

## ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА СВАРКИ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Дикшев И. В.*, канд. техн. наук,  
*Ерофеев В. А.*, канд. техн. наук,  
*Масленников А. В.*, канд. техн. наук,  
*Медведков М. С.*, канд. техн. наук  
(Москва, АО «Юмосс», e-mail: div@umoss.ru)

## APPLICATION OF SIMULATION MODELING SYSTEMS FOR ENGINEERING ANALYSIS OF WELDING IN SHIP HULL STRUCTURES

*Dikshev Igor Vladislavovich*, Candidate of Engineering science,  
*Erofeev Vladimir Alexandrovich*, Candidate of Engineering science,  
*Maslennikov Alexander Vasilevich*, Candidate of Engineering science,  
*Medvedkov Maxim Sergeevich*, Candidate of Engineering science  
(Moscow, Russia, JSC «Umoss», e-mail: div@umoss.ru)

**Аннотация:** Рассматривается описание и применение полностью отечественной системы имитационного моделирования сварки и родственных технологий CAE WeRTSim для инженерного анализа сварки судовых корпусных конструкций на примере электродуговой сварки под флюсом и расчёта остаточных сварочных деформаций полотнища палубы. Описаны функциональные модули и алгоритм их применения для термо-деформационного анализа. Расчёты выполняются в локальном и локально-глобальном масштабах. Приведены результаты термодинамического анализа сварного соединения и выполнен деформационный анализ конструкции, а также отмечена возможность оценки деформаций при различных вариантах расположения сварных швов. Показан иллюстративный пример расчёта компенсирующей деформации в процессе термической правки участков секции полотнища.

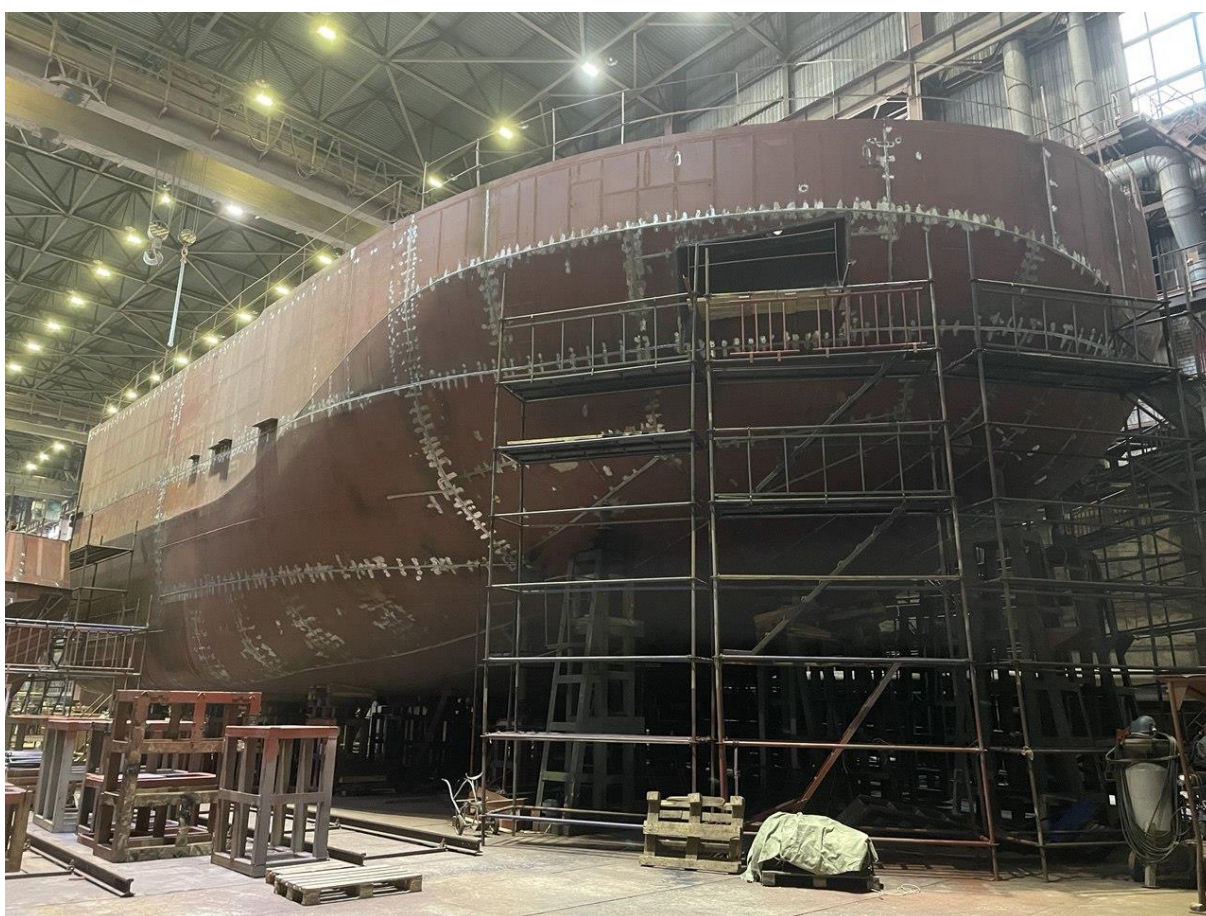
**Ключевые слова:** сварочные деформации, термическая правка, термодинамический анализ, технологическая подготовка производства, последовательность выполнения швов, сварка под флюсом (SAW), параметры режима сварки, производительность

