

Результаты исследования могут быть применены в практике при создании и модернизации сварочного производства.

Литература.

1. Гладков Э.А. Управление процессами и оборудованием при сварке : учеб. Пособие для студ. Высш. учеб. заведений / Э.А. Гладков. – М.: Издательский центр «Академия», 2006 – 432 с. ISBN 5-7695-2301-2. Браткова О.Н. Источники питания сварочной дуги: Учебное пособие для студ. Высш. учеб. заведений/ Браткова О.Н.-М.:Высшая школа, 1982-180с.
2. Клиначев Н.В. Моделирование систем в программе **VisSim** (<http://model.exponenta.ru>)

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

*Н.В. Павлов, ст. преподаватель, А.В. Крюков, к.т.н, доц., В.А. Полищук, студент
Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского
Томского политехнического университета
652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26*

Применение математических методов и математического моделирования позволяет оптимизировать условия протекания процесса образования сварного соединения, предотвратить появление недопустимых дефектов сварных швов, соединений, конструкций и одновременно повысить производительность сварочных операций[1].

Первые математические модели, относящиеся к области сварки и основывающиеся на фундаментальных законах физики, описывали состояние плазмы электрической дуги (степень ионизации дугового газа), или давления дуги как цилиндрического проводника в зависимости от величины протекающего через него тока [2].

Методы математического моделирования сварочных процессов получили интенсивное развитие после появления первых работ по расчету температурных полей, создаваемых в телах различной формы и размеров, создаваемых движущимися концентрированными и распределенными источниками тепла. В дальнейшем теория тепловых процессов при сварке была Н.Н. Рыкалинным значительно расширена, усовершенствована и доведена до широкого практического применения в большом количестве прикладных исследований.

В результате выполнения большого количества фундаментальных и прикладных исследований сформировался целый ряд направлений, связанных с математическим моделированием сварочных процессов.

Все моделируемые объекты и явления можно разделить по степени полноты информации о них [2]:

- объекты с нулевым уровнем информации; в этом случае объект представляют моделью типа «черный ящик» и его математическая модель строится путем статистических испытаний с обработкой результатов методами регрессионного, дисперсионного и корреляционного анализа с использованием многофакторного планирования эксперимента;
- объекты, о поведении которых имеются сведения эмпирического характера; в этом случае используют методы физического моделирования и планирования многофакторного эксперимента;
- объекты с известными основными детерминированными закономерностями, позволяющими использовать теоретические методы, а полученные аналитические или численные модели дополняются эмпирическими соотношениями с коэффициентами или параметрами, определяемыми из опыта;
- объекты с высокой степенью информации о происходящих в них процессах и явлениях; их модели строят методами математического моделирования с реализацией на ЭВМ с помощью вычислительного эксперимента.

По способу построения и реализации математические модели можно разделить на несколько групп: теоретические модели, получаемые на основе применения фундаментальных законов физики, и экспериментальные, получаемые в результате аппроксимации опытных данных различными методами (рисунок 1) [2].



Рис. 1. Классификация математических моделей по способу построения и реализации

Одно- и многофакторные модели различаются условиями проведения экспериментов: однофакторные модели получают путем варьирования одного фактора при фиксированных значениях остальных факторов; многофакторные регрессионные модели получают при использовании методов планирования многофакторных экспериментов, когда в каждом из серии опытов значения всех факторов изменяют по специальным оптимальным планам.

Теоретические модели являются, как правило, детерминированными и реализуются на современной вычислительной технике независимо от того, аналитическое или численное решение получено в результате решения системы уравнений и неравенств, описывающих исследуемую технологическую систему [2].

По другой классификации (степени локализации моделируемых явлений в сварной конструкции), математические модели можно разделить на шесть групп:

- 1) математические модели полей температур, напряжений и деформаций во всей свариваемой конструкции;
- 2) математические модели процессов в зоне термического влияния;
- 3) математические модели явлений и процессов, происходящих в жидком металле сварочной ванны;
- 4) математические модели магнитогидродинамических процессов в плазме сварочной дуги;
- 5) математические модели поведения капли электродного металла на торце электрода, переноса металла и процессов нагрева и расплавления электрода;
- 6) математические модели расчета химического состава и уровня выделения сварочного аэрозоля при дуговой сварке.

Рассмотрим более подробно установленную классификацию.

1. Математические модели распределения полей температур, напряжений и деформаций во всей свариваемой конструкции.

