

## **ПРОГРАММНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА СВАРКИ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ СТАДИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА**

**И.В. Дикшев, В.А. Ерофеев, А.В. Масленников, М.С. Медведков (Москва)**

### **Введение**

Развитие российского судостроения сталкивается с многими трудностями, среди которых особенно выделяется низкая эффективность производства, являющаяся причиной высокой стоимости и длительных сроков строительства судов [1].

Вместе с четвертой промышленной революцией в область судостроения пришла концепция «Судостроение 4.0», в рамках которой предполагается переход к цифровизации и интеллектуализации судостроительной отрасли, направленный на повышение эффективности, качества и сокращение затрат через интеграцию ключевых технологий «Индустрии 4.0», таких как IoT, ИИ, Большие данные, цифровые двойники и роботизация [2]. При этом «цифровизация» – это основная тенденция развития мирового судостроения, которая подразумевает переход от традиционных методов к новым технологиям, что позволяет автоматизировать процессы, улучшить качество и сократить затраты на проектирование и производство судов [3].

В Российской Федерации особенно активно развивается та часть концепции «Судостроение 4.0», которая называется «цифровой верфью» [4, 5] и представляет собой сквозную технологию судостроения, объединяющую проектировщика, верфь и эксплуатанта в едином цифровом пространстве, обеспечивая непрерывный информационный и производственный процесс создания судна, охватывающий весь его жизненный цикл от проектирования до утилизации [6].

Реализация сквозной технологии судостроения подразумевает цифровизацию всех её стадий и этапов (цифровое проектирование, цифровая технологическая подготовка, цифровое производство, управление жизненным циклом, цифровая сдача-приёмка, цифровой двойник при эксплуатации) за счёт создания единого информационного пространства для проектировщика, завода и эксплуатанта [7] на основе высокопроизводительной информационно-коммуникационной и вычислительной инфраструктуры, системной интеграции производственного и судового оборудования с системным, прикладным и инженерным программным обеспечением различного назначения. Таким образом, создание и внедрение сквозных технологий является довольно дорогим и очень длительным процессом. В то же время, реальное производство невозможно остановить, и оно продолжает выполнять судостроительные программы по постройке и ремонту судов на основе старых технологий, где уровень автоматизации стадии технологической подготовки остаётся низким, рис. 1.



Рис. 1. Уровни цифровизации стадий создания машиностроительной продукции

### Проблемы производства сварных корпусных судовых конструкций

Электрическая дуговая сварка в настоящее время является основным технологическим процессом соединения Судовых Корпусных Конструкций (СКК). Однако этот процесс имеет недостатки, основным из которых является деформация конструкций, т.е. изменение их размеров и формы в процессе сварки. Опыт постройки сварных судов показывает, что деформации узлов и секций, возникающие в процессе сварки, значительно осложняют сборку и сварку корпусов, рис. 2.



Рис. 2. Отклонение полотнища от плоскости постели из-за сварочных деформаций

При стыковании деформированных секций затрачивается много рабочего времени на правку, подгоночные и прирубочные работы. Иногда деформации достигают такой величины, что выправить их становится невозможно, и готовые изделия бракуются. Кроме того, сварочные деформации часто приводят к снижению прочности сварных конструкций.

На производстве при выборе параметров режима и условий сварки часто полагаются на опыт сварщика, что обуславливает высокие квалификационные требования к нему для гарантированного обеспечения заданного высокого качества продукции.

Расчет ожидаемых сварочных деформаций для различных конструктивных и технологических вариантов позволяет автоматически выбрать оптимальный вариант конструкции и технологии ее изготовления с точки зрения получения минимальных деформаций и выработать комплекс мероприятий по борьбе с ними.