**Abstract:** The article discusses the description and application of a Russian simulation system for welding and related technologies CAE WeRTSim for engineering analysis of ship hull welding using the example of submerged arc welding and calculation of residual welding deformations of a deck plate. The functional modules and the algorithm for their application in thermal deformation analysis are described. Calculations are performed on a local and local-global scale. The results of thermodynamic analysis of the welded joint and deformation analysis of the structure are presented, and the possibility of assessing deformations for various weld locations is noted. An illustrative example of calculating compensating deformation during thermal straightening of deck section areas is shown.

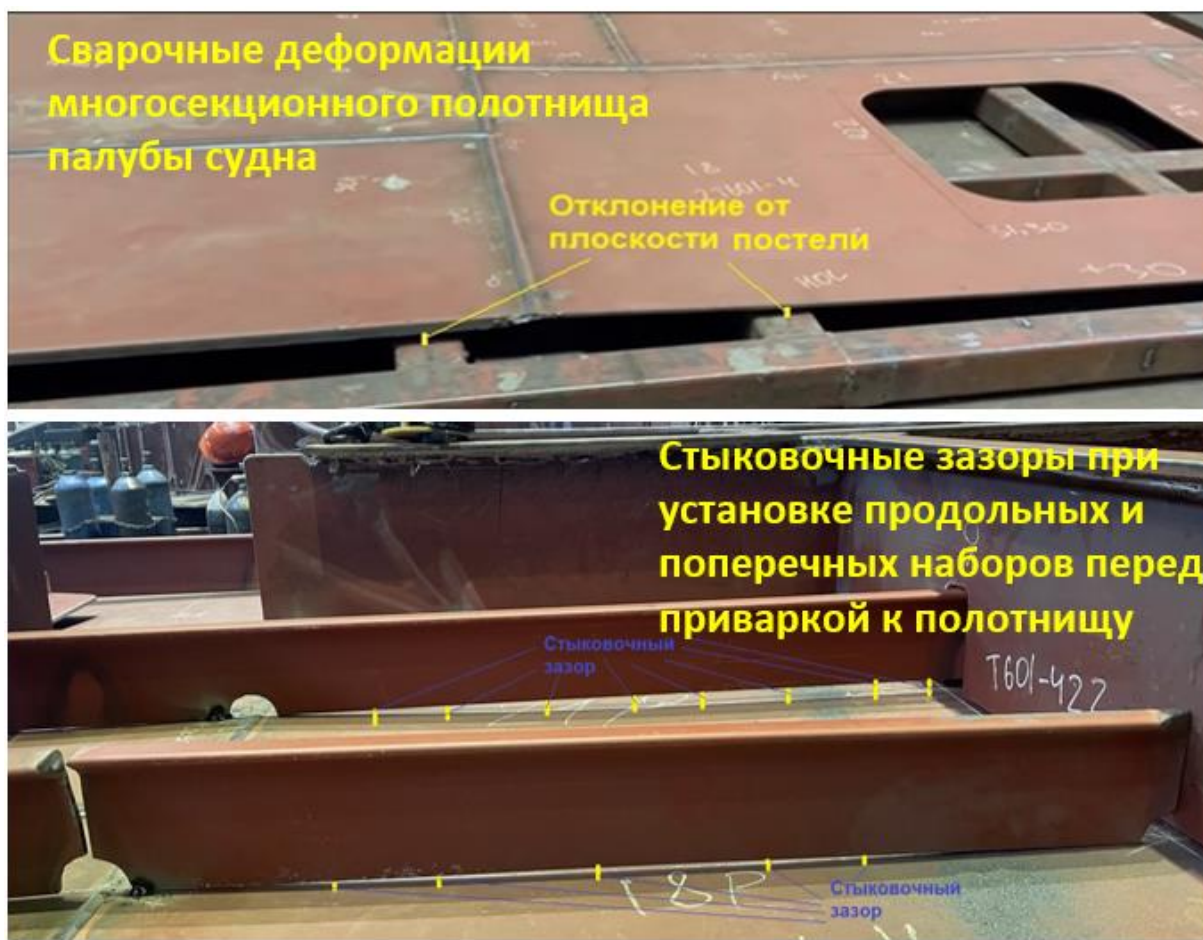
**Keywords:** *welding deformations, thermal straightening, thermodynamic analysis, technological preparation of production, sequence of welds, submerged arc welding (SAW), welding parameters, efficiency*

## **Введение**

Судовые корпусные конструкции (подборки) характеризуются наличием значительного количества сварных швов (получаемых преимущественно с помощью методов GMAW и SAW), по-разному расположенных относительно друг друга и выполняемых в различной последовательности [1] (рис. 1). В результате появляются остаточные сварочные деформации в плоскости листа (коробление, бухтины, волны), что затрудняет сборку и сварку на последующих технологических переходах (рис. 2).



