

**УДК 621.791.001**

## **КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА СВАРИВАЕМОСТИ СТАЛЕЙ**

Быховец Марк Витальевич<sup>(1)</sup>

*Студент 6 курса<sup>(1)</sup>,  
кафедра «Сварка, диагностика и специальная робототехника»  
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана*

*Научный руководитель: С. А. Королев,  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка, диагностика и специальная  
робототехника»*

Разработка технологии сварки ответственных стальных конструкций требует одновременного обеспечения высоких эксплуатационных и технологических характеристик, что осложняется сложной взаимосвязью физических и металлургических процессов [1]. При сварке низко- и среднелегированных сталей происходит кристаллизация и оплавление границ зерен, рост зерна, диффузия водорода и превращение аустенита, что может приводить к горячим и холодным трещинам, а итоговые механические свойства зависят от структурных превращений после охлаждения. Улучшение одного показателя зачастую негативно влияет на другие, поэтому комплексный учет всех факторов возможен лишь с использованием расчетных методов и компьютерных технологий [2].

Компьютерная система анализа свариваемости сталей представляет собой комплексный программный продукт, разработанный для оптимизации конструкторско-технологической подготовки сварочного производства. Система позволяет снизить затраты и повысить экономическую эффективность за счет точного расчёта параметров сварочных процессов и анализа характеристик сварного соединения.

Архитектура системы построена по принципу многослойной модели. Пользовательский интерфейс обеспечивает удобный ввод и проверку исходных данных, а также их визуальное представление в текстовом и графическом форматах. Основной функционал реализован через расчетные модули, предназначенные для определения сварочных термических циклов, моделирования микроструктурных преобразований и расчёта механических свойств шва и околошовной зоны. Дополнительные слои отвечают за обработку данных, реализацию основной логики и взаимодействие с внешними программными комплексами.

Для оперативного расчёта параметров используются аналитические выражения и полиномиальные модели, полученные с помощью статистической обработки данных, рассчитанных методом конечных элементов для типовых сварных соединений. Система также интегрирует результаты численного моделирования, выполненного в специализированном программном обеспечении, таком как ANSYS [3] или «СВАРКА» [4], и может работать с экспериментально зарегистрированными данными сварочного термического цикла.

Одним из примеров применения является анализ автоматической сварки стыкового соединения заготовок толщиной 30 мм из стали 15Х2НМФА. Первоначальные настройки включали погонную энергию 3500 Дж/мм, температуру подогрева 25 °С и исходную концентрацию водорода 4 см<sup>3</sup>/100 г. Расчёты показали, что при таких условиях риск образования холодных трещин остаётся высоким из-за избыточных остаточных напряжений. Изменение параметров – повышение температуры подогрева до 200 °С и снижение концентрации водорода до 2 см<sup>3</sup>/100 г – позволило снизить уровень остаточных напряжений и устранить угрозу холодных

трещин, хотя некоторые показатели, такие как коэффициент запаса и твердость, нуждались в дополнительном улучшении.

Встроенный модуль оптимизации даёт возможность варьировать ключевые технологические параметры – погонную энергию, температуру подогрева и исходную концентрацию водорода – для подбора оптимальных условий сварки, отвечающих заданным требованиям, таким как коэффициент запаса не менее 1,5, твердость околошовной зоны не более 350 HV и условный предел текучести не менее 960 МПа. Анализ диапазонов варьирования показал, что оптимальными являются значения погонной энергии 3200–3400 Дж/мм, температуры подогрева 250 °С и концентрации водорода 1 см<sup>3</sup>/100 г, что обеспечивает требуемую технологическую прочность и устойчивость сварного соединения.

Таким образом, система позволяет проводить комплексную оценку свариваемости сталей с учётом физических, металлургических и механических характеристик сварного соединения, а также оптимизировать условия сварки под конкретные эксплуатационные требования. Перспективы развития включают расширение функционала за счёт анализа многопроходной сварки и послесварочной термической обработки, что позволит еще точнее прогнозировать качество сварных соединений. Демонстрационная версия системы доступна онлайн по адресу <https://weldability.ru>.

## Литература

1. Теория свариваемости сталей и сплавов / Э.Л. Макаров, Б.Ф. Якушин; под ред. Э.Л. Макарова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 549, [3] с.: ил.
2. Теория сварочных процессов: учебник для вузов / Неровный В. М., Коновалов А. В., Якушин Б. Ф. [и др.]; ред. Неровный В. М. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. - 702 с.: ил. - Библиогр.: с. 646-647. - ISBN 978-5-7038-4543-1
3. Программный комплекс ANSYS. URL: <http://www.ansys.com> (дата обращения: 20.08.2024).
4. Куркин А.С., Макаров Э.Л. Программный комплекс «Сварка» - инструмент для решения практических задач сварочного производства //Сварка и диагностика. – 2010. – №. 1. – С. 16-23.
5. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. - М: Машиностроение, 1981. - 247 с.
6. ГОСТ 26388-84. Соединения сварные. Методы испытаний на сопротивляемость образования холодных трещин при сварке плавлением. - М.: Издательство стандартов. 1985.- 22 с.
7. Куркин А. С. Расчетное определение свойств легированных сталей с учетом фазовых превращений //Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2020. – №. 4. – С. 47-53.
8. Konovalov A. V. Method for optimizing arc welding on the basis of the mathematical model of formation of weldability parameters of low-alloy steels //Welding international. – 2005. – Т. 19. – №. 9. – С. 724-728.