочных деформаций.

4. Масштабируемость: упрощенные математические модели позволяют эффективно прогнозировать остаточные явления в крупногабаритных конструкциях (судостроение, мостостроение), где точное моделирование физических процессов затруднительно из-за колоссального объема вычислений.

В дальнейшем с помощью описанной выше технологии будут ставиться эксперименты на основе более сложных конфигураций промышленных сварных конструкций.

Список использованных источников

1. A new theory for lucid estimation of welding residual stress in plate joint / Y. Ueda, K. Fukuda, K. Nakacho, S. Endo // Transactions of JWRI (Joining and Welding Research Institute). – 1975. – Vol. 4, no. 2. – P. 73–81.

2. Ueda, Y. Theory of thermal elastic-plastic analysis with special reference to predictive methods of welding residual stress and deformation / Y. Ueda, K. Nakacho // *Transactions of JWRI (Joining and Welding Research Institute)*. – 1982. – Vol. 11, no. 2. – P. 95–103.
3. Окерблом, Н. О. Сварочные деформации и напряжения. Теория и ее применение / Н. О. Окерблом. – М.; Л. : Машгиз, 1948. – 252 с.
4. Okerblom, N. O. The Calculations of Deformations of Welded Metal Structures / N. O. Okerblom. – London : H.M.S.O., 1958. – 234 p.
5. Николаев, Г. А. Расчет сварных соединений / Г. А. Николаев. – М. : Объединенное научно-техническое изд-во, 1933. – 132 с.
6. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951. – 296 с.
7. Окерблом, Н. О. Расчет деформаций металлоконструкций при сварке / Н. О. Окерблом. – М.; Л. : Машгиз, 1955. – 212 с.
8. Гатовский, К. М. Теория сварочных деформаций и напряжений : учеб. пособие / К. М. Гатовский, В. А. Кархин. – Л. : ЛКИ, 1980. – 331 с.
9. Медведев, С. В. Компьютерное моделирование остаточных сварочных деформаций при технологическом проектировании сварных конструкций / С. В. Медведев // *Сварочное производство*. – 2001. – № 8. – С. 10–18.
10. Medvedev, S. V. Computer modeling and residual welding strains in technological design of welded structures / S. V. Medvedev // *Welding International*. – 2002. – Vol. 16. – P. 59–65.
11. Жуковец, М. В. Автоматизация расчета напряженно-деформированного состояния сварных конструкций общего назначения в программной среде Salome-Meca / М. В. Жуковец // *Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика*. – 2025. – Т. 3, № 1. – С. 21–28.
12. Медведев, С. В. Компьютерные технологии прогнозирования остаточных сварочных явлений при дуговой сварке конструкций общего назначения / С. В. Медведев, М. В. Жуковец // *Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности : сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации ; Бел.-Рос. ун-т ; Бел. нац. техн. ун-т ; С.-Петерб. политехн. ун-т Петра Великого ; Объед. ин-т проблем информатики НАН Беларуси ; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2022. – С. 159–163.*
13. Куркин, А. С. Сварные конструкции. Расчет и проектирование : учеб. для ВУЗов / А. С. Куркин, В. Ф. Лукьянов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. – 264 с.
14. Трочун, И. П. Внутренние усилия и деформации при сварке / И. П. Трочун. – М. : Машгиз, 1964. – 247 с.
15. Медведев, С. В. Конструктивно-технологическое проектирование и моделирование сварных конструкций в распределенных суперкомпьютерных средах / С. В. Медведев // *Сварочное производство*. – 2022. – № 5. – С. 24–29.

References

1. Ueda Y., Fukuda K., Nakacho K., Endo S. A new theory for lucid estimation of welding residual stress in plate joint. *Transactions of JWRI (Joining and Welding Research Institute)*, 1975, vol. 4, no. 2, pp. 73–81.
2. Ueda Y., Nakacho K. Theory of thermal elastic-plastic analysis with special reference to predictive methods of welding residual stress and deformation. *Transactions of JWRI (Joining and Welding Research Institute)*, 1982, vol. 11, no. 2, pp. 95–103.