### **Компьютерные системы инженерного анализа сварки**

На стадии проектирования конструкций для расчёта ожидаемых сварочных деформаций традиционно применяют программные пакеты инженерного анализа, основанные на методе конечных элементов (FEM), например ANSYS, SYSWELD, Simufact Welding и др. Однако их применение на стадии технологической подготовки производства имеет ряд существенных ограничений, наиболее общими из которых являются:

- чрезмерная сложность пользовательского интерфейса;
- специфические требования к квалификации пользователей;
- долгая и трудоемкая подготовка расчета;
- длительное время расчета;
- высокие требования к информационно-коммуникационная инфраструктуре;
- часто представлено решение только задач анализа (нет оптимизации);
- сварной шов определяется теоретическими моделями (снижается точность, увеличиваются сложность подготовки и время расчета, часто не учитывается многопроходность швов), рис. 3;
- зарубежное происхождение такого рода программного обеспечения.

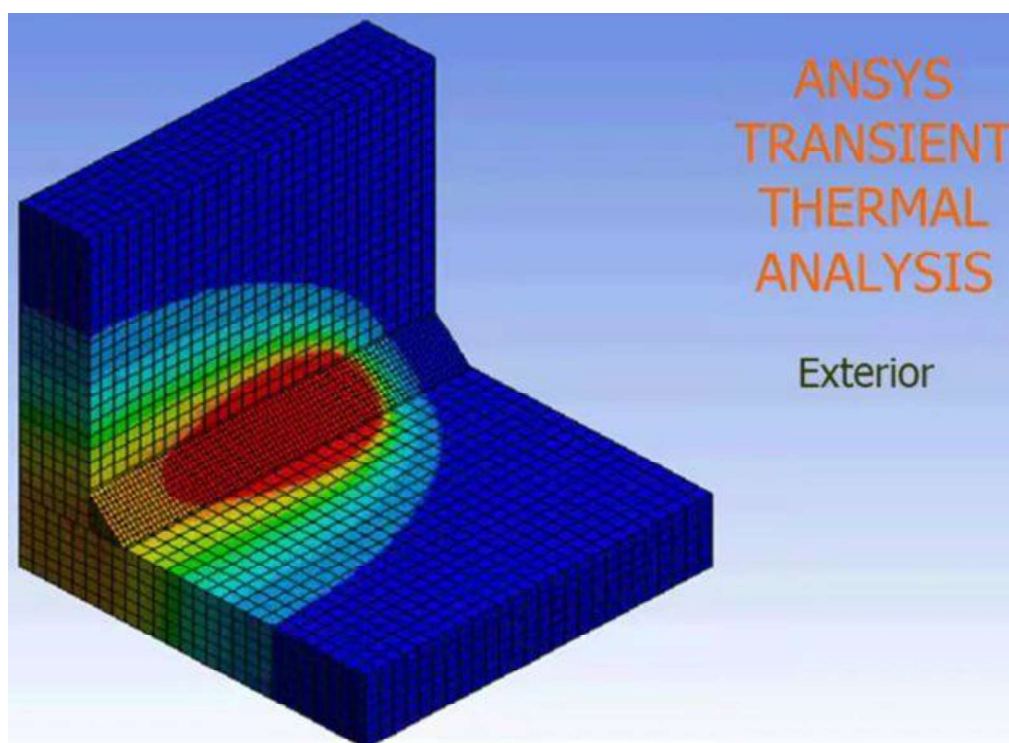


Рис. 3. Теоретическая модель шва вместо моделирования процесса сварки (кадр из видео, опубликованного на сайте <https://www.youtube.com/watch?v=1u5g57FuLt8>)

Существующие отечественные программные инструменты инженерного анализа предлагают либо узкоспециализированные аналитические решения с ограниченным функционалом, либо построены на том же методе конечных элементов со всеми характерными ограничениями. Отсюда следует вывод, что на отечественном и мировом рынках отсутствуют подходящие инструменты инженерного анализа сварки для стадии технологической подготовки. В то же время, есть острая необходимость «здесь и сейчас», быстро и дешево решать на производстве ряд сложных технологических задач по уменьшению сварочных деформаций и повышению точности изготовления сварных конструкций. Создаваемая компанией Юмосс система инженерного анализа сварки CAE WeRTSim представляет именно такой инструмент, который будет лишён вышеупомянутых ограничений FEM-пакетов, так как это изначально является основным условием при проектировании архитектуры продукта и философией его разработки.

