

## Доклад на форуме НТС-2025

### Слайд 1. Титульный лист

Уважаемые коллеги, добрый день!

Рад представить Вашему вниманию полностью отечественное программное решение мирового уровня в области имитационного моделирования сложных физических процессов и явлений, предназначенное для инженерного анализа сварки и родственных технологий, разработкой и развитием которого занимается российская компания Юмосс.

Речь в докладе пойдет о применении продукта CAE WeRTSim для решения некоторых задач технологической подготовки сварочного производства судовых корпусных конструкций.

### Слайд 2. Объект инженерного анализа: технология сварки судовых корпусных конструкций

Развитие российского судостроения сталкивается с многими трудностями, среди которых: низкий уровень локализации оборудования и высокие кредитные ставки. Это так называемые внешние факторы, на которые судостроители повлиять особенно не могут. Но есть и внутренний фактор, который приводит к высокой стоимости и длительным срокам строительства судов. И связан он не с уникальностью проектов, а с низкой эффективностью производства.

Основным технологическим процессом соединения судовых корпусных конструкций является электродуговая сварка и производительность этого процесса напрямую влияет на эффективность производства. Имитационное моделирование может помочь в прогнозировании и повышении качества сварных соединений, оптимизации режимов сварки, выработке мероприятий по уменьшению сварочных деформаций. В свою очередь это позволяет значительно повысить производительность процесса, сократить время и расход материалов на устранение брака и борьбу с деформациями между технологическими переходами.

В настоящее время многие заводы, особенно небольшие, сталкиваются с дефицитом квалифицированных специалистов, в том числе инженерно-технических работников. Бывает и так, что на заводе вакантна должность главного сварщика и его функции выполняют технологи. Нередко встречается неполнота или отсутствие технологических карт сварочных работ, возникают трудности в выборе режима или присадки для сварки разнородных материалов, и тогда приходится полностью полагаться на квалификацию и опыт сварщика или проводить множество натуральных экспериментов. Имитационная модель в этом случае может выступать в роли рекомендательной или экспертной системы, позволяя снизить квалификационные требования к специалистам и заменить множество натуральных экспериментов на вычислительные, экономя время и деньги.

Вместе с четвертой промышленной революцией «Индустрия 4.0» в область судостроения пришла концепция «Судостроение 4.0». Несмотря на ее отделенность от «Индустрии 4.0», концепция также подразумевает автоматизацию производства посредством внедрения самых передовых технологий, предусматривает роботизацию и цифровизацию.

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. Ключевые направления цифровизации включают использование цифровых двойников, интернета вещей, искусственного интеллекта и больших данных для повышения эффективности всей цепочки создания стоимости. Имитационная модель, являясь цифровым двойником технологического процесса сварки, становится в этом плане важной и необходимой подсистемой для современных CAD и PLM-систем.

Перспективным направлением автоматизации сварочных процессов в судостроении является использование робототехнических комплексов для сварки. И хотя конечной целью применения сварочных роботов является повышение производительности труда и качества продукции, на практике приходится сталкиваться с длительным временем на перенастройку сварочных роботов, что связано со сложностью и уникальностью каждого изделия, а также с необходимостью адаптации робота к различным сварным швам и геометрическим параметрам корпуса судна. Под перенастройкой робота понимаются: точная и детальная подготовка и замена программного обеспечения, настройка параметров сварки под конкретный узел и тип материала, а также физическая перестановка и регулировка манипуляторов. Интеграция имитационной модели в систему управления сварочным роботом может значительно ускорить и автоматизировать его перенастройку.

### Слайд 3. Объект инженерного анализа: аспект первый

Любая сварочная технология представляет собой технологический процесс получения неразъёмных соединений материалов за счёт образования межатомных связей между свариваемыми частями при их местном или общем нагреве, пластическом деформировании или совместном действии того и другого. Результатом сварки является образование общей зоны расплавленного металла, которая кристаллизуется при охлаждении в сварной шов, образуя неразъёмное соединение деталей. Возникающие в процессе охлаждения усадочные силы в металле шва и зоны термического влияния ведут к образованию остаточных напряжений и деформаций в сварной конструкции.