**Рис. 1.** Пример сварной судовой корпусной конструкции



**Рис. 2.** Сварочные деформации (сверху) и сборочные зазоры при установке продольных и поперечных наборов перед приваркой к полотнищу (снизу)

Экспериментальному и теоретическому исследованию листовых и балочных конструкций и элементов судов посвящён ряд работ. В работе [2] описаны формы деформаций (изгиб, кручение) в зависимости от прочности материала и условий сварки. Отмечено, что величины предела текучести материала и коэффициента температурного расширения играют важную роль при деформационном поведении. Авторы [3] детально описывают наблюдаемые внеплоскостные прогибы при сварке морских платформ для нефтедобычи и влияние такой деформации на монтаж под сварку на следующих технологических переходах. Работа [4] сочетает полевые измерения геометрии на стапеле с численным анализом деформаций реальных панелей и описывает, какие типы деформаций (угловые, продольные, поперечные) чаще всего возникают при серийной сварке в цехе, а также даёт практические рекомендации по контролю монтажа и подгонке. Следствием сварочных деформаций является увеличение трудозатрат на устранение подгоночных зазоров между технологическими переходами, что сильно снижает производительность процесса и значительно увеличивает расход материалов, повышая стоимость конечной продукции.

Анализ деформаций и связанная с этим потребность в оптимизации технологии сварки реализуется в настоящее время, с одной стороны, на основе эмпирического опыта и опыта сборщиков и сварщиков, а с другой, – с использованием программ имитационного моделирования на основе метода конечных элементов (FEM) [5]. Учёт

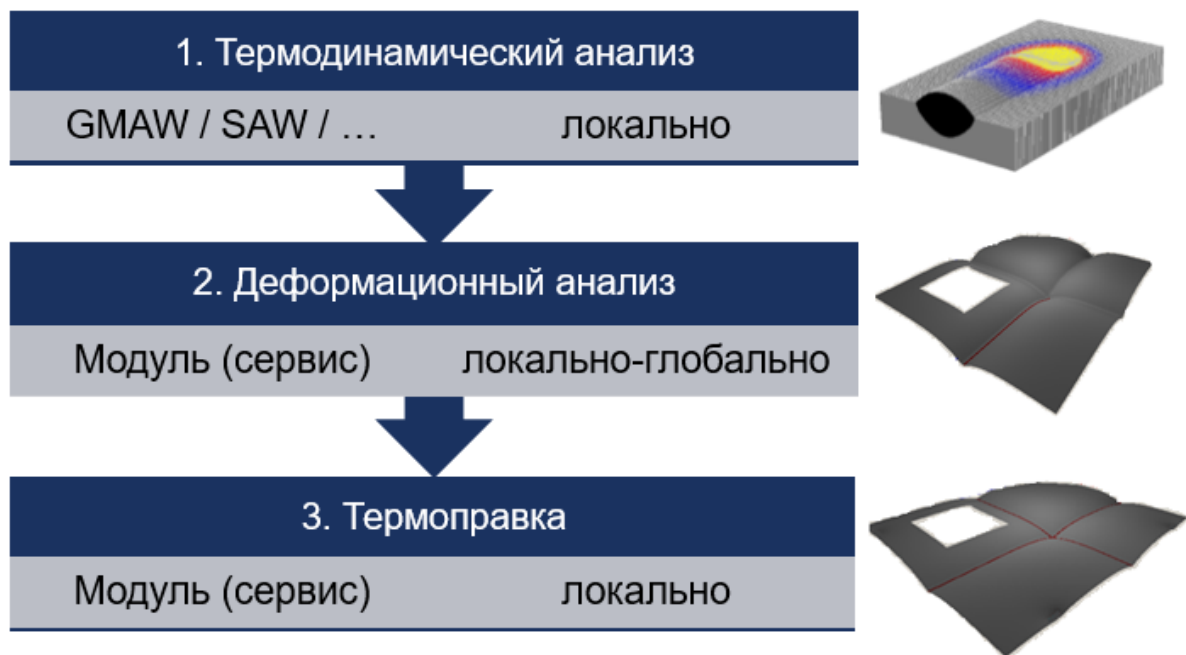
значительного количества физических явлений (включая второстепенные, с точки зрения анализа технологии), а также большого числа конечных элементов (из которых состоит расчётный объект), ведёт на практике к чрезмерно длительному времени термодинамического анализа (иногда сутками и неделями) и предъявляет серьёзные требования к используемой IT-инфраструктуре [6].