3. Okerblom N. O. Svarochnye deformatsii i napryazheniya. Teoriya i ee primeneniye. *Welding Deformations and Stresses. Theory and Its Application*. Moscow, Leningrad, Mashgiz, 1948, 252 p. (In Russ.).
4. Okerblom N. O. *The Calculations of Deformations of Welded Metal Structures*. London, H.M.S.O., 1958, 234 p.
5. Nikolaev G. A. Raschet svarnykh soedineniy. *Calculation of Welded Joints*. Moscow, Ob"edinennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo, 1933, 132 p. (In Russ.).
6. Rykalin N. N. Raschety teplovykh protsessov pri svarke. *Calculations of Thermal Processes in Welding*. Moscow, Mashgiz, 1951, 296 p. (In Russ.).
7. Okerblom N. O. Raschet deformatsiy metallokonstruktsiy pri svarke. *Calculation of Deformations of Metal Structures in Welding*. Moscow, Leningrad, Mashgiz, 1955, 212 p. (In Russ.).
8. Gatovskiy K. M., Karkhin V. A. Teoriya svarochnykh deformatsiy i napryazheniy. *Theory of Welding Deformations and Stresses*. Leningrad, Leningradskij korablestroitel'nyj institut, 1980, 331 p. (In Russ.).
9. Medvedev S. V. *Computer simulation of residual welding deformations in technological design of welded structures*. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production], 2001, no. 8, pp. 10–18 (In Russ.).
10. Medvedev S. V. Computer modeling and residual welding strains in technological design of welded structures. *Welding International*, 2002, vol. 16, pp. 59–65.
11. Zhukovets M. V. *Automation in calculating stress-strain state of general-purpose welded structures in salome-meca software environment*. Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Promyshlennaya kibernetika [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics], 2025, vol. 3, no. 1, pp. 21–28 (In Russ.).
12. Medvedev S. V., Zhukovets M. V. *Computer technologies for predicting residual welding phenomena in arc welding of general-purpose structures*. Aktualnye voprosy i peredovye tekhnologii svarki v nauke i promyshlennosti: sbornik statej I Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii [Topical Issues and Advanced Welding Technologies in Science and Industry: Collection of Articles of the I International Scientific and Technical Conference]. Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Rossijskoj Federacii, Belorussko-Rossijskij universitet, Belorusskij nacional'nyj tehnikeskij universitet, Sankt-Peterburgskij politehnicheskij universitet Petra Velikogo, Ob"edinennyy institut problem informatiki Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Lustenkov M. E. (ed.-in-ch.), Bodjako A. M., Denisov L. S., Kobernik N. V., Korobov Ju. S., Koroteev A. O., ..., Sasnovskij S. P. (eds.). Mogilev, Belorussko-Rossijskij universitet, 2022, pp. 159–163 (In Russ.).
13. Kurkin A. S., Lukyanov V. F. Svarnye konstruktsii. Raschet i proektirovanie. *Welded Structures. Calculation and Design*. Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. N. Ye. Bauman, 2021, 264 p. (In Russ.).
14. Trochun I. P. Vnutrennie usiliya i deformatsii pri svarke. *Internal Forces and Deformations in Welding*. Moscow, Mashgiz, 1964, 247 p. (In Russ.).
15. Medvedev S. V. *Structural-technological design and simulation of welded structures in distributed supercomputer environments*. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production], 2022, no. 5, pp. 24–29 (In Russ.).

Информация об авторе

Михаил Владимирович Жуковец, инженер-программист 1-й категории лаборатории высокопроизводительных систем и технологий моделирования, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.
E-mail: mikhail.zhukavets@mail.ru

Information about the author

Mikhail V. Zhukavets, Mid-level Software Engineer, Laboratory of High-Performance Systems and Modeling Technologies, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
E-mail: mikhail.zhukavets@mail.ru