Как Вы видите, сварка характеризуется разнообразием конструктивных и технологических параметров. Добавлю еще такие особенности, как защитная среда (газ, флюс, вакуум), а также различные варьируемые параметры: скорость процесса и скорость подачи присадочного материала, углы наклона горелки, параметры фокусировки луча, вольтамперная характеристика источника питания сварочной дуги, детали разной толщины, наличие зазора, смещение кромок и геометрия их разделки, форма неплавящегося электрода и другие.

Всё это самым непосредственным образом влияет на качество сварного соединения.

### Слайд 4. Проблема: прогноз качества сварных соединений

Одной из проблем реализации сварочной технологии является возникновение различных дефектов, которые являются следствием как неудачно выбранных параметров процесса, так и случайных отклонений этих параметров от нормы под воздействием внешних и внутренних факторов.

Другими проблемами являются изменение химического состава в зоне термического влияния вследствие испарения легирующих элементов, химические реакции горячего металла с окружающей средой, изменение прочностных характеристик металла после нагрева и охлаждения, а также возникновение напряженного состояния и упругопластических деформаций во всей конструкции.

Поэтому одной из важнейших задач проектирования технологии в сварочном производстве является обеспечение качества сварных соединений, заключающаяся в минимизации количества изделий с дефектами шва; сохранении химических, механических и прочностных характеристик изделия, минимизации сварочных напряжений и деформаций.

#### Слайд 5. Объект инженерного анализа: аспект второй

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

#### Слайд 6. Проблема: сварочные деформации листовых конструкций

Рассмотрим пример. Изначально подборку собирают на абсолютно жесткой конструкции (постели) и фиксируют с помощью гребней. После сварки гребни убирают и полотнище транспортируют на следующий участок для установки, стыковки и прихватки к нему продольных и поперечных наборов. Однако сразу после снятия гребней появляется волнообразная деформация полотнища, которая отчетлива видна на представленных фотографиях.

На следующей операции в сопрягаемых местах между торцами наборов и поверхностью полотнища образуются зазоры, величина которых может достигать 10 мм, а иногда и более. Это затрудняет дальнейший ход работ, увеличивая трудозатраты на уменьшение этих деформаций и повышая издержки производства (энергия, газ, штучные электроды и электродная проволока). Всё это напрямую влияет на срок изготовления и стоимость конечной продукции.

#### Слайд 7. Как проблема решается в настоящее время? (1. Предварительные расчеты с помощью универсальных конечно-элементных пакетов)

Опыт применения CAE-систем в разработке технологических процессов в различных отраслях промышленности во всём мире очень обширен. Программное обеспечение, лежащее в основе этого анализа, базируется в основном на методе конечных элементов. Такая популярность метода объясняется его возможностью достаточно точно описывать целый объект со всеми конструктивными элементами, а также хорошо проработанным математическим аппаратом. При этом такие CAE-системы являются очень сложными в использовании ввиду универсальности, а к квалификации пользователей предъявляют

высокие специфические требования, что является серьезным ограничением для их применения в технологической подготовке производства.

Существующие в настоящее время конечно-элементные CAE-системы предлагают пользователю обширный набор инструментов для детального анализа напряженно-деформированного состояния всей конструкции (с учётом всех термомеханических явлений и металлургических эффектов) и содержат модули для решения задач по анализу прочности конструкций, решению задач термо-, гидро- и газодинамики, задач по расчёту электростатических и электромагнитных полей.

Однако учёт значительного количества физических явлений (включая второстепенные, с точки зрения анализа технологии), а также большого числа конечных элементов (из которых состоит анализируемый объект), ведёт на практике к чрезмерно длительному времени расчетов (иногда сутками и неделями) и предъявляет серьезные требования к используемой IT-инфраструктуре. Это является еще одним серьезным ограничением для применения такого ПО в производственной практике.

Конечно-элементные пакеты ориентированы в основном на решение прямых задач анализа, и не позволяют решать более сложные обратные задачи математической физики. При этом, основной результат сварки (сварной шов) в таких пакетах либо задаётся в виде аппроксимированной поверхности (что явно недостаточно при многопроходной сварке для анализа раскладки сварных швов в разделке кромок, анализа дефектов шва, напряжений и деформаций в около шовной зоне), либо получается моделированием, но с использованием всего лишь нескольких теоретических (сильно упрощённых) моделей источников теплоты, что требует итерационного подхода к калибровке имитационных моделей и дополнительно увеличивает время расчёта.