Таким образом, несмотря на значительный прогресс, всё ещё остаются вызовы, связанные с масштабируемостью моделей на крупногабаритные конструкции и длительностью оценки деформаций.

Продукт CAE WeRTSim построен на основе масштабируемой архитектуры с инвариантными модулями, что упрощает техническую поддержку, позволяет гибко настраивать функциональное наполнение под потребности конкретных пользователей, а также неограниченно расширять функционал за счет интеграции в Систему новых различных процессов и алгоритмов численного анализа [7, 8]. В частности, оптимизированные алгоритмы и модели для термодинамического и деформационного анализа позволяют относительно быстро рассчитать возможные варианты сварки конструкции и выбрать наиболее оптимальный. Ниже представлено их описание и даны примеры деформационного анализа части секции судовой корпусной конструкции.

### 1. Методика термо-деформационного анализа

Методика, реализованная в CAE WeRTSim, заключается в последовательном применении трёх основных функциональных модулей: термодинамического анализа, деформационного анализа и термоправки (рис. 3). Относительная быстрота расчётов объясняется масштабами, в пределах которых происходит тот или иной расчёт.



**Рис. 3.** Алгоритм оценки сварочных деформаций и необходимого компенсирующего воздействия при термоправке

Так, термодинамический расчёт реализуется в локальной зоне текущего сварного шва, позволяя тем самым довольно быстро получить размеры геометрии шва и зоны термического влияния (ЗТВ) и разупрочнения, необходимых для последующего деформационного расчёта.

Деформационный расчёт, напротив, - локально-глобальный. Это необходимо для учета зоны разупрочнения конкретного шва и его влияния на остальные швы сварной подборки.

Модуль термической правки предназначен для расчёта компенсирующей локальной деформации в зоне остаточных сварочных деформаций.

## **2. Термодинамический анализ**

Базовая методика термодинамического расчёта была подробно описана в работе [6]. Для выполнения расчетов применяются простые и надежные методы контрольных объемов и конечных разностей, что, в отличие от метода конечных элементов, позволяет не только упростить ввод данных и тем самым снизить квалификационные требования к пользователям, но и значительно сократить время расчета.

Областью численного анализа является локальная зона, ограниченная размерами ЗТВ и прилегающего металла, где происходят критические изменения материала, влияющие на характеристики качества процесса. При этом область моделирования дискретизируется множеством точек, принадлежность которых к газообразной, жидкой или твердой среде определяется решением системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Это позволяет описывать нестационарные физические явления при формировании объема расплавленного металла.

Дифференциальные уравнения полностью абстрагированы от условий протекания реального процесса, учитываемых уравнениями однозначности, то есть краевыми условиями. Совместное решение дифференциальных уравнений с краевыми условиями обеспечивает единственность решения для каждого конкретного случая.

Система уравнений описывает процесс с момента начала воздействия источника энергии (например, при сварке плавящимся электродом в среде защитных газов или под флюсом) до момента достижения установившегося состояния или окончания процесса. Численное решение системы уравнений осуществляется с малым шагом как по времени, так и пространственным координатам, позволяя учитывать взаимодействие физических явлений с высокой точностью.

## **3. Деформационный анализ**

При сварке судовых корпусных (листовых) конструкций наибольшее влияние на процесс оказывает изгиб листа и перемещение его точек в направлении, перпендикулярном его поверхности (волны, бухтины, коробления) [1]. Края листа обычно соединены сварными швами с соседними элементами, препятствующими перемещению листа в указанном направлении. Перемещения металла в плоскости свариваемых листов вызывают деформацию соседних элементов в точках их

соединения. В листовых конструкциях плоскости соседних элементов обычно находятся под углом друг к другу, часто под прямым. Поэтому их сопротивление деформации, вызываемое перемещениями в плоскости листа, очень незначительно, а к перемещению в направлении, перпендикулярном плоскости свариваемого листа, очень велико.

Указанные особенности деформирования листовых конструкций при сварке позволяют сделать следующие допущения:

- 1) рассматривается состояние сварного узла после сварки, т.е. шов считается «вложенным» в металл свариваемых листов;
- 2) в зоне, в которой металл при сварке нагревался до температуры возникновения остаточных напряжений и деформаций, возникает относительная упругая деформация, равная отношению предела текучести к модулю упругости металла шва;
- 3) рассматривается напряжённое состояние протяжённого шва, имеющее постоянный профиль поперечного сечения (площадь поперечного сечения шва).

