

Научная статья

УДК 621.791:681.5.01:669.17

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28104>

Ю.А. Соколов ✉

ПАО "Электромеханика", г. Ржев, Тверская область, Россия

✉ s5577@inbox.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ СИСТЕМА АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ В КОНТРОЛИРУЕМОЙ АТМОСФЕРЕ

Аннотация. Показана возможность создания современной системы управления, связывающей в единое информационное пространство промышленный компьютер, устройство ЧПУ, программируемый контроллер, цифровые и аналоговые средства измерения, что обеспечивает получение сварного соединения с заданной структурой и свойствами. Предложен принцип для создания единой цифровой платформы, объединяющей области проектирования и численных расчётов на основе объектно-ориентированного подхода, обеспечивающего поддержку системно-инженерных процессов, начиная с концептуального дизайна и до поздних стадий жизненного цикла системы. Интеграция технологических, проектных, расчетных и эксплуатационных процессов на базе CASE-технологии позволяет максимально автоматизировать процесс разработки, обеспечивает отсутствие ошибок и простоту в обслуживании программных продуктов. Микропроцессорные устройства и локальные вычислительные сети предоставляют возможность создания целостных технологических систем обработки данных.

Ключевые слова: сварка, автоматизация производства, объектно-ориентированный подход, структура сплавов, свойства сплавов.

Для цитирования:

Соколов Ю.А. Автоматизированная производственная система аргонодуговой сварки в контролируемой атмосфере // *Материаловедение. Энергетика.* 2022. Т. 28, № 1. С. 43–66. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28104>

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Scientific article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28104>

Y.A. Sokolov ✉

Public Joint Stock Company "Electromekhanika",
Rzhev city, Tver region, Russia

✉ s5577@inbox.ru

AUTOMATED PRODUCTION SYSTEM OF ARGON ARC WELDING IN A CONTROLLED ATMOSPHERE

Abstract. The paper shows the possibility of creating a modern control system linking an industrial computer, a CNC device, a programmable controller, digital and analog measuring instruments into a single information space, which ensures the production of a welded joint with a required structure and properties. A principle is proposed for creating a single digital platform combining the fields of design and numerical calculations based on an object-oriented approach that provides support for system engineering processes, starting with conceptual design and up to the later stages of the system lifecycle. Integration of technological, design, calculation and operational processes based on CASE technology allows you to automate the development process as much as possible ensuring the absence of errors and ease of software products maintenance. Microprocessor devices and local area networks provide an opportunity to create integrated technological data processing systems.

Keywords: welding, production automation, object-oriented approach, structure of alloys, properties of materials.

Citation:

Y.A. Sokolov, Automated production system of argon arc welding in a controlled atmosphere, Materials Science. Power Engineering, 28 (01) (2022) 43–66, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28104>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Изменение подхода к организации производства в рамках таких концепций как Industry 4.0, Smart Manufacturing, Manufacturing Cloud, Society 5.0 заключается в интеграции производственных и информационных технологий; создании информационной модели ПС, прогнозирующей поведение реального объекта с высокой степенью точности на всех этапах жизненного цикла, включая этап эксплуатации [1–2].

Одним из ведущих технологических процессов обработки металлов и сплавов является сварка. Сварка применяется при производстве судов, турбин, котлов, самолетов, мостов, реакторов и других необходимых современных объектов различного назначения является [3–6]. Для обеспечения качества и, соответственно, высокой работоспособности сварных соединений необходим отлаженный и хорошо контролируемый производственный процесс. Сварочное производство, включающее систему технологической подготовки, совокупность основного и вспомогательного оборудования, технологический процесс (ТП), конечный продукт, можно рассматривать как сложную иерархическую производственную систему (ПС). К ее характерным особенностям относятся: многокритериальность оценок процессов, различная природа информационных связей между подсистемами и элементами; многообразие различных форм связей.