### **Система инженерного анализа сварки CAE WeRTSim**

Разработка и применение отечественных имитационных моделей (ИМ, цифровых двойников) сварочных процессов для проектирования и численного анализа технологии сварки, основанных на разностных методах, свободных от недостатков конечно-элементных пакетов, является очень перспективным направлением повышения качества изделий и производительности труда. Реализация таких моделей [8] позволяет специалистам по сварке, без повышения квалификации, быстро решать широкий круг производственных вопросов [9], в том числе проектировать технологию сварки с помощью корреляционного анализа и оптимизации параметров процесса, оценки консолидированного влияния сварных швов на напряженно-деформационное состояние всей конструкции за счет вариативного комбинирования последовательности и направлений наложения этих швов, последовательности и направлений проходов для каждого шва.

В настоящее время компания АО «Юмосс» разрабатывает отечественную компьютерную систему инженерного анализа сварки и родственных технологий CAE WeRTSim для стадии технологической подготовки производства. Система строится на базе программной платформы, объединяющей цифровые двойники сварочных процессов с инструментами инженерного анализа сварочной технологии, рис. 4.

Программная платформа CAE WeRTSim обладает следующими особенностями:

- построена на микросервисной архитектуре, поддерживает распределённые вычисления, обеспечивает гибкость, независимость масштабирования и развертывания компонентов, их слабую связанность и использование асинхронного взаимодействия для обработки пиковых нагрузок;
- предоставляет единый Web-интерфейс для всех модулей и компонентов, позволяя бесшовно создавать на их основе кастомизированные решения в различных факторах (DeskTop-приложение, Web-сервис);
- является кроссплатформенным решением, обеспечивает функционирование в Windows и Linux (в том числе семейство AstraLinux);
- формирует единое информационное пространство для всех пользователей и модулей Системы.

Цифровые двойники сварочных процессов представляют собой ИМ различных видов сварки, учитывающие специфику каждого процесса. ИМ с помощью калибровочных коэффициентов адаптируются под характеристики используемого оборудования и особенности применяемой на заводе технологии сварки.



Рис. 4. Функциональная структура CAE WeRTSim

Инструменты инженерного анализа сварочной технологии представлены расчетными и функциональными модулями, алгоритмами Вычислительных Экспериментов (ВЭ).

### Технология имитационного моделирования сварки

На основе CAE WeRTSim специалистами АО «Юмосс» была разработана Технология Имитационного Моделирования (ТИМ) сварки, которая успешно апробирована в рамках совместных НИР для различных видов сварочных процессов в условиях реального производства на нескольких заводах. Так, например, совместно с АО «ОССЗ» проведена НИР [9] для процесса автоматической сварки под флюсом СКК.

Целью НИР являлось исследование влияния ТИМ на следующие показатели:

- повышение производительности труда за счет уменьшения сварочных деформаций и, как следствие, сокращения временных, материальных и финансовых затрат на их исправление;
- снижение квалификационных требований к инженерно-техническим работникам и производственному персоналу за счет внедрения рекомендательной системы и, как следствие, уменьшение остроты проблемы кадрового дефицита и снижение стоимости постройки судов при одновременном сохранении и повышении качества продукции;

– снижение издержек при технологической подготовке сварочного производства за счет замены натуральных экспериментов (в рамках иногда проводимой предпрограмной технологической проработки [10]) на ВЭ над ИМ процесса и, как следствие, сокращение сроков и стоимости процесса технологической подготовки производства;

– повышение оперативности и обоснованности выработки технологических решений, направленных на:

- выбор технологических процессов/последовательностей при проектировании сварочной технологии;

- выбор эффективных мероприятий по уменьшению деформаций;

- оптимизацию режимов и условий сварки.