Остаточные напряжения возникают вследствие усадки металла шва и ЗТВ на величину пластической деформации. Условием возникновения пластических деформаций является нагревание металла до температуры  $T_d$ , при которой термическое расширение металла вызывает в металле давление, превосходящее предел текучести  $\sigma_T$  при этой температуре  $T_d$

$$\alpha \cdot T_d \cdot E > \sigma_T(T_d), \quad (1)$$

где  $\alpha$  - коэффициент линейного расширения,  $E$  – модуль упругости.

Пластическая деформация  $\varepsilon_D$  распределена в металле неравномерно, и её значение зависит от максимальной температуры, до которой нагревался металл в рассматриваемой точке поперечного сечения.

$$\varepsilon_D = \alpha T_d - \frac{\sigma_T(T_d)}{E}. \quad (2)$$

Последующее охлаждение до исходной температуры вызывает появление напряжения растяжения  $\varepsilon_D E$ , значение которого превышает предел текучести при исходной температуре. Это вызывает пластическое течение металла, которое ограничивает напряжение растяжения значением указанного предела текучести. Так как не все точки поперечного сечения соединения нагреваются до высокой температуры, распределение усадочной нагрузки (напряжения) по поперечному сечению можно определить по соотношению

$$\sigma = \min[\sigma_0, \alpha T_D E] - \sigma_T(T_d). \quad (3)$$

После охлаждения металл шва пребывает в упругом состоянии, которое описывается как распределение усадочной нагрузки  $\sigma(y, z)$  в поперечном сечении. Усадочная нагрузка вызывает малые перемещения точек металла шва  $U$ ,  $V$ ,  $W$  в направлении координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , которые описываются функциями распределения  $U(y, z)$ ,  $V(x, z)$ ,  $W(x, y)$ . Перемещение точек металла определяется решением уравнений их совместности (уравнений Ламе), которые в декартовой системе координат имеют вид

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + (\lambda + \mu) \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} \right) + \mu \left( \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) = 0; \quad (4)$$

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + (\lambda + \mu) \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} \right) + \mu \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) = 0; \quad (5)$$

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + (\lambda + \mu) \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z} \right) + \mu \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (6)$$

где  $\lambda, \mu$  – коэффициенты Ламе, связывающие между собой модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Для решения этих уравнений задаются граничные условия, зависящие от конструкции соединения и конкретных условий закрепления. Рассчитываемые таким образом перемещения  $(y, z)$ ,  $V(x, z)$ ,  $W(x, y)$  являются искомыми остаточными деформациями.

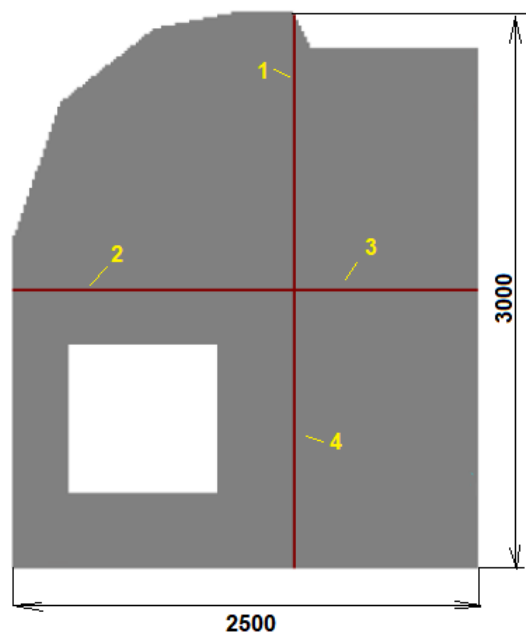
#### 4. Модуль термической правки

Модуль «Термоправка» предназначен для расчёта компенсирующей локальной деформации в зоне остаточных сварочных деформаций. Исходными данными для расчёта являются параметры термического воздействия, термомодеформационные свойства материала и геометрические характеристики элемента, учитывающие место нагревания, параметры нагрева, зоны взаимодействия с сопряжёнными элементами и собственно зоны с начальной остаточной сварочной деформацией.

В его основе лежит та же модель, что и в модуле «Деформации». Отличительной особенностью является возможность задания координат источника (-ов) нагрева при термоправке, их мощности и параметров распределения. Задача расчёта деформаций решается как в процессе нагрева, так и при последующем охлаждении. Результатом работы модуля являются распределённые значения  $U(y, z)$ ,  $W(y, z)$ , которые меньше соответствующих значений остаточных сварочных деформаций (см. раздел 3).

#### 5. Пример применения модулей для решения прямой задачи

Рассмотрим в качестве примера расчёт остаточных сварочных деформаций и их компенсацию при сварке под флюсом подборки (участка) полотнища судовой палубы (рис. 4). Коричневыми линиями показаны сварные швы, а цифрами – возможный порядок их выполнения. Свариваемый материал – сталь PCD40, стыковые соединения С21 (ГОСТ 8713-79), толщина листов 14+14 мм. Режимы сварки приведены в табл. 1.