Математические модели и алгоритмы расчета распределения температурных полей на поверхности изделия являются наиболее распространенными. Авторами [3] предложены математические модели распределения температурных полей для процессов сварки и термической резки изделий, ограниченных кривыми линиями или поверхностями. Для упрощения расчетов был использован метод криволинейных координат.

В работе [4] предложена методика расчета максимальной температуры нагрева, времени пребывания металла выше заданной температуры, мгновенные скорости нагрева и охлаждения. Для определения всех указанных характеристик использовалось общее графоаналитическое решение на основе термического цикла нагрева металла в заданной точке.

В исследованиях [5] осуществлена корректировка известных уравнений по расчету температур, а также основных параметров термических циклов точек при автоматической сварке и наплавке с учетом влияния скрытой теплоты плавления, перенагрева основного металла в процессе плавления, перемещения расплавленного металла в хвостовую часть сварочной ванны под влиянием тока и скорости сварки.

В работе [6] представлена нестационарная математическая модель процесса сварки под флюсом, в которой учтены ее основные физические явления в гидростатической постановке. Формирование дуговой каверны определено по изотерме плавления флюса и разности плотностей порошкообразного и жидкого флюсов, а также учтены нагревание шлака излучением дуги и током, протекающим по нему.

2. Математические модели процессов в зоне термического влияния.

Математические модели, относящиеся к данной категории приведены в исследованиях по моделированию формирования структуры ЗТВ низколегированных сталей. На первоначальном этапе расчет осуществлялся на основе математических моделей температурного поля в сварном соединении и распада аустенита. В дальнейшей работе использовалось уравнение Колмогорова–Мела-Авраами [7, 8].

3. Математические модели явлений и процессов, происходящих в жидком металле сварочной ванны.

К данной группе относятся работы Фролова для процесса светолучевой сварки, оценивающие размеры ванны и формы шва [9].

Так же этим же автором разработана методика, позволяющая прогнозировать уровень пористости в высокотемпературной области при дуговой сварке алюминиевых сплавов с учетом исходного газосодержания и типа кинетической зависимости процесса газовыделения. Предложенная математическая модель учитывает реальный темп плавления и кристаллизации сплава и особенности распределения источника нагрева при сварке. Также была создана компьютерная программа, позволяющая численными методами рассчитывать геометрию сварного шва и прогнозировать дефекты (пористость) в высокотемпературной области шва [10].

Авторами [11] осуществлялся последовательный расчет типа и количества образующихся первичных карбидов, боридов и нитридов, упрочняющих фаз эвтектики и структурного состава матрицы сплава. Для расчетов применяли модернизированный метод последовательного определения содержания элементов. Так закон действующих масс выражали через активности и на каждом этапе уточняли термодинамические константы, массы всех фаз и возможные реакции.

В работе [12] разработана физическая и математическая модель кинетики взаимодействия металла и флюса при центробежной электрошлаковой наплавке. При разработке были учтены следующие положения: жидкий металл реагирует со шлаком на поверхности расплава и на поверхности раздела металлической и шлаковой ванн; состав ванны формируется за счет поступления металла от поверхности расплава металла и основного металла; состав шлаковой и металлической ванн остаются неизменным.

В работе [13] разработана методика прогнозирования фазового состава структуры низколегированных сталей при произвольном термическом цикле на основе решения системы дифференциальных алгебраических уравнений, описывающих кинетику полиморфных превращений.

В исследованиях [14] разработана теоретическая модель формирования швов при орбитальной сварке вольфрамовым электродом неповоротных стыков труб, основой является система управляющих воздействий, описываемая уравнениями теплопроводности равновесия давлений на поверхностях сварочной ванны.

Авторами [15] предложены эмпирические формулы, описывающие зависимость скорости плавления (подачи) сварочной проволоки от тока, температуры предварительного подогрева, диаметра и вылета электрода при сварке в углекислом газе током обратной полярности, а также зависимость эмпирических коэффициентов формулы от параметров процесса и раскрыто их физическое содержание.

В работе [16] предложена физико-математическая модель процесса электронно-лучевой сварки, учитывающая деформацию поверхности сварочной ванны и угловую апертуру электронного пучка. В качестве основного применяли метод конечных разностей.

В работе [17] предложена математическая модель формирования кратера, возникающего при завершении дуговой наплавки металла в результате обычной усадки. Модель позволяет рассчитывать формулу поверхности кратера по эволюции температурного поля во времени.