Кроме того, западное происхождение такого ПО исключает возможность его применения в условиях санкционного давления на Россию из-за отсутствия продаж и технической поддержки. Хотя нужно отметить, что сегодня на рынке инженерного ПО для сварки присутствуют и отечественные аналоги западных CAE-систем, но они предлагают либо узкоспециализированные аналитические решения с ограниченными функциональными возможностями, либо построены на том же конечно-элементном методе со всеми его ограничениями для применения инженерами-технологами.

#### Слайд 8. Как проблема решается в настоящее время? (2. Непосредственно в процессе производства: подгоночные работы)

Для уменьшения зазоров, вызванных сварочными деформациями, перед прихваточными работами проводят локальную протяжку мест стыковки с помощью специальной оснастки – П-образных упоров и специальных домкратов.

Упор приваривается к полотнищу в локальном месте правки с помощью точечных прихваток, и между ним и поверхностью полотнища вкручивается специальный домкрат, стягивающий (прижимающий) стыкуемые поверхности, уменьшая тем самым монтажный зазор.

Время установки одного такого комплекта и уменьшения зазора с последующим демонтажом комплекта занимает в среднем 10 мин. Бывают случаи, когда при стягивании поверхностей, монтажные прихватки П-образной рамки рвутся, и тогда процесс установки комплекта приходится повторять снова после демонтажа рамки. В последнем случае

время уменьшения зазора (протяжки) увеличивается в среднем до 15 мин. В особых случаях, в зависимости от величины и неравномерности зазора по стыкуемой длине, могут устанавливаться два комплекта оснастки на один элемент набора. Допустим, что к полотнищу приваривается 10 поперечных ребер, тогда время протяжки может составить от 100 до 300 мин.

Заметим, что эти лишние трудозатраты и расход материалов и энергии приходятся всего лишь на одну небольшую подборку на одном технологическом переходе. Для всего судна эти трудозатраты и издержки мультиплицируются на количество подборок и технологических переходов.

#### Слайд 9. Численное моделирование сварки и родственных технологий

Компания Юмосс разработала и развивает платформу цифровых двойников различных технологий машиностроения, включая сварку стыков сложной геометрии из разноименных и разнородных материалов, наплавку, резку, напыление, поверхностное упрочнение и легирование, литьё и другие.

Цифровые двойники основаны на имитационных моделях высокотемпературных процессов и позволяют всесторонне их исследовать методами вычислительных экспериментов, включая синтез и оптимизацию параметров.

#### Слайд 10. Отечественное программное решение мирового уровня

В основу CAE WeRTSim положены уникальные алгоритмы моделирования, которые были разработаны в результате многолетних исследований российских ученых под руководством д.т.н. проф. Судника В.А. Большой вклад в эти исследования внесли д.т.н. проф. Рыбаков А.С. и к.т.н. Ерофеев В.А.

С 1973 года научная школа занимается созданием физико-математических моделей высокотемпературных процессов машиностроительных технологий и разработкой на их основе инженерного программного обеспечения, его внедрением в промышленность, а также непосредственным решением технологических проблем на промышленных предприятиях.

Основные расчетные алгоритмы были ранее верифицированы по экспериментальным данным и прошли проверку многолетней промышленной эксплуатацией на реальных отечественных и международных производственных предприятиях.

#### Слайд 11. Термодинамический анализ

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 ускорить время моделирования до нескольких минут, что является критически важным как при обучении студентов, так и при решении подавляющего большинства конструкторских и технологических задач. Дополнительно

ускорение расчетов достигается за счет того, что в моделях учитываются только основные физические явления и их влияние на целевые характеристики качества.

Областью численного анализа является локальная зона, ограниченная размерами термического влияния 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 до момента достижения установившегося состояния или окончания процесса. Её численное решение осуществляется с малым шагом как по времени, так и пространственным координатам, позволяя учитывать взаимодействие физических явлений с высокой точностью.

