

УДК 621.791.011

Математическое моделирование тепловых процессов при многодуговой сварке продольного шва трубы большого диаметра

Ильенко Николай Игоревич^(*)

ilyenko14@ya.ru

Королев Сергей Анатольевич

korolevsa@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Представлена математическая модель для расчета тепловых процессов при многодуговой сварке под флюсом для продольного шва трубы большого диаметра. Данная модель позволяет получить температурные поля и скорости охлаждения в зоне термического влияния (ЗТВ) сварного соединения. Моделирование проведено с использованием программного комплекса ANSYS, позволяющего учитывать температурно-зависимые свойства стали. Полученные в результате моделирования основные параметры сварочного термического цикла необходимы для прогнозирования образования фаз в микроструктуре и обеспечения требуемых механических свойств сварного соединения. Также предложены направления для дальнейшего экспериментального подтверждения и совершенствования модели.

Ключевые слова: многодуговая сварка, распределение температуры, зона термического влияния, моделирование ANSYS, скорость охлаждения, микроструктура стали

Mathematical modeling of thermal processes in multi-arc welding of large-diameter pipe longitudinal seam

Nikolay Ilyenko Igorevich^(*)

ilyenko14@ya.ru

Sergey Korolev Anatolievich

korolevsa@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The article presents a mathematical model for simulating thermal processes in multi-arc submerged arc welding of a large-diameter pipe longitudinal seam. This model allows for the determination of temperature fields and cooling rates in the heat-affected zone (HAZ) of the welded joint. The simulation was performed using the ANSYS software package, which accounts for the temperature-dependent properties of steel. The key parameters of the welding thermal cycle obtained from the simulation are essential for predicting phase formation in the microstructure and ensuring the required mechanical properties of the welded joint. Directions for further experimental validation and model improvement are also proposed.

Keywords: multi-arc welding, thermal field, heat-affected zone, ANSYS modeling, cooling rate, steel microstructure

Введение. Многодуговая сварка под флюсом труб большого диаметра — сложный технологический процесс, требующий точной настройки парамет-

ров для получения высококачественных сварных соединений. Оптимизация параметров сварки, таких как сварочный ток, напряжение, длина дуги и расстояние между дугами, является одним из ключевых факторов, влияющих на качество шва. В данной работе представлена математическая модель [1], позволяющая прогнозировать температурные поля и скорости охлаждения металла в околошовной зоне (ОШЗ). Полученные результаты моделирования могут служить основой для разработки оптимальных параметров сварки и снижения вероятности образования дефектов.

Материалы и методы. Процесс сварки моделировался с использованием ANSYS Workbench [2]. Были использованы модули: Engineering Data — для задания температурно-зависимых теплофизических свойств стали 07ХГ2Б (К60) [3–4], рассчитанных с помощью программы JMatPro (плотность, теплопроводность, удельная теплоемкость) (рис. 1), Geometry — для задания геометрических размеров и форм фасок продольных кромок листа (рис. 2), Mechanical Model — для генерации сетки конечных элементов и привязки геометрии к теплофизическим свойствам, а также Transient Thermal Analysis — для моделирования теплового воздействия на изделие и теплоотдачи с изделия. Использование инструмента Element Birth and Death [5] позволило поэтапно моделировать процесс многодуговой сварки, при этом ввод тепла от каждой из пяти сварочных дуг соответствовал определенным временным шагам.