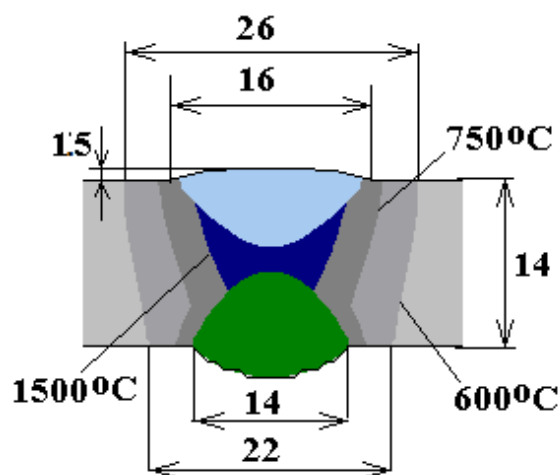
**Рис. 4.** Секция судовой палубы (схематично)

Таблица 1

Ориентировочные режимы сварки под флюсом секции палубы

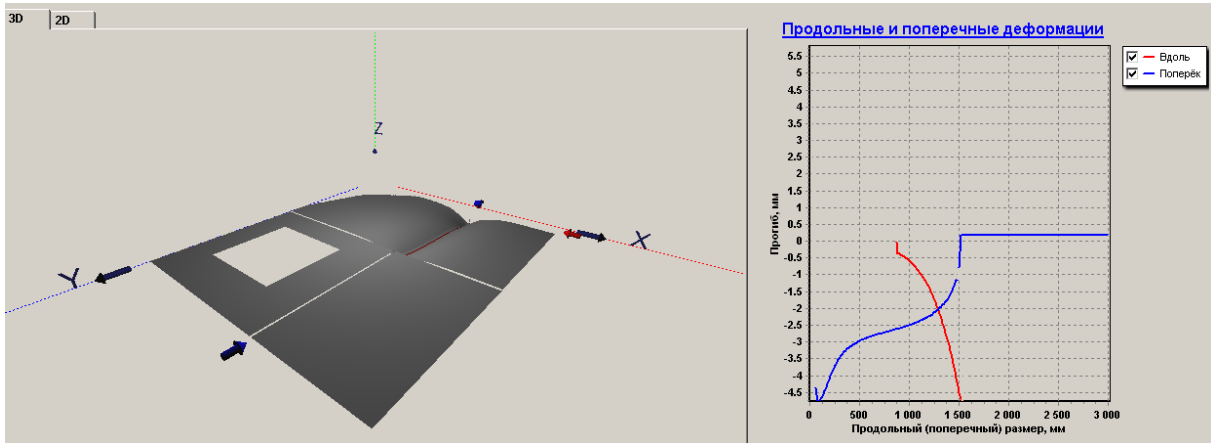
Комментарий	Ток, А	Напряжение, В	Скорость сварки, см/мин
Сварка корня шва	550	33-34	34
Сварка прохода с обратной стороны	640	33-34	34
Сварка заполняющего прохода с лицевой стороны	550	33-34	34

Модуль сварочного процесса SAW позволяет рассчитать размеры трёхпроходного шва при указанных параметрах режима, рис. 5.