Теория иерархических систем облегчает раскрытие внутренних закономерностей сложной системы, позволяет выявить различные способы её декомпозиции в виде иерархий абстрагирования [7–8]. Для каждого уровня абстрагирования (страты) характерны сосредоточение внимания на специфических аспектах производства (технологическом, техническом, алгоритмическом, информационном, измерительном, организационном), оригинальный язык, семейство моделей, законы и принципы, позволяющих детально раскрыть взаимодействие элементов производственной системы в пределах и вне страты.

Целью настоящей работы является создание иерархической абстракции, состоящей из технологической, инструментальной, измерительной, информационной, алгоритмической, системной страт и позволяющей раскрыть содержание производственной системы сварки.

Методология стратифицированного описания сварочного процесса

Стратифицированное описание производственной системы аргодуговой сварки (АДС), включающее семейство моделей на каждом абстрактном уровне (системном, алгоритмическом, информационном, измерительном, инструментальном и технологическом), представлено на рис. 1.

Технологическая страта

В процессе АДС происходит взаимодействие гидродинамического, температурного, электромагнитного поля, поля упругих напряжений. Формирование сварочной ванны осуществляется за счёт тепла, которое выделяется в электрической дуге между неплавящимся вольфрамовым электродом и изделием. В начальный момент времени для преодоления поверхностного потенциального барьера к электроду и изделию подводится импульс высокого напряжения от осциллятора, что приводит к эмиссии электронов с вольфрамового катода, ионизации атомов инертного газа, образованию плазмы и возникновению дуги. При прохождении тока по вольфрамовому электроду он нагревается до высокой температуры, обеспечивая в дальнейшем термоэлектронную эмиссию. Скорость электронов определяется по формуле [9]:

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}},$$

где m – масса электрона ($9,1 \cdot 10^{-28}$ г); v – скорость электрона, км/с; e – заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг); U – разность потенциалов на участке пути, пройденном электроном, В.

Электроны со скоростью v перемещаются от катода, ионизируют газ, создавая электрическую дугу, состоящую из электронов, положительных и отрицательных ионов, нейтральных атомов. Электрическая дуга имеет несколько областей: катодный электронный слой, плазменный шнур, анодный электронный слой. Устойчивость электрической дуги зависит от количества ионизированных элементарных частиц в её столбе.

Взаимодействие электрической дуги с изделием приводит к формированию сварочной ванны, состояние металла в которой определяется совокупностью физических процессов (рис. 2), протекающих на различных пространственных и временных масштабах. Глубина проплавления и форма сварочной ванны определяются концентрацией вводимой в область сварки энергией. Кристаллизация материала протекает в условиях больших градиентов температуры, напряжений и деформаций.

Потери тепла на поверхности материала определяются конвективным, радиационным и кондуктивным теплообменом, а также испарением металла с поверхности расплава при высокой интенсивности теплового источника. В материале изделия наблюдаются три характерные области. В первой области имеет место плавление и затвердевание металла. Вторая область

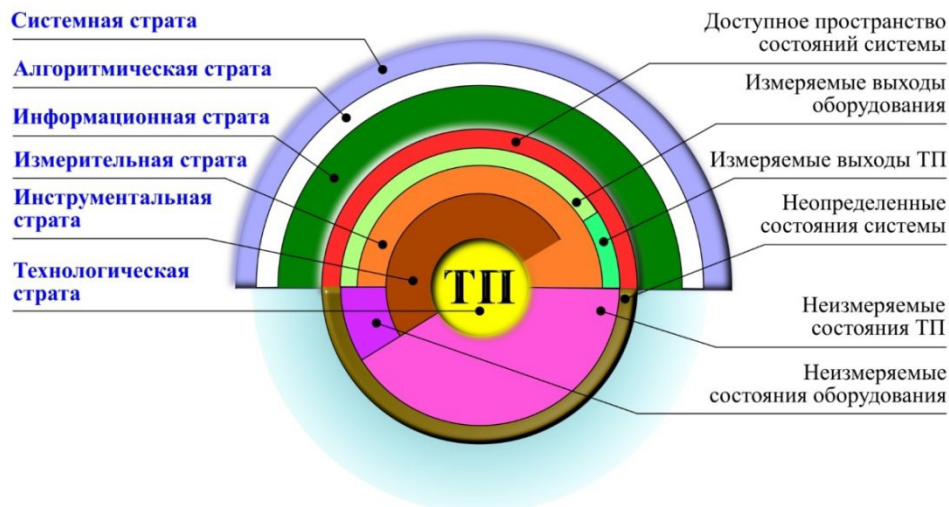


Рис. 1. Стратифицированное представление производственной системы
 Fig. 1. Stratified representation of the production system