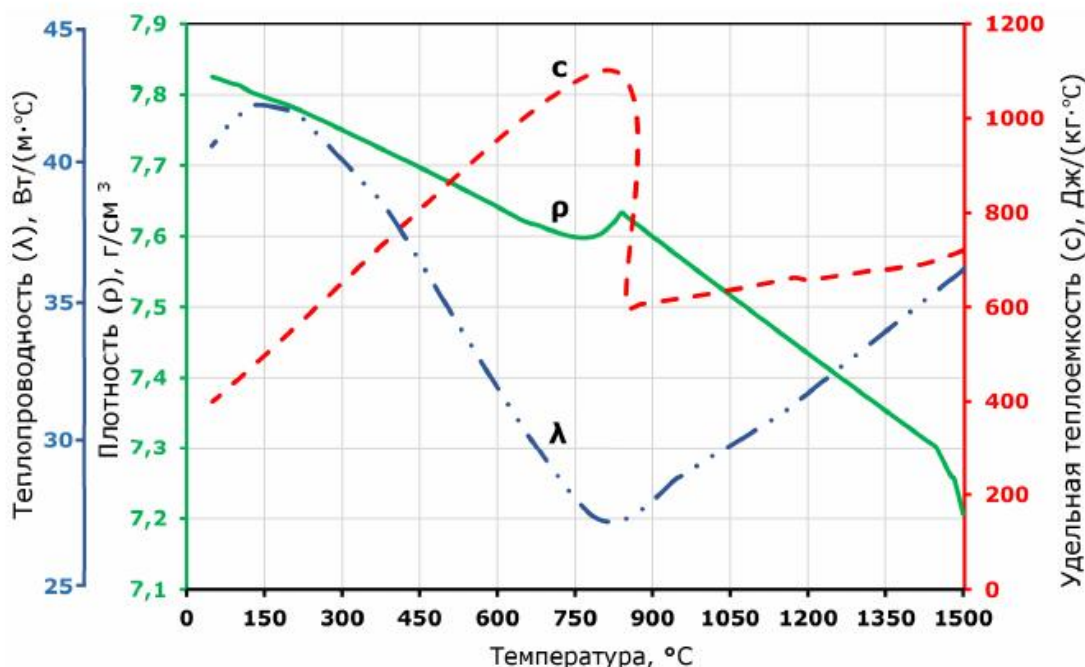


Рис. 1. График зависимости плотности, теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры для стали 07ХГ2Б

В процессе моделирования сварки наружного шва трубы учитывалось, что внутренний шов трубы был выполнен ранее. Это позволило корректно смоделировать тепловые процессы и их влияние на качество наружного шва.

Также в двумерной модели был учтен конвективный теплообмен с окружающей средой [6] и отсутствие теплоотдачи с поверхности шва и ОШЗ, поскольку в процессе сварки эти области покрыты сварочным флюсом, препятствующим отводу тепла. Кроме того, использовались данные предприятия АО «Выксунский Metallургический Завод» об установочных параметрах и режимах сварки швов труб, о геометрических размерах и форме фасок продольных кромок листа. Данные представлены в табл. 1.

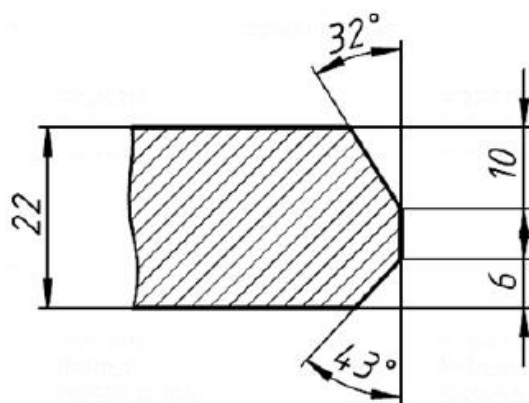


Рис. 2. Геометрические размеры и формы фасок продольных кромок листа

Таблица 1

**Установочные параметры электродов и режимы пятидуговой сварки
наружных швов труб (толщина стенки 22 мм)**

№ дуг и	I , А	P , Вт	P , Вт	q , Вт/мм ³	V , мм ³	$v_{св}$, м/ч	Расстояние между электродами, мм
1	1250	32	40000	1954,94	20,461	115	10
2	850	34	28900	1954,82	14,784		11
3	800	36	28800	1948,05	14,784		13
4	730	38	27740	1876,35	14,784		14
5	700	39	27300	1846,59	14,784		—
* I — сила тока; U — напряжение; P — мощность источника; q — погонная энергия сварки; V — расчетный объем металла, наплавляемого каждой из пяти дуг; $v_{св}$ — скорость сварки.							

Результаты и их обсуждение. Температурные поля. В результате численного моделирования были построены изотермы температуры плавления, изображенные на рис. 3, что обеспечило точное определение глубины и ширины проплавления, а также способствовало оценке ширины зоны термического влияния.

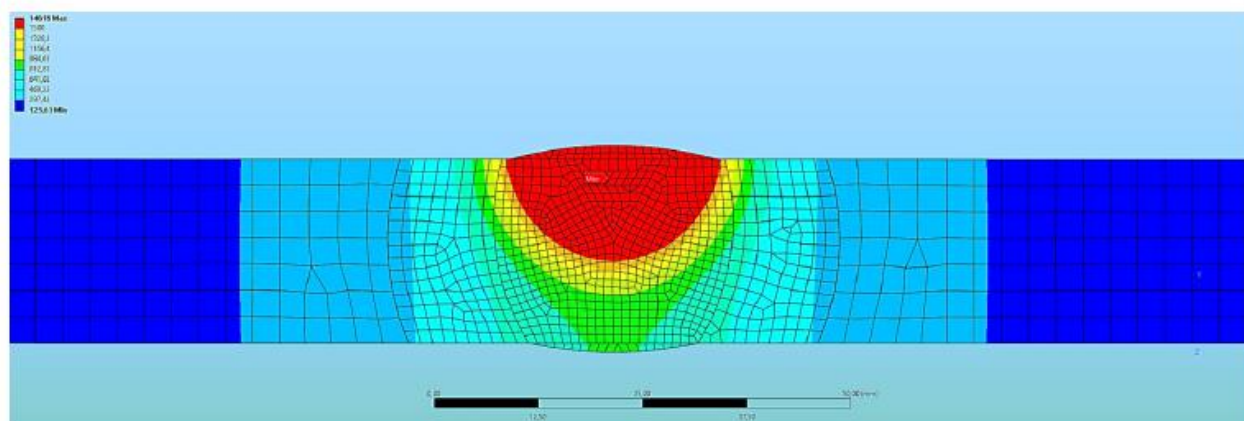


Рис. 3. Распределение температуры. Область проплавления изображена красным цветом

График сварочного термического цикла и его параметры. Сварочный термический цикл (СТЦ), построенный для точки ОШЗ, нагретой до температуры, приблизительно равной 1350 °С, демонстрирует ключевые параметры процесса, включая скорость охлаждения в интервале 800–500 °С. График представлен на рис. 4. Эти данные важны для прогнозирования микроструктуры металла в зоне сварки, особенно при выборе оптимальных условий для формирования нужных механических свойств сварного шва (табл. 2).