4. Математические модели магнитогазодинамических процессов в плазме сварочной дуги.

К данной группе относится работа [18] в которой осуществлялось численное моделирование процессов дуговой MIG-сварки позволяющее подобрать оптимальные параметры дуги. В ходе работы решение уравнений теплопереноса и деформации поверхности ванны производилось методом конечных разностей на равномерной ортогональной сетке.

Авторами же работы [19] на основе решения уравнений математической физики, описывающих взаимодействие основных физических явлений в электрической дуге, выполнено теоретическое исследование влияния длины дугового промежутка, тока дуги, формы заточки электродов, а также

поверхности сварочной ванны на распределение плотности тока, теплового потока и давления дуги при сварке в различных пространственных положениях. Для описания распределения теплового потока от дуги в металл и давления на его поверхность предложено использовать бимодальное распределение, позволяющее установить количественные соотношения и определить его параметры в зависимости от длины и тока дуги, а также геометрии поверхности неплавящегося электрода и разделки кромок свариваемого стыка.

5. Математические модели поведения капли электродного металла на торце электрода, переноса металла и процессов нагрева и расплавления электрода.

Работы [20] и [21] посвящены расчету температуры металла электродных капель (T_k) при дуговой сварке плавящимся электродом. В одном случае [20] расчет осуществлялся на основе решения задачи максимальной температуры нагрева металла в вылете электродной проволоки теплотой Джоуля-Ленца и скорости плавления электродной проволоки, а также предположения, что средняя температура металла электродной капли меньше температуры кипения.

В другом случае [21] использовался метод конечных элементов. В данной работе рассмотрено два случая теплопроводности через каплю расплавленного металла: 1) активное пятно сварочной дуги находится в нижней точке капли; 2) активное пятно охватывает всю свободную поверхность капли.

В работе [22] разработана математическая модель определения временных параметров процесса плавления электродной проволоки при ее импульсной подаче адекватно отражает влияние физических характеристик материала проволоки, свойств сварочной дуги и источника сварочного тока, формы импульса подачи на время образования капли заданного размера. Уравнение математической модели показывает, что на скорость образования капли электродного металла существенно влияет постоянная времени сварочной цепи, которая может служить элементом регулирования процесса каплеобразования.

6. Математические модели расчета химического состава и уровня выделения сварочного аэрозоля при дуговой сварке.

Данная группа математических моделей основана на следующих принципах: уровень выделения твердой составляющей сварочного аэрозоля определяется мощностью сварочной дуги, а химический состав – составом сварочного материала, парциальным давлением образующегося насыщенного пара и соотношением равновесного и неравновесного испарения при дуговом процессе [23].

Вывод.

В целом можно сделать вывод, что существующие в настоящий момент математические методы и модели в основном созданы для широко используемых и глубоко изученных способов сварки (ручная дуговая сварка, механизированная сварка и автоматизированная сварка под слоем флюса).

Литература.

1. Геловани, В.А. Компьютерное моделирование [Текст] / В.А. Геловани, В.В. Юрченко // Математическое моделирование. –1989. Т.1, –№1. –С. 3 – 12.
2. Березовский, Б.М. Математические модели дуговой сварки: в 7т. Том 1. Математическое моделирование и информационные технологии, модели сварочной ванны и формирования шва / Б.М. Березовский//. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 85с.
3. Бровман, М.Я. Особенности расчета температурных полей при сварке и термической резке [Текст] / М.Я. Бровман // Сварочное производство. –2001. –№7. –С. 10 – 14.
4. Попков, А.М. Методика определения скоростей нагрева и охлаждения металла при сварке и времени его пребывания выше заданной температуры [Текст] / А.М. Попков // Сварочное производство. –2004. –№6. –С. 3 – 5.
5. Донченко, Е.А. Расчет термических циклов точек при автоматической сварке и наплавке с учетом особенностей плавления основного металла [Текст] / Е.А. Донченко // Сварочное производство. – 2011. –№9. –С. 3 – 9.
6. Судник, В.А. Математическая модель процесса сварки под флюсом и явлений в дуговой каверне [Текст] / В.А. Судник, В.А. Ерофеев, А.В. Масленников, Д.В. Слезкин, Р.В. Цвелев // Сварочное производство. –2012. –№7. –С. 3 – 12.

