

А.М. Рыбачук

Математическое моделирование физических процессов в дуге и сварочной ванне

Учебное пособие



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана

2022

УДК 621.791.053
ББК 34.641
Р93

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://bmstu.press/catalog/item/7353>

Факультет «Машиностроительные технологии»
Кафедра «Технологии сварки и диагностики»

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия*

Рыбачук, А. М.

Р93 Математическое моделирование физических процессов в дуге и сварочной ванне : учебное пособие / А. М. Рыбачук. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. — 77, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-5752-6

Содержится математическое описание некоторых процессов, протекающих в дуге и сварочной ванне. Показано влияние параметров режима сварки на тепловые и силовые характеристики дуги и на электрическое поле в изделии и сварочной ванне.

Для студентов, обучающихся по специальности 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов» специализации 15.05.01_07 «Проектирование технологических комплексов в сварочном производстве», аспирантов, обучающихся по направлению подготовки 15.06.01 «Машиностроение» направленности 15.06.01_17 «Сварка, родственные процессы и технологии».

УДК 621.791.053
ББК 34.641



*Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте:
info@bmstu.press*

ISBN 978-5-7038-5752-6

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

Предисловие

Моделирование — основной метод научных исследований. Для выяснения сущности исследуемых процессов используют различные виды моделирования. Математические модели закрепляют уровень знаний в соответствующей области технологий и являются основой для исследований технологических процессов с помощью современных средств вычислительной техники.

Математическое моделирование позволяет оценить предельные возможности процесса, перспективы и эффективность использования предполагаемого способа, не прибегая к длительному дорогостоящему эксперименту.

Дуговыми способами сварки выполняют наибольший объем сварных изделий. Настоящее пособие поможет студентам и аспирантам анализировать современный уровень знаний, устанавливать актуальность изучаемой проблемы, формулировать цель и задачи разработки и исследований технологических процессов дуговой сварки.

Учебное пособие подготовлено в соответствии с программами дисциплин «Математическое моделирование дуги и сварочной ванны» направления подготовки 15.06.01 «Машиностроение» направленности 15.06.01_17 «Сварка, родственные процессы и технологии» и «Основы научных исследований» специальности 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов» специализации 15.05.01_07 «Проектирование технологических комплексов в сварочном производстве». В пособии приведены определение моделирования и основные виды моделирования, рассмотрены основные уравнения, описывающие физические процессы, протекающие в дуге и сварочной ванне. Также содержится математическое описание некоторых изучаемых процессов. Показано влияние параметров режима на тепловые и силовые характеристики дуги и на электрическое поле в изделии и сварочной ванне. Рассмотрена связь между тепловым и электрическим полями при дуговой сварке. Представлен пример расчета распределения сварочного тока в изделии и сварочной ванне.

Цель пособия — подготовить обучающихся к математическому моделированию физических процессов, протекающих в дуге и сварочной ванне, для повышения качества сварных изделий.

В результате освоения материала пособия студенты смогут:

- моделировать физические процессы, протекающие в дуге и сварочной ванне;
- применять расчетные методы проектирования технологических процессов сварки;

- грамотно и физически обоснованно выбирать параметры технологического процесса дуговой сварки;
- формулировать краевые условия при подготовке расчетной задачи для конкретного физического процесса в дуге и сварочной ванне;
- обосновывать и выдвигать предложения по совершенствованию известных способов соединения и внедрению новой прогрессивной технологии в производство.

Изложен материал, ориентированный на студентов старших курсов и аспирантов, выполняющих научно-исследовательские работы, курсовое проектирование и выпускные квалификационные работы. Этот материал будет полезен также при решении практических примеров на лекциях и семинарских занятиях.

Содержание пособия соответствует требованиям, предъявляемым СТО МГТУ 1.4.01–2017 к учебным пособиям.

Основные обозначения

a	— коэффициент температуропроводности
B	— индукция магнитного поля
Bi	— критерий Био
b	— коэффициент теплоотдачи
c_ε	— электрическая емкость
c_p	— изобарная теплоемкость
D	— индукция электрического поля
D_c	— диаметр силового пятна дуги
E	— напряженность электрического поля
$f_{эм}$	— напряженность поля электромагнитных сил
g	— ускорение свободного падения
H	— напряженность магнитного поля
I_d	— полный ток дуги
j	— плотность тока
j_0	— плотность тока в центре дуги
j_k	— плотность тока в катодном пятне дуги
$K_0(u)$	— функция Бесселя от мнимого аргумента второго рода нулевого порядка
$K_1(u)$	— функция Бесселя от мнимого аргумента второго рода первого порядка
k	— постоянная Больцмана
k_c	— коэффициент сосредоточенности (контрагирования) дуги
k_t	— коэффициент сосредоточенности теплового потока дуги
k_ε	— коэффициент сосредоточенности электрического тока дуги
L_d	— длина дуги
p	— давление дуги в произвольной точке
p_0	— давление на оси дуги
q	— удельный тепловой поток
q_0	— наибольший удельный тепловой поток в центре пятна нагрева
q_n	— эффективная тепловая мощность нагрева изделия дугой
r	— электрическое сопротивление
S	— вспомогательная тепловая функция
S_0	— значение тепловой функции на оси дуги
T	— температура
$T_{кип}$	— температура кипения
t	— время
U	— потенциал электрического поля
v	— скорость движения плазмы, жидкости, газа