Содержание НИР включало:

– анализ применяемой на заводе технологии сварки тонколистовых и толстолистовых СКК:

- прямое наблюдение за подготовкой листов под сварку, закрепление и снятие технологической оснастки, прихватку, сварку, кантование и перемещение свариваемой конструкции, приварку продольных и поперечных наборов с одновременным проведением мероприятий по исправлению сварочных деформаций;

- фиксирование состояния листов перед сваркой, наличия конструктивных элементов, параметров режимов и условий сварки, очередности и направления сварных швов, характеристик оборудования и материалов;

- оценка сварочных деформаций СКК в плоскости листов на каждом технологическом переходе;

- проведение замеров времени выполнения отдельных технологических переходов и мероприятий по устранению сварочных деформаций с помощью П-образных рамок и домкратов;

- систематизация и обобщение результатов наблюдений и измерений;

– подготовка ИМ дуговой сварки под флюсом плавящимся электродом:

- формирование модельных данных: заведение геометрии сборки с учетом конструктивных элементов, закрепления сборки, свойств и характеристик материалов, параметров режима и т.д.;

- валидация ИМ, заключающаяся в подтверждении того, что она достаточно точно отражает реальные физические и технические процессы и соответствует требованиям решаемой задачи;

- проверка адекватности ИМ, заключающаяся в оценке соответствия её результатов реальным экспериментальным данным с заданной точностью;

- калибровка ИМ, заключающаяся в изменении параметров ИМ в соответствии с набором натуральных данных для минимизации разницы между натурными данными и результатами работы ИМ;

– исследование процесса сварки СКК методом ВЭ над подготовленной ИМ для поиска возможностей изменения (улучшения) технологии сварки с целью минимизации сварочных деформаций;

– выработка рекомендаций по изменению технологии сварки на основе результатов проведенных ВЭ;

– апробация основных рекомендаций в реальном технологическом процессе:

- проведение натуральных экспериментов по сварке СКК с учетом выданных рекомендаций;

- оценка сварочных деформаций СКК в плоскости листов на каждом технологическом переходе;

- проведение замеров времени выполнения отдельных технологических переходов и мероприятий по устранению сварочных деформаций;

– сравнение результатов анализа применяемой на заводе технологии сварки тонколистовых и толстолистовых СКК с результатами апробации рекомендаций, основанных на применении ТИМ, рис. 5.