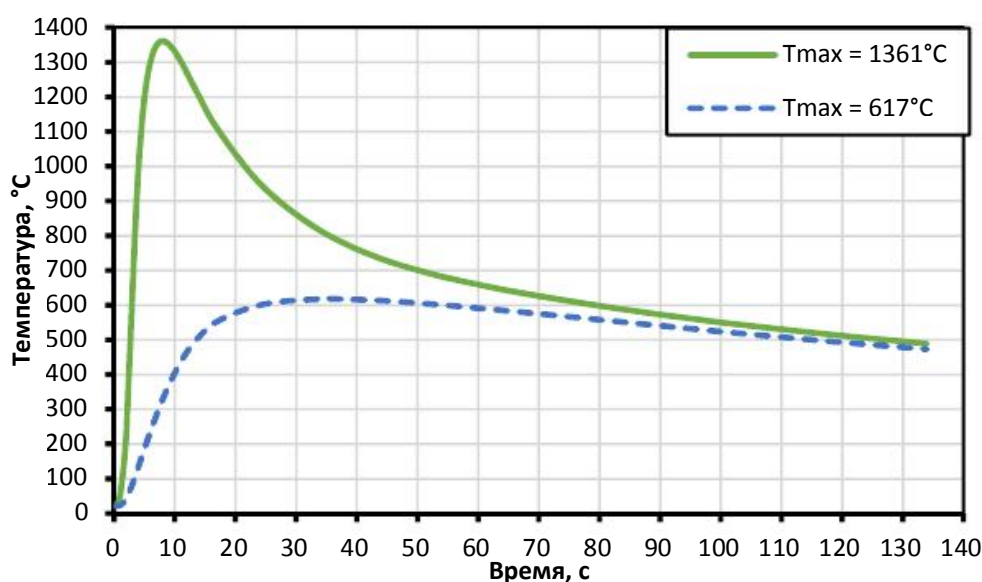


Рис. 4. Сварочный термический цикл для двух точек

Таблица 2

Параметры СТЦ точки ОШЗ

$T_{\max}$	$t_{>1000}, \text{с}$	$\omega_{6/5}, ^\circ\text{C}/\text{с}$	$t_{8/5}, \text{с}$	$\omega_{6/5}, ^\circ\text{C}/\text{с}$	$\omega_{8/5}, ^\circ\text{C}/\text{с}$
1361	16,8	44	87	2,27	3,45

Влияние скорости охлаждения. Высокая скорость охлаждения в интервале 800–500 °С, характерная для данной схемы сварки, способствовала с большой долей вероятности формированию бейнитно-ферритной структуры в ОШЗ. Это связано с тем, что при таких скоростях охлаждения не успевают развиваться диффузионные процессы, необходимые для образования крупнозернистой структуры [7].

Заключение. Разработана математическая модель тепловых процессов при многодуговой сварке продольного шва трубы большого диаметра, в результате чего были определены ключевые параметры сварочного термического цикла. Эти параметры могут быть использованы для прогнозирования механических свойств сварного соединения. Полученные результаты могут стать основой для дальнейших исследований, направленных на улучшение качества и увеличения долговечности сварных соединений труб большого диаметра. Однако для полноценной интеграции модели в производственные процессы требуется ее экспериментальная верификация.

Список источников

- [1] Куркин С.А., Ховов В.М. *Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 464 с.
- [2] Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. *Основы работы в ANSYS 17*. Москва, ДМК Пресс, 2017, 210 с.
- [3] Палаев А.Г., Носов В.В., Красников А.А. Моделирование распределения температурных полей и напряжений в сварном соединении с использованием ANSYS. *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*, 2022, № 5 (12), с. 461–469.
- [4] Судьин В.В., Степанов П.П., Кантор М.М. и др. Сопоставление влияния микроструктурных факторов на ударную вязкость околошовной зоны сварных труб класса прочности К60. *Сталь*, 2022, № 1, с. 44–50.
- [5] Кузнецов В.В., Водяков В.Н., Кузнецова О.М. Технология «рождения» и «смерти» конечных элементов ANSYS Inc. *Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: сб. тр.* Саранск, Изд-во Мордов. ун-та, 2013, с. 392–401.
- [6] Коновалов А.В., Куркин А.С., Макаров Э.Л., Неровный В.М., Якушин Б.Ф. *Теория сварочных процессов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 752 с.
- [7] Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. *Теория свариваемости сталей и сплавов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 487 с.