

## Доклад на форуме ИСР-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 численном моделировании и компьютерной имитации высокотемпературных процессов различных технологий машиностроения.

Основой для создания большинства имитационных моделей WeRTSim послужили численные модели различных процессов сварки плавлением стыков сложной геометрии из разноименных и разнородных металлов, поэтому примеры в докладе построены именно на этих базовых процессах, так как рассказать об особенностях всех процессов в рамках одного доклада не представляется возможным.

### Слайд 2. Что представляет собой объект инженерного анализа?

Любая сварочная технология представляет собой технологический процесс получения неразъемных 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 неразъемное соединение деталей.

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, вольт-амперная 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 3. Основная проблема – прогнозирование качества

Одной из проблем реализации сварочной технологии является возникновение различных дефектов, которые возникают как следствие 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 упруго-пластических 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 4. Задачи имитационного моделирования

Традиционно отработку и корректировку новой сварочной технологии и её параметров проводят в заводских лабораториях на опытных образцах. На начальном этапе создания производства нового изделия технологию изготовления проектируют на основе предшествующего опыта, обобщённого в стандартах и технологических инструкциях. При этом вероятность возникновения дефектов, как правило, не оценивается. Если качество не соответствует требованиям, выполняют корректировку технологии и процесса. Другими словами, применяется метод проб и ошибок, что, в свою очередь, влечёт значительную длительность и стоимость разработки и адаптации технологии. Корректировку технологии выполняют до получения удовлетворительного качества сварки, и на этом начальный этап создания технологии завершается (что ещё не гарантирует её оптимальность).

После запуска производства, из-за несоответствия предшествующего опыта и лабораторных условий реальным условиям производства, неизбежно появление брака. Возникает необходимость дополнительной корректировки технологии.

Значительно повысить скорость и снизить стоимость разработки и адаптации технологии сварки можно за счёт применения имитационного моделирования. Имитационные модели процессов позволяют значительно сократить время и снизить объём дорогостоящих экспериментов. Кроме того, имитационные модели незаменимы в исследовании многопараметрических нелинейных процессов, экспериментальное изучение которых традиционными методами трудноосуществимо или вовсе невозможно.

Основные задачи имитационного моделирования были представлены на этом слайде.

#### Слайд 5. Как проблема решается в настоящее время?

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 серьёзным ограничением для их применения в технологической подготовке производства.

Существующие в настоящее время конечно-элементные CAE-системы предлагают пользователю обширный набор инструментов для детального анализа напряжённо-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 серьёзные требования к используемой IT-инфраструктуре. Это является еще одним серьёзным 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 6. 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 7. Отечественное программное решение мирового уровня

В основу CAE WeRTSim положены уникальные алгоритмы моделирования, которые были разработаны в результате многолетних исследований, проведенных в российской научной школе численного анализа и моделирования сварочных процессов кафедры Сварки при Тульском государственном университете под руководством д.т.н. проф. Судника 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 8. Учитываются основные физические явления

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 9. 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 10. 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 11. Области применения CAE «WeRTSim»

Платформа цифровых двойников найдет применение в различных областях от обучения студентов инженерных специальностей до создания промышленных инноваций.

Например, в области обучения инженеров, Система позволит решить следующие задачи:

- повышение привлекательности технических специальностей для молодежи;
- создание компьютерных тренажерных комплексов;
- снижение стоимости и повышение безопасности практических и лабораторных занятий;
- удобный инструмент для выполнения курсовых и дипломных работ, проведения научных исследований.

#### Слайд 12. Спасибо за внимание!

Благодарю за внимание.