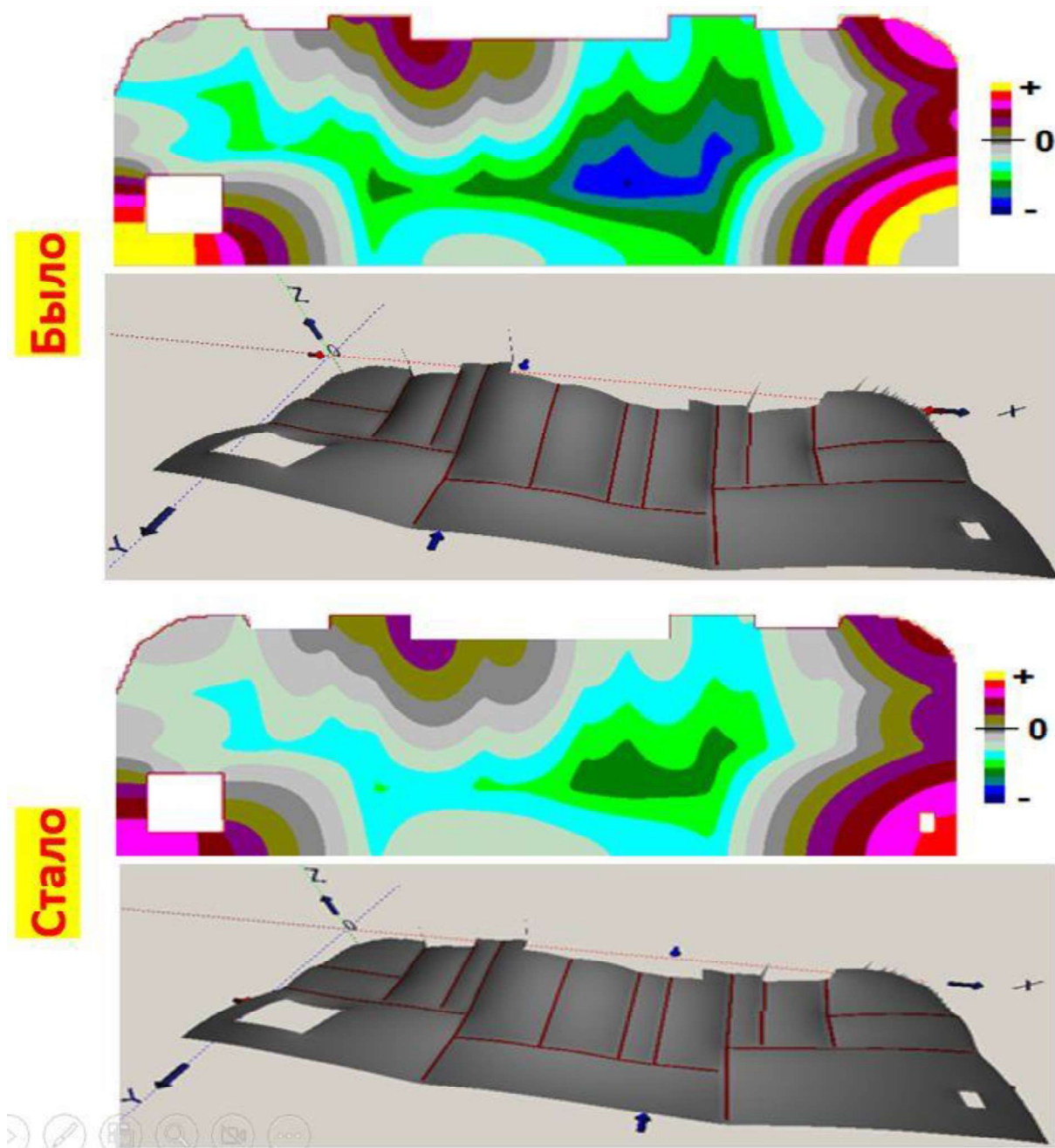


Рис. 5. Пример применения ТИМ сварки для уменьшения сварочных деформаций

Результаты НИР показали, что применение ТИМ позволяет значительно увеличить производительность труда и повысить эффективность производства сварных конструкций. Так, например, для габаритного полотнища с 24 протяжёнными многопроходными швами было установлено, что применение ТИМ позволило:

- сократить время сварки полотнища с 20 до 10 часов (в среднем на 50%);
- уменьшить величину сварочных деформаций в плоскости конструкции на 33% (в среднем на 20%);

- сократить длительность мероприятий по борьбе с деформациями с 12–15 минут до 6–10 минут (в среднем на 17%);
- значительно сократить количество мероприятий по борьбе с деформациями (в среднем на 20%);
- сократить расход электродной проволоки до 40%;
- сократить расход флюса до 37%.

Конечно, НИР была выполнена на примере лишь нескольких типовых СКК, однако можно сделать вывод, что суммарный эффект от внедрения ТИМ будет пропорционален количеству СКК, используемых при строительстве всего судна. Соответственно, в масштабах предприятия или судостроительной отрасли, общий эффект от внедрения ТИМ будет мультиплицирован на их пропускную способность.

#### **Автоматизация задач**

Внедрение ТИМ предполагает автоматизацию следующих задач, выполняемых на стадии технологической подготовки производства:

- **прогноз качества шва** – термодинамический анализ процесса сварки при заданной комбинации параметров режима;
- **пакетная обработка заданий** – задача «прогноз качества шва», решаемая многократно при различных комбинациях параметров режима;
- **параметрический анализ** (параметрическое исследование) процесса сварки – термодинамический анализ процесса сварки при варьировании одного параметра режима в заданном диапазоне для оценки его влияния на качество шва, рис. 6;
- **диагностика качества шва** – термодинамический анализ процесса сварки при одновременном варьировании нескольких параметров режима в заданных диапазонах для оценки их влияния на качество шва при отклонении значений этих параметров от заданных;
- **факторный анализ** – синтез параметра режима при прочих заданных для получения требуемого качества шва;
- **оптимизация параметров режима** – поиск оптимальной комбинации параметров режима по заданному критерию: максимальная производительность процесса, максимальная стабильность характеристик качества, минимальные напряжения и деформации металла шва и около шовной зоны (см. рис. 6);
- **прогноз сварочных деформаций** – термодинамический анализ сварной конструкции при взаимовлиянии всех швов с учетом их порядка и направления, а также с учетом порядка и направления отдельных проходов для каждого шва при многопроходной сварке;
- **оптимизация технологии сварки** – поиск оптимального порядка и направлений швов и отдельных проходов для каждого шва при многопроходной сварке с целью минимизации сварочных деформаций конструкции;
- **верификация имитационных моделей** – сравнение результатов опытной сварки и имитационного моделирования на основе статистических критериев достоверности.

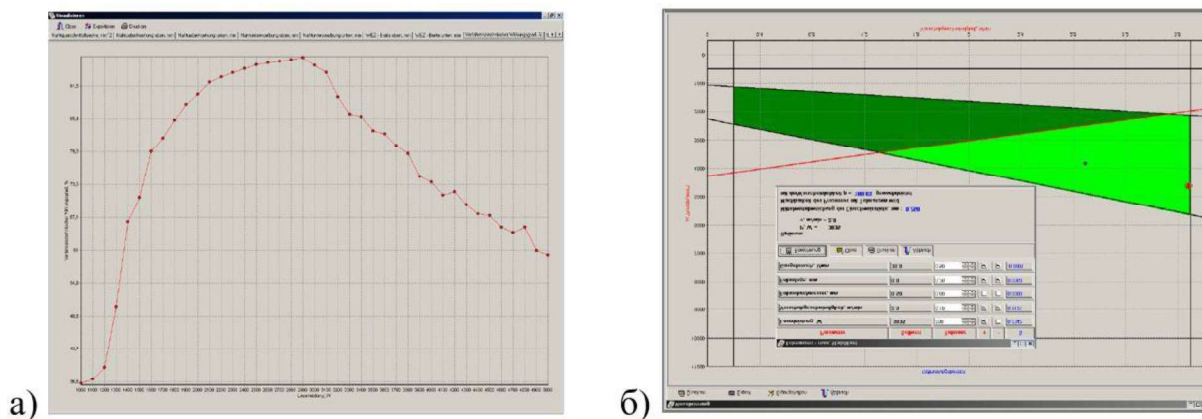


Рис. 6. Пример результатов работы модулей CAE WeRTSim на основе ВЭ:  
а – параметрический анализ, б – оптимизация параметров режима

Алгоритмы ВЭ реализуются на платформе CAE WeRTSim как управляющие модули над цифровыми двойниками различных видов сварки и элементарными функциями – расчётными модулями, выполняющими предобработку данных и постобработку результатов моделирования.

#### Автоматизация рабочих процессов технологической подготовки

Следующим логичным шагом по автоматизации стадии технологической подготовки производства, после автоматизации рутинных задач, будет автоматизация рабочих процессов (РП, workflow). РП являются подвидом бизнес-процессов (BP, Business process), автоматизация которых (BPA, Business process automation) изначально была одним из важнейших аспектов управления бизнес-процессами (BPM, Business process management) и нацелена на трудоемкие и повторяющиеся задачи для повышения производительности труда. В настоящее время BPA стала движущей силой и центральным краеугольным камнем любой цифровой трансформации.

Автоматизация РП закрывает потребность в оптимизации операций и принятии более точных решений, а также повышении эффективности за счёт сокращения количества ошибок, ускорения согласований изменений, исключения человеческого фактора в расчётах и высвобождает человеческие ресурсы для выполнения более важных задач. Workflow – это подход к автоматическому выполнению различных процессов и задач с минимальным вмешательством человека. Для этого используется специализированное ПО, позволяющее создать серию автоматизированных действий с целью реализации этапов рабочего процесса. Программное обеспечение для workflow позволяет распределить задачи и данные между компонентами Системы на основе заранее определенных правил и триггеров, после чего процессы помещаются в автоматизированный поток, который следует набору интеллектуальных параметров и выполняет задачу так же, как это делает человек, рис. 7.