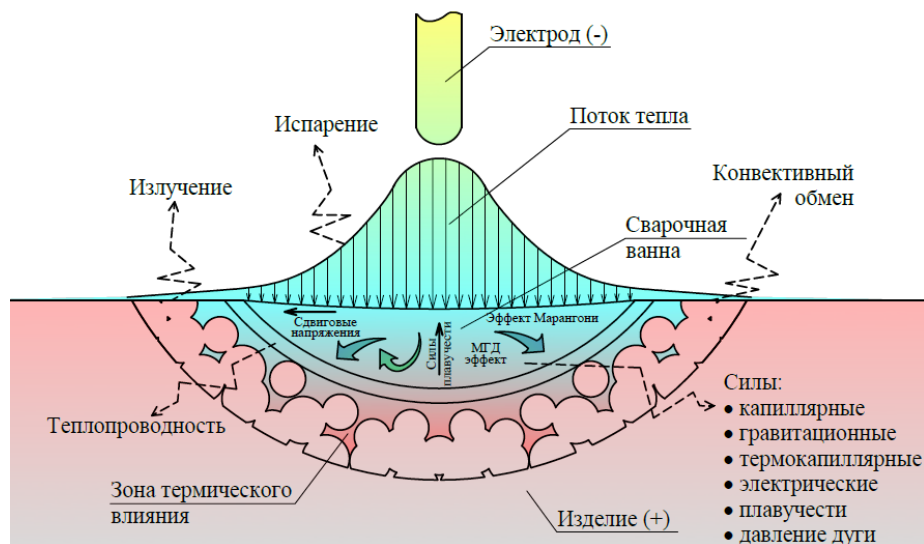


Рис. 2. Физические процессы, происходящие при сварке
 Fig. 2. Physical processes occurring during welding

характеризуется тем, что она подвержена действию источника тепла, но материал остается в твердом состоянии. В ней наблюдается рост зерен, рекристаллизация. В третьей области, представляющей собой основной металл, сохраняется исходная микроструктура материала. Также имеет место промежуточная узкая зона, в которой металл является частично проплавленным (температура изменяется в интервале между температурой солидуса и температурой ликвидуса). Для описания процессов в этой области применяется теория переноса в пористых средах [10]. Состояние металла в ванне расплава определяется силами плавучести, электромагнитными силами, силами поверхностного натяжения, давлением дуги. Конвективный теплообмен и течение металла в зоне расплава оказывают влияние на состояние материала в первой и второй областях, а также размер этих областей и их форму [11]. Неравномерное распределение температуры в сварочной ванне и градиент температуры между осью и периферийной областью

приводят к возникновению естественной конвекции. На форму сварочной ванны оказывает влияние давление дуги [12–15].

Плотность металла уменьшается с увеличением температуры. Поскольку источники тепла сосредоточены в центре поверхности сварочной ванны, в центре сварочной ванны температура жидкого металла выше, чем по краям. Гравитация вызывает движение более тяжелой жидкости с краев ванны вглубь ванны, следовательно, жидкий металл тонет вдоль границ ванны и поднимается вдоль оси ванны. Скрытая теплота выделяется или поглощается, когда материал претерпевает фазовые изменения.

Линии тока концентрируются вблизи центра сварочной ванны (анодного пятна) и направлены от катода к изделию. Жидкий металл проталкивается вниз по центру ванны и поднимается вдоль краев сварочной ванны, образуя вихрь, направленный против часовой стрелки. Чем меньше размер анодного пятна, тем плотнее линии тока, и, следовательно, тем больше сила Лоренца, действующая вниз на жидкий металл. Напряжение сдвига вызвано градиентом поверхностного натяжения в отсутствие поверхностно-активного вещества. Жидкий металл с более низким поверхностным натяжением движется в радиальном направлении от центра сварочной ванны к краям с более высоким поверхностным натяжением. Внешнее напряжение сдвига индуцируется на поверхности ванны градиентом поверхностного натяжения.