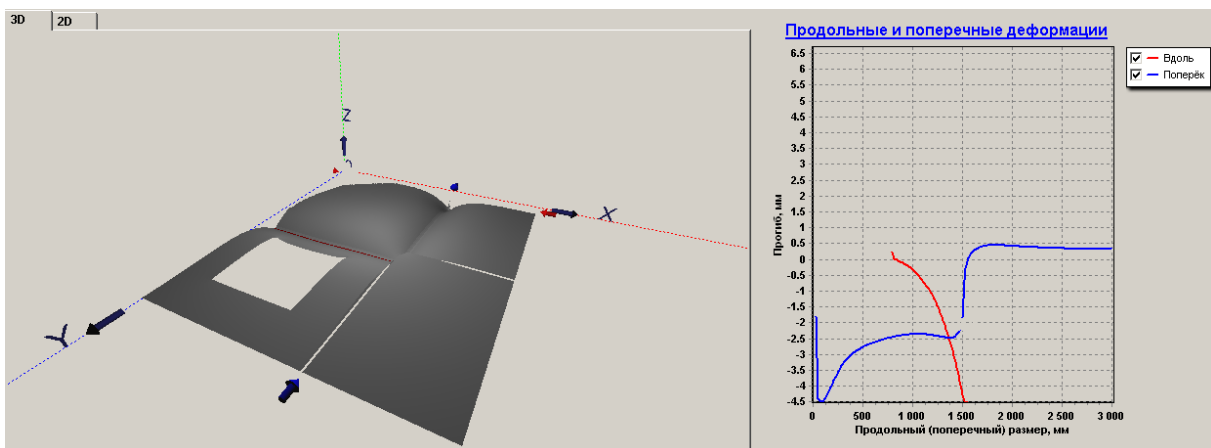


**Рис. 5.** Размеры шва, ЗТВ и разупрочнения свариваемого материала

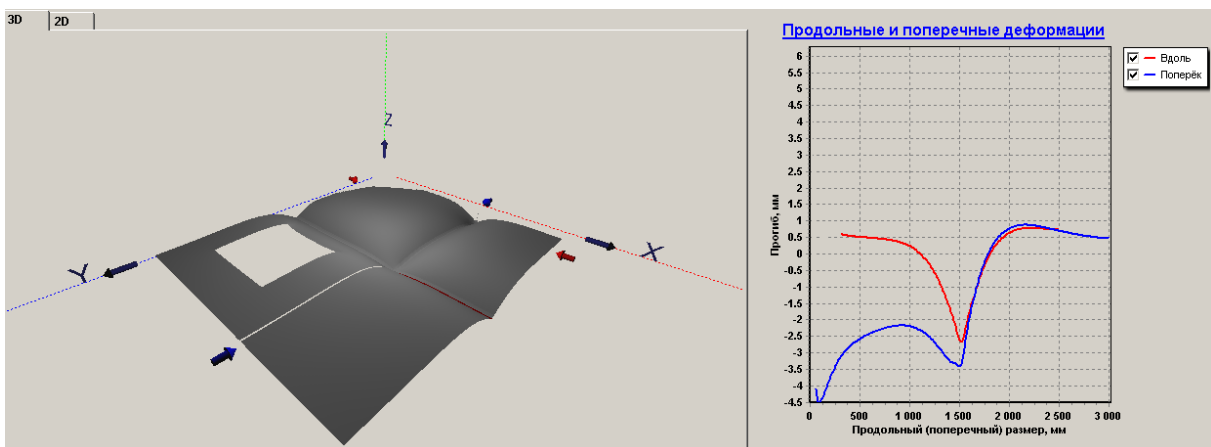
Эти размеры, зоны расчёта, геометрические (габаритные) размеры сварной конструкции, последовательность выполнения сварных швов и условия закрепления при сварке передаются далее в модуль деформационного анализа. На рис. 6-9 представлены результаты расчётов для последовательности швов 1-4 (см. рис. 4).



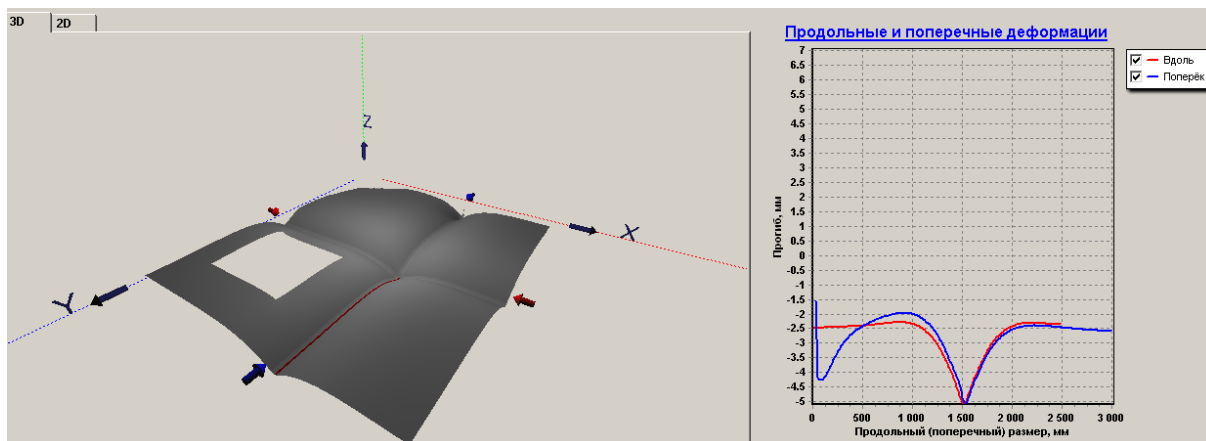
**Рис. 6.** Остаточная деформация после сварки первого прохода