Для автоматизации РП на программной платформе системы инженерного анализа сварки CAE WeRTSim планируется разработать подсистему управления процессами и данными компьютерного моделирования (SPDM, Simulation process and data management) «АРМ Технолога». Такая подсистема позволит сократить рутину при создании технологической документации и выполнении расчетов. Основные методы создания «АРМ Технолога» заключаются в интеграции с САПР для получения чертежей, интеграции с отраслевыми и корпоративными информационными системами класса ERP/MES/PLM/PDM для обмена данными, а также в применении всех инструментов имитационного моделирования CAE WeRTSim для оптимизации проектирования

технологии. По сути «АРМ Технолога» – это автоматизированное рабочее место технолога для формирования технологических карт, схем и документации на основе автоматизированных расчетов параметров режима и оптимизации условий сварки.

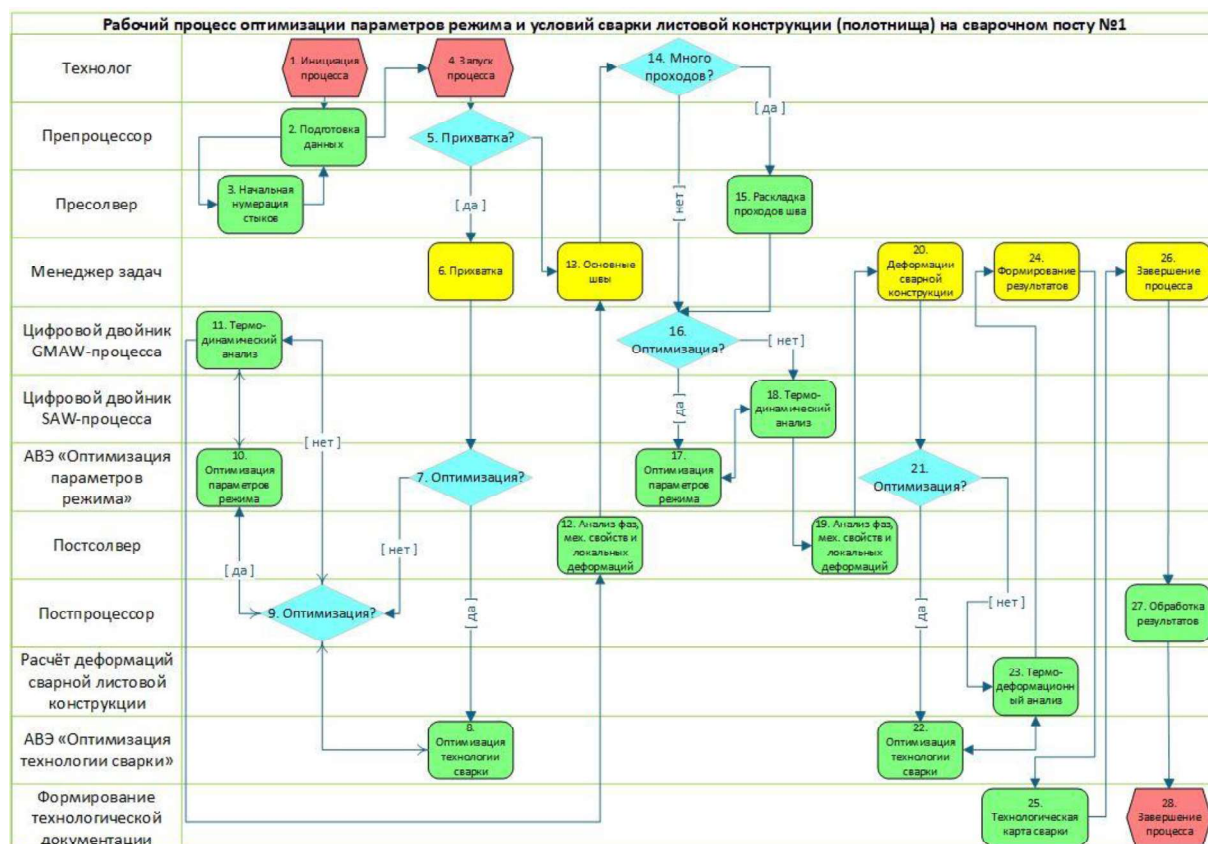


Рис. 7. Рабочий процесс оптимизации параметров режима и условий сварки СКК

### Выводы

Таким образом, использование функциональных модулей платформы CAE WeRTSim и внедрение программного инструмента ТИМ «АРМ Технолога» на её основе обеспечивают:

- сокращение сроков и стоимости строительства судов за счет:
  - уменьшения времени на технологическую подготовку сварочного производства;
  - экономии ресурсов при поиске оптимального варианта технологии сварки методами ВЭ;
  - сокращения количества и длительности проводимых мероприятий по борьбе со сварочными деформациями, а также сокращением издержек, связанных с этими мероприятиями;
- снижение квалификационных требований к инженерно-техническому и производственному персоналу при решении сложных технологических задач за счет применения экспертной (рекомендательной) системы, что решает проблему дефицита высококвалифицированных кадров и позволяет дополнительно снизить затраты на строительство судна за счет использования более дешёвого труда;
- интеграцию в сквозную технологию судостроения при её реализации.