Управление процессом сварки характеризуется совокупностью параметров, которые условно можно разделить на три группы (рис. 3) [16]:

1. энергетические, определяющие вклад энергии в процесс образования сварного соединения, ток и напряжение дуги, температурное поле $T(x, y, z, t)$;
2. кинематические, характеризующие пространственное перемещение или положение сварочной головки относительно изделия (скорость сварки, скорость подачи присадочной проволоки, амплитуда и частота вибраций электрода относительно стыка);
3. технологические, определяющие условия формирования и кристаллизации сварного шва (диаметр электрода, форма и размеры разделки, зазор между свариваемыми изделиями, положение шва в пространстве и др.).

Энергетические и кинематические параметры главным образом определяются выбранным процессом сварки и физическими свойствами материала. Качество сварного соединения в значительной степени определяется технологическими параметрами процесса АДС:

- задержка на включение перемещения электрода,
- режим подачи присадочной проволоки (непрерывный, импульсный),
- задержка на включение присадочной проволоки,
- задержка на включение колебаний электрода,
- ток дуги,
- напряжение дуги,
- режим работы источника питания (непрерывный, импульсный, постоянный, переменный),
- ток паузы,
- ток импульса,
- время нарастания импульса,
- время спада импульса,
- время паузы,
- время импульса,
- скорость сварки,
- скорость подачи присадочной проволоки,
- диаметр присадочной проволоки,
- амплитуда колебаний электрода,
- период колебаний электрода.

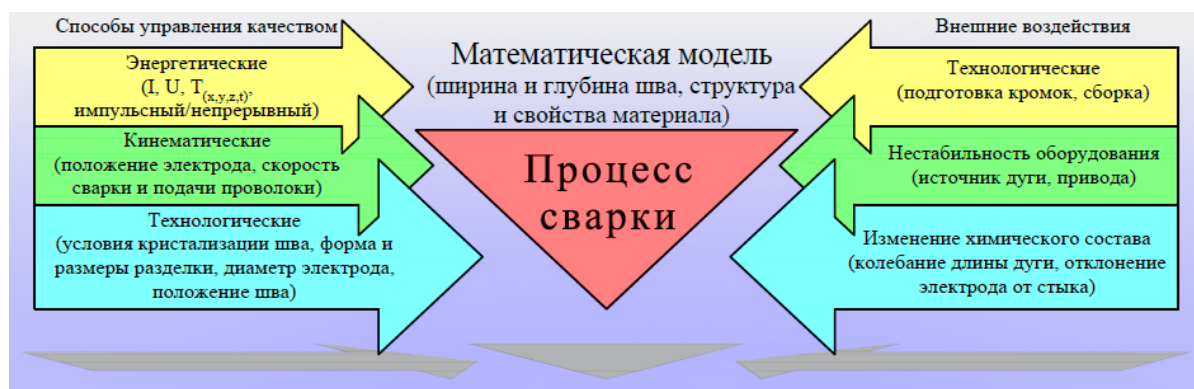


Рис. 3. Способы управления качеством сварного соединения

Fig. 3. Ways to manage the quality of the welded joint

Выбор способа управления определяется типом сварного соединения, формой разделки, пространственным положением шва и особенностями технологии сварки. К параметрам нестационарных (импульсных) процессов относятся амплитуда колебаний горелки, скорость колебаний, время задержки горелки вдоль и поперек стыка, шаг перемещения горелки, шаг (импульс) и скорость подачи присадочной проволоки.

Инструментальная страта

На инструментальной страте рассматривается техническое обеспечение для выполнения технологического процесса АДС в контролируемой атмосфере. Элементами подсистемы, соответствующей инструментальной страте, являются единицы специализированного оборудования для реализации АДС в контролируемой атмосфере. На этом этапе определяются наиболее существенные технологические параметры сварки и состав технических средств, взаимодействия между ними.

