УДК 004.942; 621.791:004.9
2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования



Д.Б. Крюков
Пензенский государственный университет

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Представлен комплексный анализ современных подходов к моделированию сварных конструкций, интегрированных в среду САПР. Рассмотрена эволюция методов проектирования: от геометрического представления швов до мультидисциплинарного инженерного анализа. Особое внимание уделено возможностям решателей метода конечных элементов, таких как NX Nastran, MSC Nastran, ANSYS, ABAQUS и LS-Dyna, в контексте решения задач сварочного производства. Проанализированы проблемы сеточно-независимого моделирования швов, учета фазовых переходов и термомеханических процессов. Сформулированы перспективы развития гибридных технологий проектирования, основанных на интеграции CAD-/CAE-систем и специализированного ПО для сварки.

САПР, сварные конструкции, метод конечных элементов (МКЭ), NX Nastran, ANSYS, ABAQUS, LS-Dyna, моделирование сварки, остаточные напряжения, топологическая оптимизация.

Современное машиностроение, судостроение и строительство предъявляют высокие требования к надежности и металлоемкости сварных конструкций. Традиционный подход «проектирование – изготовление натурного образца – испытания» является экономически неэффективным и уступает место виртуальным испытаниям на ранних стадиях разработки. Ключевым инструментом здесь выступают системы автоматизированного проектирования (САПР) и инженерного анализа (CAE).

Однако простое создание 3D-модели сварного узла недостаточно для прогнозирования его реального поведения. Сварное соединение – это зона структурной неоднородности, высоких остаточных напряжений, деформаций и потенциального зарождения усталостных трещин. В связи с этим возникает необходимость применения специализированных решателей, способных корректно описывать нелинейные процессы, происходящие при сварке и последующей эксплуатации, что представляет собой актуальную задачу [1].

Целью данной работы является анализ современных возможностей САПР и встроенных/ассоциированных решателей для сквозного проектирования сварных конструкций, а также выявление основных проблем и путей их решения при численном моделировании.

Научная новизна работы заключается в проведении компаративного (сравнительного) анализа решателей МКЭ не с точки зрения их математической эффективности в абстрактных задачах, а в контексте их прикладной пригодности для сквозного проектирования сварных конструкций на различных этапах жизненного цикла изделия. Впервые в рамках одного исследования систематизированы критерии выбора между универсальными пакетами (ANSYS, ABAQUS, Nastran, LS-Dyna) на основе типа сварного соединения (точечная, стыковая, угловая) и решаемой задачи (термомеханика наплавки vs. прочностной анализ готового узла). Дополнительным элементом новизны является выявление проблемы неконгруэнтности сеток на границе «деталь – шов» при автоматическом разбиении в CAD-системах и обоснование необходимости применения методов гибридного моделирования (сеточно-независимые подходы) для повышения точности расчетов.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методологии численного моделирования сварных соединений. Проведенный анализ позволил уточнить границы применимости различных физических и математических моделей (модели единого тела, идеализированные швы, активация элементов) для описания напряженно-деформированного состояния в зоне термического влияния. Систематизированы теоретические основы выбора решателя в зависимости от нелинейности задачи (геометрическая, физическая, конструкционная), что вносит вклад в теорию автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении.

Практическая значимость заключается в том, что сформулированные в статье выводы и сравнительные характеристики решателей могут быть непосредственно использованы инженерами-конструкторами и технологами сварочного производства для обоснованного выбора программного обеспечения. Представленные данные о погрешностях моделирования точечной сварки в LS-Dyna (менее 5 %) и возможностях ANSYS/ABAQUS в прогнозировании остаточных напряжений позволяют сократить вре-

менные и материальные затраты при проведении виртуальных испытаний, минимизируя необходимость в дорогостоящих натурных экспериментах.

В процессе подготовки статьи проводилось изучение и реферирование актуальных публикаций и учебных пособий по теме за период 2010–2026 гг., а также сопоставление функциональных возможностей решателей NX Nastran, MSC Nastran, ANSYS, ABAQUS и LS-Dyna по единым критериям (нелинейность, термомеханика, точность для точечной сварки).

На начальных этапах внедрения трехмерного моделирования сварные швы изображались условно или обозначались технологическими пометками. Современные САПР (такие как SolidWorks, Компас-3D, NX CAD) предлагают специализированные модули для проектирования сварных конструкций, которые позволяют оперировать понятиями «подготовка кромок», «разделка», «катет шва» и др. [2].

Важным аспектом является разграничение геометрии «до сварки» и «после обработки». Современные CAD-системы поддерживают создание конфигураций, где отверстия или элементы механической обработки подавляются в модели под сварку и активируются в модели готовой детали (конфигурации «после обработки»). Это позволяет технологам и конструкторам работать с единой моделью, избегая дублирования данных.

Однако геометрическое моделирование – лишь первый шаг. Основная сложность заключается в передаче этой геометрии в расчетные комплексы с корректным описанием физики шва.