## Литература

1. Строительство судна в России обходится минимум в два раза дороже, чем за рубежом / Генеральный директор РРПК Константин Глобенко // Медиапалуба: <https://paluba.media/news/203350>.
2. **Резникова К.М., Максимов В.Е., Попов Д.А.** Судостроение 4.0: современные технологии и перспективы концепции // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 2021 №1, <https://resources.today/PDF/02INOR121.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/02INOR121.
3. **Эннс Е.А., Заостровских Е.А.** Цифровизация судостроения в России через призму мировых тенденций // Региональные проблемы. 2024. Т. 27, №4. С. 105-116. DOI: 10.31433/2618-9593-2024-27-4-105-116.
4. Верфи будущего / **Мария Кузнецова** // «Цифровая экономика» (Приложение к газете «Коммерсантъ Северо-Запад» №208 от 13.11.2019 (<https://www.kommersant.ru/app/6004041?from=doc>)).
5. «Цифровая верфь» – начало проекта // «РИТМ машиностроения» № 6-2019 (<https://ritm-magazine.com/en/node/3764?ysclid=mnmuclunv5113972015>).
6. Цифровая платформа судостроения: Или как обеспечить технологический суверенитет в новых условиях? ([https://www.korabel.ru/news/comments/cifrovaya\\_platforma\\_sudostroeniya\\_ili\\_kak\\_obespechit\\_tehnologicheskii\\_suverenitet\\_v\\_novyh\\_usloviyah.html](https://www.korabel.ru/news/comments/cifrovaya_platforma_sudostroeniya_ili_kak_obespechit_tehnologicheskii_suverenitet_v_novyh_usloviyah.html)).
7. Почему нужно модернизировать действующие и строить новые судоремонтные заводы / **А.Д. Чепчугов** (<https://www.korabel.ru>).
8. 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 двенадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Санкт-Петербург, 15–17 октября 2025 года. – С. 764–774.
9. **Дикшев И.В., Ерофеев В.А., Масленников А.В., Медведков М.С.** Применение системы имитационного моделирования для инженерного анализа сварки судовых корпусных конструкций // Новые технологии в судостроении НТС-2025: Сборник трудов отраслевой научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 20-21 ноября 2025. СПб.: АО «ЦТСС». – С. 58–67.
10. Из практики технолога. Полуавтоматическая сварка судовых конструкций малых толщин / **Калинин В.А.** (<https://www.korabel.ru>).