#### Слайд 12. Основные преимущества

Применение разностных методов позволило не только ускорить время расчетов, но и построить интуитивно понятный инженеру-технологу пользовательский интерфейс. От пользователя не требуется наличие специальных знаний и опыта применения численных методов анализа, как в случае с методом конечных элементов. Кроме того, для получения навыков работы с CAE WeRTSim не требуется прохождения отдельного обучения, достаточно обладать инженерной квалификацией и опытом работы на компьютере.

Платформа обеспечивает возможность бесшовной интеграции имитационных моделей и механизмов управления вычислительными экспериментами с внешними информационными системами через API, позволяя создавать более сложные и более точные инструменты инженерного анализа для конструкторов и технологов.

#### Слайд 13. Инженерный анализ сварки и родственных технологий

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.

Полнофункциональная Система изначально является облачным сервисом, но может быть сконфигурирована и в виде кроссплатформенного настольного приложения или решения для частного облака.

На данном слайде представлена общая структурная схема с последовательностью переходов от постановки задачи моделирования и задания комбинации входных параметров до получения результата.

#### Слайд 14. Решение прямой задачи

На слайде приведен один из алгоритмов решения прямой задачи, который заключается в последовательном применении трёх основных модулей CAE WeRTSim: термодинамического анализа, деформационного анализа и термоправки. Относительная быстрота расчётов в CAE WeRTSim объясняется масштабами, в пределах которых происходит тот или иной расчёт.

Так термодинамический расчёт реализуется в локальной зоне текущего сварного шва, позволяя тем самым довольно быстро получить геометрию шва и зоны термического влияния и разупрочнения. Результаты термодинамического анализа являются входными параметрами для последующего деформационного расчёта.

Деформационный расчёт, напротив, локально-глобальный, это необходимо, чтобы учесть зону разупрочнения конкретного шва и его влияние на остальные швы сварной под сборки.

Модуль «Термоправка» реализован в основном в локальной постановке. Здесь рассматривается конкретная область правки сварной конструкции.

#### Слайд 15. Термо-деформационный анализ (термодинамический анализ)

Первым шагом термо-деформационного расчета является термодинамический анализ. Его цель – определить геометрические размеры как профиля многопроходного шва, так и размеры зоны термического влияния (разупрочнения). Основы реализации были представлены довольно подробно на слайде 11. По заданным параметрам режима и схеме расположения отдельных проходов происходит расчёт температурного поля и размеров сварного шва по мере его выполнения. Учитываются температурно-зависимые теплофизические свойства свариваемого материала (энтальпия, теплопроводность, плотность). Если типов сварных соединений в рассчитываемой под сборке несколько, термодинамический расчёт выполняется для каждого из них.

#### Слайд 16. Термо-деформационный анализ (деформационный анализ)

В качестве исходных данных модуль деформационного анализа использует информацию по термодинамическим свойствам материала, геометрии профиля каждого из сварных швов, включая зону разупрочнения (порядка 600 градусов, в зависимости от стали). Эти данные являются результатами расчёта модуля термодинамического анализа. Кроме того, учитывается количество и порядок расположения сварных швов в конструкции. Далее, в цикле, по количеству швов и комбинациям их расположения, происходит расчёт общей и локальных деформаций сварной конструкции для каждого варианта. Учитываются усадочные силы и моменты, решаются уравнения совместности деформаций и перемещений. После расчётов происходит выбор варианта (комбинации) с минимальной общей остаточной деформацией конструкции.

### Слайд 17. Модуль расчета режима термоправки

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.

Результатами расчета являются:

- температура (мощность) нагрева зоны правки;
- время нагрева;
- формы зоны нагрева;
- места нагрева для достижения оптимального результата.

В заключении хочу сказать, что по некоторой информации, полученной нами, технология термической правки в судостроении была утрачена – не сохранилась документация, отсутствуют специалисты, не проводится подготовка новых специалистов.

Мы поставили перед собой важную цель: развивая CAE WeRTSim по возможности восстанавливать утраченные технологии (например, создать модель термической правки) и отрабатывать новые технологии (например, сейчас прорабатывается модель гибки судовых корпусных конструкций).

### Слайд 18. Спасибо за внимание!

Будем очень рады, если наш продукт реально поможет в решении ваших производственных задач.

Благодарю за внимание.