Независимо от выбора программного комплекса, методология расчета сварных узлов методом конечных элементов (МКЭ) остается единой и включает следующие этапы [3]:

1. Создание геометрической модели свариваемых деталей и непосредственно сварных швов.

2. Задание параметров конечно-элементной сетки: критически важным является управление размером элементов вдоль шва и в зоне термического влияния (ЗТВ).

3. Генерация сетки: разбиение на конечные элементы деталей и швов.

4. Объединение узлов на совпадающих гранях сварных швов и деталей для обеспечения совместности перемещений.

5. Приложение граничных условий, нагрузок и источников тепла, расчет.

Как отмечается в литературе, при автоматическом формировании сетки возникает ряд проблем [4]. Во-первых, малый поперечный размер сварных швов приводит к неоправданному измельчению сетки в прилегающих областях, что резко увеличивает время счета. Во-вторых, стандартные опции автоматического разбиения часто не обеспечивают конгруэнтность узлов на границе «деталь – шов», требуя ручной «склейки».

В области сварочного производства условно можно выделить два класса ПО: универсальные CAE-системы общего назначения (с мощными решателями) и специализированные сварочные симуляторы.

Универсальные пакеты обладают широкими возможностями для решения связанных термомеханических задач.

- NX Nastran и MSC Nastran: традиционно считаются стандартом для линейного статического и динамического анализа. В контексте сварных конструкций они эффективны для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) уже готовых металлоконструкций под нагрузкой. Однако для нелинейных задач, связанных с движением сварочной ванны и фазовыми переходами, требуется использование более специализированных модулей или решателей.
- ANSYS: один из лидеров в области моделирования физических процессов. Позволяет проводить прочностной анализ сложных ортотропных плит со сварными соединениями, учитывая концентраторы напряжений в зонах пересечения швов. ANSYS эффективен для анализа усталостной долговечности и распространения трещин в сварных швах при переменных нагрузках.
- ABAQUS: обладает исключительно мощными нелинейными возможностями. Как показывают сравнительные исследования, ABAQUS часто используется для детального моделирования процесса сварки встык, позволяя оценивать эволюцию остаточных напряжений в зависимости от траектории нагрева. Благодаря поддержке сложных моделей материалов и разрушения, ABAQUS является стандартом для научных исследований в области сварочных деформаций и напряжений.
- LS-Dyna: решатель, ориентированный на быстропротекающие процессы и явную динамику. В контексте сварки он нашел широкое применение для моделирования сварки взрывом [5, 6]. Исследования показывают, что методики, реализованные в LS-Dyna, позволяют с высокой точностью (погрешность менее 5 %) прогнозировать качество формирования сварного шва в многослойных металлических композициях. Это критически важно на этапе их проектирования для возможности предварительной оценки уровня их физико-механических свойств [7].

Помимо универсальных решателей, существуют системы, заточенные исключительно под задачи сварки. К ним относятся Simufact Welding и Sysweld. Их ключевое отличие – наличие «инженерных» моделей, упрощающих настройку тепловых источников (например, модель двойного эллипсоида Голдака по умолчанию) и обширные базы данных материалов с температурно-зависимыми свойствами. Они часто используют те же математические ядра (например, MARC или ABAQUS), но предоставляют более дружелюбный интерфейс для технолога-сварщика.

Ключевой задачей инженера является выбор адекватной модели. Как показано в аналитических работах, сравнение результатов, полученных в ANSYS и ABAQUS, даже на простых стыковых соединениях может демонстрировать расхождения, связанные с алгоритмами учета пластических свойств материала и способами задания граничных условий теплообмена [8].

Таблица

Сравнение возможностей решателей для моделирования сварки

Критерий / Решатель	NX/MSC Nastran	ANSYS	ABAQUS	LS-Dyna
Специализация	Линейная прочность, динамика	Мультифизика, прочность	Нелинейные задачи	Быстро протекающие процессы
Термомеханика	Средне	Отлично	Отлично	Средне
Точечная сварка	Средне	Хорошо	Хорошо	Отлично
Рост трещин	Средне	Хорошо	Отлично	Средне
Удобство для сварки	Требует настройки	Требует настройки	Требует настройки	Требует настройки

При моделировании возможны три подхода:

1. Модель единого тела: детали и швы объединяются в одно целое. Это просто, но не позволяет оценить влияние технологии сварки и требует чрезмерного измельчения сетки.

2. Модель с идеализированными швами: швы заменяются специальными связующими элементами или граничными условиями. Это эффективно для расчета крупных конструкций, где детальная геометрия шва несущественна.

3. Детальная термомеханическая модель: шов моделируется с учетом наплавки («рождение» элементов). Это самый точный, но и самый трудоемкий способ, реализуемый в ANSYS и ABAQUS с использованием техник deactivation/activation (деактивации/активации) элементов [9].

Современный тренд – размытие границ между CAD и CAE. Системы САПР все чаще включают в себя встроенные расчетные модули на базе тех же решателей (например, Siemens NX включает NX Nastran). Это позволяет проводить итерационную оптимизацию прямо в процессе конструирования.