**Рис. 7.** Остаточная деформация после сварки второго прохода



**Рис. 8.** Остаточная деформация после сварки третьего прохода



**Рис. 9.** Остаточная деформация после сварки четвёртого прохода

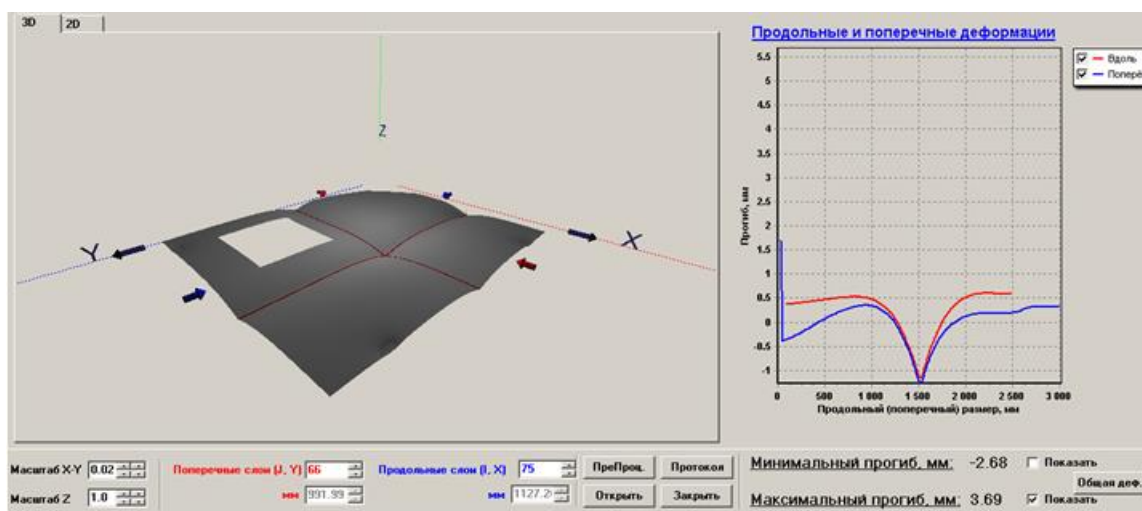
Таким образом, можно произвести оценку деформаций при любом интересующем порядке выполнения сварных швов и выбрать наиболее оптимальный в плане получения минимальных значений сварочных деформаций.

Максимальная остаточная деформация после сварки всех четырёх швов составила 5 мм. Это значение соизмеримо с монтажными зазорами, возникающими при монтаже продольных и поперечных наборов, привариваемых к этому участку поверхности полотнища на последующем технологическом переходе (см. рис. 2 внизу)

Возможным вариантом снижения этой деформации является термическая правка в виде локального нагрева участка (-ов) конструкции.

Полученные значения сварочной деформации после сварки всех четырёх швов (см. рис. 9) передаются в модуль термоправки. Там же выбираются траектории (местоположение) газовых горелок, их мощность и параметры распределения тепловых потоков, а также длительность нагрева.

На рис. 10 представлен результат расчёта деформации после термической правки (охлаждения) участков полотнища вдоль сварных швов. Температура нагрева была определена в пределах 600-800 °С.



**Рис. 10.** Остаточная деформация после термоправки

Видно, что после термической правки рассчитанная компенсированная максимальная деформация уменьшилась до 1.3 мм.

### **Заключение**

Последовательное применение функциональных модулей для решения прямой задачи (анализа) позволяет произвести оценку геометрии сварного соединения и его характерных зон, рассчитать остаточные сварочные деформации при различных вариантах расположения сварных швов, подобрать параметры режима правки конструкции для рассчитанных деформаций. На этапе технологической подготовки можно провести оценку вариантов предстоящей сварки и выбрать именно тот, который приводит к минимальным остаточным деформациям. Последнее обстоятельство помогает минимизировать объём подгоночных работ на последующих технологических переходах, снизив тем самым трудозатраты и расход материалов, при этом увеличив эффективность и производительность процесса.

### *Литература*

1. Кузьминов С.А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. Л.: Судостроение, 1974. 286 с.
2. Y. Liu, et al., Measurement and analysis of welding deformation in arc-welded thin lap joints with different strengths // Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 61. P. 507-516. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.11.038>
3. H. Zhou, J. Wang, et al., Prediction and mitigation of out-of-plane welding distortion of a typical block in fabrication of a semi-submersible platform // Marine Structures. 2021. Vol. 77. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2021.102964>
4. Yu Cao, Yuze Song, Tao Zhang, Wenhua Chu & Yong Bai. Welding distortion prediction of ship plate frame structures based on a self-learning database // Ships and Offshore Structures. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2129926>
5. C. Wu & J.-W. Kim. Review on Mitigation of Welding-Induced Distortion Based on FEM Analysis // Journal of Welding and Joining. 2020. Vol. 38. N1. P. 56-66.
6. Девятков С. Моделирование сварочных процессов с помощью программного обеспечения фирмы ESI Group // CADmaster. 2011. №2. С. 48-52.
7. Компьютерная система имитационного моделирования WeRTSim для инженерного анализа сварки и родственных технологий / А.В. Масленников, И.В. Дикшев, М.С. Медведков, В.А. Ерофеев. // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2025): Сборник трудов XII всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Санкт-Петербург, 15-17 октября 2025 г. С. 764-774.
8. Применение пакета имитационного моделирования WeRTSim для инженерного анализа технологий сварки / А.В. Масленников, И.В. Дикшев, М.С. Медведков, В.А. Ерофеев. // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2025): Сборник трудов двенадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Санкт-Петербург, 15-17 октября 2025 г. С. 775-785.