7. Коробейников, С.Н. Исследование и моделирование формирования структуры ЗТВ низколегированных сталей [Текст] / С.Н. Коробейников, А.С. Бабкин // Сварочное производство. –2009. – №11. –С. 3 – 8.
8. Коробейников, С.Н. Алгоритм расчета оптимальных параметров режима сварки низколегированных сталей [Текст] / С.Н. Коробейников, А.С. Бабкин // Сварочное производство. –2009. –№12. – С. 13 – 16.
9. Фролов, В.А. Математическое моделирование процесса светолучевой сварки [Текст] / В.А. Фролов, Ю.В. Шорников, В.А. Судник, А.С. Рыбаков // Сварочное производство. –2001. –№3. –С. 7 – 10.
10. Фролов, В.А. Прогнозирование физико-химических процессов при дуговой сварке алюминиевых сплавов [Текст] / В.А. Фролов, Е.В. Никитина, А.В. Ельцов // Сварочное производство. –2002. – №7. –С. 20 – 24.
11. Королев, Н.В. Метод расчетного определения фазового состава и структуры износостойких наплавочных сплавов [Текст] / Н.В. Королев, О.В. Пименов // Сварочное производство. –2002. –№4. –С. 11 – 16.
12. Штенников, В.С. Физическая и математическая модели кинетики взаимодействия металла и флюса при центробежной шлаковой наплавке [Текст] / В.С. Штенников, В.Н. Бороненков, А.А. Штенникова // Сварочное производство. –2004. –№11. –С. 10 – 14.
13. Коновалов, А.В. Методика оптимизации технологии дуговой сварки на основе математической модели формирования показателей свариваемости низколегированных сталей [Текст] / А.В. Коновалов // Сварочное производство. –2005. –№4. –С. 9 – 14.
14. Полосков, С.И. Прогнозирование качества сварных соединений на основе физико-математической модели процесса орбитальной сварки [Текст] / С.И. Полосков, В.А. Ерофеев, А.В. Масленников // Сварочное производство. –2005. –№2. –С. 8 – 16.
15. Варуха, Е.Н. Расчет скорости плавления предварительно нагретого электрода при сварке в углекислом газе [Текст] / Е.Н. Варуха // Сварочное производство. –2012. –№2. –С. 3 – 8.
16. Щербаков, А.В. Физико-математическая модель исследования процессов теплопередачи при электронно-лучевой сварке изделий произвольной формы [Текст] / А.В. Щербаков, А.Л. Гончаров, М.А. Портнов // Сварочное производство. –2011. –№11. –С. 6 – 13.
17. Ельцов, В.В. Математическое моделирование процесса формирования усадочного кратера при наплавке [Текст] / В.В. Ельцов, В.П. Потехин, О.А. Дитенков // Сварочное производство. –2012. – №1. –С. 3 – 9.
18. Судник, В.А. Моделирование и численная имитация импульсно-дуговой сварке алюминиевых сплавов [Текст] / В.А. Судник, А.С. Рыбаков, С.В. Кураков, О.И. Зайцев, Р. Класс // Сварочное производство. –2002. –№3. –С. 9 – 15.
19. Полосков, С.И. Моделирование распределения теплового потока и давления дуги в процессе орбитальной TIG-сварки [Текст] / С.И. Полосков, В.А. Ерофеев, А.В. Масленников // Сварочное производство. –2005. –№8. –С. 10 – 15.
20. Полосков, С.И. Определение оптимальных параметров автоматической орбитальной сварки на основе компьютерного моделирования [Текст] / С.И. Полосков, В.А. Ерофеев, А.В. Масленников // Сварочное производство. –2005. –№10. –С. 6 – 13.
21. Черных, А.В. Расчет температуры электродных капель при дуговой сварке плавящимся электродом с помощью метода конечных элементов [Текст] / А.В. Черных, В.В. Черных // Сварочное производство. –2008. –№3. –С. 6 – 7.
22. Лебедев, В.А. Определение параметров импульсной подачи электродной проволоки при механизированной дуговой сварке и наплавке [Текст] / В.А. Лебедев // Сварочное производство. –2008. – №8. –С. 11 – 15.
23. Левченко, О.Г. Математическое моделирование химического состава и уровня выделения сварочного аэрозоля при дуговой сварке [Текст] / О.Г. Левченко // Сварочное производство. –2001. –№7. –С. 46 – 50.