$v\nabla$	— скалярный дифференциальный оператор
$W(T)$	— энергия, теряемая элементом объема излучением
γ_1	— первый корень функции Бесселя первого рода первого порядка $\gamma_1 = 2,405$
∇	— дифференциальный оператор первого рода, или оператор Гамильтона, или оператор набла
δ	— толщина пластины
Δ	— дифференциальный оператор второго рода, или Лапласа
ε	— диэлектрическая проницаемость
$\eta_{\text{и}}$	— эффективный КПД дуги
λ	— коэффициент теплопроводности
μ	— абсолютная магнитная проницаемость
$\mu_{\text{отн}}$	— относительная магнитная проницаемость
μ_0	— магнитная постоянная
ν	— кинематическая вязкость жидкости
ρ	— плотность плазмы, жидкости, газа
ρ_s	— удельное электрическое сопротивление
σ	— удельная электропроводимость
Φ	— магнитный поток
Ω	— объем

Введение

Во время выполнения технологических сварочных задач, разработки современного сварочного оборудования, автоматизации сварочных процессов, исследования формирования сварного соединения, расчетной оценки напряженно-деформированного состояния сварных соединений, оценки свариваемости при использовании новых материалов, определения норм допустимости дефектов в различных сварных конструкциях при разных условиях нагружения, а также при решении экономических задач требуется обоснованно находить оптимальные пути.

Наряду с экспериментальными расчетные методы дают возможность сократить сроки проектирования, сэкономить свариваемые и вспомогательные материалы. Расчетные методы базируются на математическом моделировании сварочных процессов на ЭВМ. Разработка и использование математических моделей, адекватно описывающих процессы при сварке, относятся к числу основных задач математического моделирования.

Движение плазмы в дуге и жидкого металла в сварочной ванне описывается уравнениями магнитной гидродинамики, так как в дуге и в ванне течет проводящая жидкость в магнитном поле.

Технологические процессы сварки характеризуются одновременным протеканием электрических, тепловых, диффузионных, газодинамических, магнитогидродинамических и деформационных взаимосвязанных явлений. Процессы при сварке происходят в неоднородной среде, характеризуются нелинейностью явлений и часто нестационарны. Поэтому математическое описание явлений при сварке получается достаточно сложным для решения.

Бурный рост достижений в компьютерной технике и микроэлектронике позволяет быстро выполнять сложные задачи моделирования процессов при сварке и использовать результаты решения в сварочных технологиях для получения требуемых качественных показателей сварного соединения.

Дуговая сварка — один из наиболее широко применяемых сварочных технологических процессов. Данное пособие, содержащее математическое описание некоторых процессов, протекающих в дуге и сварочной ванне, поможет использовать имеющиеся математические модели и разрабатывать новые.

Оглавление

Предисловие.....	3
Основные обозначения	5
Введение	7
1. Электрическая сварочная дуга. Математическая модель.....	8
1.1. Моделирование. Основные понятия	8
1.2. Уравнение энергии.....	10
1.3. Уравнение движения	13
1.4. Уравнение неразрывности	15
1.5. Уравнения электродинамики	17
1.6. Уравнения состояния	19
1.7. Граничные условия.....	19
Контрольные вопросы и задания	20
2. Силовое воздействие дуги	22
2.1. Собственное магнитное поле дуги	22
2.2. Радиальные электромагнитные силы в дуге	24
2.3. Давление конусной дуги на электрод и сварочную ванну	28
2.4. Осевая составляющая электромагнитных сил при сварке электродом с полостью	32
2.5. Расход газа, захваченного в дугу	34
2.6. Статическая и динамическая составляющие полного давления дуги	35
2.7. Влияние параметров режима сварки на давление дуги	36
2.8. Распределение давления дуги.....	38
2.9. Параметры дуги при нормальном распределении давления.....	39
2.10. Влияние коэффициента сосредоточенности дуги на процесс сварки и качество шва	40
2.11. Распределение температуры в дуге	40
2.12. Расчет параметров электрической дуги при сварке с неплавящимся электродом	41
Контрольные вопросы и задания	47

3. Распределение сварочного тока в изделии и ванне.....	48
3.1. Деформация электрического поля при дуговой сварке.....	49
3.2. Моделирование распределения тока по пластине при дуговой сварке	51
3.3. Подобие электрического и температурного полей при дуговой сварке	54
3.4. Связь между температурным и электрическим полями при дуговой сварке	55
3.5. Электрическое поле в изделии при дуговой сварке.....	60
3.6. Электрическое поле в изделии при дуговой сварке конусной осесимметричной дугой	63
3.7. Электрическое поле в изделии при дуговой сварке эллипсной дугой.....	67
Контрольные вопросы и задания	73
Литература.....	75