Перспективным направлением является топологическая оптимизация сварных узлов. Зная нагрузки и используя решатели типа OptiStruct или Tosca (интегрируемые с CAD), алгоритм предлагает оптимальное расположение ребер жесткости и материала. Результатом является не монолитная деталь, а облегченная сварная пространственная ферма или листовая конструкция, которая затем автоматически переводится в профили для модуля Weldments в CAD.

Кроме того, активно развиваются отечественные разработки, такие как SIMMAX-WELDING (СИММАКС-СВАРКА), которые нацелены на импортозамещение в области сварочного ПО и позволяют моделировать техпроцессы с высокой точностью [10].

Современные подходы к моделированию сварных конструкций в САПР базируются на глубокой интеграции геометрического моделирования и нелинейных решателей МКЭ. На основании проведенного обзора можно сделать следующие **выводы:**

1. Использование CAD-систем на этапе проектирования (с применением конфигураций «до» и «после» сварки) позволяет создать корректную основу для последующих расчетов.

2. Выбор решателя диктуется задачами: для анализа прочности готовых металлоконструкций эффективны NX Nastran и MSC Nastran; для моделирования сварочных процессов и остаточных напряжений – ANSYS и ABAQUS; для расчета точечной сварки и динамики разрушения – LS-Dyna.

3. Основной проблемой остается высокая стоимость вычислений (время счета) при моделировании наплавки, что требует использования методов локального измельчения сетки и суперкомпьютерных мощностей.

4. Будущее за гибридными подходами, где топологическая оптимизация в CAD генерирует идеальный сварной узел, а CAE-решатель подтверждает его технологичность и живучесть с учетом реальных сварочных дефектов и напряжений.

Литература

1. Подъемно-транспортные машины: расчет металлических конструкций методом конечных элементов : учебное пособие для СПО / А. В. Лагерев, А. В. Вершинский, И. А. Лагерев, А. Н. Шубин ; под редакцией А. В. Лагерева. – 2-е изд. – Москва : Юрайт, 2024. – 198 с.

2. Ярлыки CAD для сварных деталей. – Текст : электронный // MetalworkLab. – 2024. – URL: https://metalworklab.com/ru/ (дата обращения: 12.03.2026).

3. Шимкович, Д. Г. Расчет конструкций в MSC.visualNastran for Windows / Д. Г. Шимкович. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 704 с.

4. Мойсейчик, Е. А. Прочностной и деформационный анализ трехслойной ортотропной плиты с использованием программного комплекса ANSYS / Е. А. Мойсейчик, А. А. Яковлев // Наука и техника. – 2024. – Т. 23, № 4. – С. 45–54.

5. Математическое моделирование деформационного и взрывного процессов, происходящих при сварке взрывом / А. Е. Розен, И. С. Лось, А. Ю. Муйземнек, [и др.] // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2006. – № 9 (24). – С. 68–75.

6. Modeling explosive welding by using ls-dyna software / A. E. Rozen, I. S. Los, A. Yu. Muizemnek [et al.] // Shock-assisted materials synthesis and processing: Science, innovations, and industrial implementation (EPNM-2008). – 2008. – P. 24.

7. Крюков, Д. Б. Разработка модели нового композиционного армированного материала системы титан-алюминий в программе Solidworks / Д. Б. Крюков, А. В. Прыщак, М. С. Гуськов // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM : сбор-

ник статей VIII Международной научно-практической конференции / под редакцией В. З. Зверовщикова, И. И. Воячека, Д. В. Кочеткова. – 2014. – С. 45–49.

8. Обзор программного обеспечения для сварочного CAE анализа. – Текст : электронный // Блог CSDN. – 2025. – URL: https://blog.csdn.net (дата обращения: 12.03.2026).

9. Махненко, О. В. Информационные системы выбора технологических параметров для дуговой сварки (Обзор) / О. В. Махненко, И. И. Прудкий // Автоматическая сварка. – 2013. – № 4. – С. 39–46.

10. Лукьянова, Е. Будущее ПО SIMMAX-WELDING: какие изменения нас ждут / Е. Лукьянова // САПР и графика. – 2025. – № 1. – С. 4–7.

D.B. Kryukov
Penza State University

MODERN APPROACHES TO MODELING WELDED STRUCTURES USING COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS

This article presents a comprehensive analysis of modern approaches to modeling welded structures integrated into CAD environments. It examines the evolution of design methods, from geometric representation of welds to multidisciplinary engineering analysis. Particular attention is paid to the capabilities of finite element solvers such as NX Nastran, MSC Nastran, ANSYS, ABAQUS, and LS-Dyna in the context of solving welding problems. The challenges of mesh-independent weld modeling, accounting for phase transitions, and thermomechanical processes are analyzed. Prospects for the development of hybrid design technologies based on the integration of CAD/CAE systems and specialized welding software are outlined.

CAD, welded structures, finite element method (FEM), NX Nastran, ANSYS, ABAQUS, LS-Dyna, welding simulation, residual stresses, topology optimization.