Проектирование установки для реализации технологии АДС в контролируемой атмосфере, как правило, осуществляется при помощи специальных инструментов: пакетов автоматизированного проектирования и инженерных расчётов, объектно-ориентированных языков моделирования. Объектно-ориентированный подход к проектированию подразумевает рассмотрение установки в виде совокупности объектов, взаимодействующих друг с другом и подчиненных общей цели функционирования. Выделяя совокупность объектов и отношений между ними, можно построить объектную модель установки и на её основе разработать программные средства.

Одним из инструментов для проектирования сварочного оборудования является унифицированный язык моделирования UML (Unified Modelling Language), разработанный на базе методов Буча, Якобсона (Object-Oriented Software Engineering, OOSE) и Рамбо (Object Modeling Technique, OMT). UML, словарь и правила которого сосредоточены на концептуальном и физическом представлении системы, включает в себя средства для визуализации моделей, конструирования, документирования артефактов программных систем [17–18].

Средства UML позволяют построить множество диаграмм для концентрации внимания на различных аспектах сварочного оборудования. К основным способам использования UML для моделирования относятся: разработка диаграмм (графическое представление информации о моделируемой системе), обмен информацией (взаимопонимание всех специалистов, участвующих в проекте), спецификация систем (построение адекватных моделей с учётом специфических особенностей системы), генерация кода (формирование кода на языке программирования из модели), имитационное моделирование (построение моделей для получения информации об исследуемом объекте методом вычислительных экспериментов), верификация модели (проверка адекватности моделей, степени их соответствия исследуемому оригиналу) [19].

Для описания технологии АДС в контролируемой атмосфере, оборудования и управления технологическим процессом с различных точек зрения обычно используют три основных типа моделей: классов, состояний и взаимодействий.

Модель классов описывает группу объектов с одинаковыми атрибутами, операциями, типами отношений и семантикой. Некоторые объекты существуют в реальном мире (исходные материалы, оборудование, изделие и др.), другие являются сугубо концептуальными сущностями (алгоритмы, методики оптимизации и пр.). Модель классов описывает объекты, входящие в состав ПС, и отношения между ними, модель состояний – изменяющиеся со временем аспекты объектов, модель взаимодействий – взаимодействия между объектами [20]. Диаграмма классов, основной способ описания структуры установки, показывает набор классов, интерфейсов и коопераций, а также их связи. Основными формами для выражения самых важных частей семантики классов являются имя, атрибуты, операции и обязанности. Модель классов создает контекст для моделей состояний и взаимодействий.

Модель состояний описывает состояния, в которых может находиться объект, свойства объекта и действующие на них ограничения, а также события, вызывающие переход объекта из одного состояния в другое. Для их описания достаточно списка операций [20]. Сначала выявляются классы, которые могут находиться в разных состояниях, и производится запись состояния для каждого класса. Затем необходимо определить события, вызывающие переход каждого объекта из одного состояния в другое. Зная состояния и события, можно построить диаграмму состояний для каждого из объектов.

Например, класс «технологический процесс» может находиться в разных состояниях, для описания которых необходим список операций и переходов. Процесс АДС включает в себя выполнение следующих технологических операций и переходов: получение предварительного разрежения в рабочей камере, создание контролируемой инертной среды в рабочей камере, установка электрода на стык, зажигание дуги, взаимосвязанное перемещение электрода и изделия, включение режима слежения за длиной дуги, подача присадочной проволоки в соответствии с заданным контуром, включение механизма колебаний электрода (при многопроходной сварке с разделкой кромок), заварка кратера, напуск атмосферы и др. (рис. 4).

Модель взаимодействия описывает взаимодействие между объектами, т.е. кооперацию объектов, для обеспечения необходимого поведения системы как целого. Построение модели взаимодействия начинается с выбора варианта использования, который затем уточняется на диаграммах последовательности и диаграммах деятельности. Процесс АДС состоит из отдельных, но взаимосвязанных определенной последовательностью элементов, используя которые можно спроектировать специализированное оборудование различной сложности (рис. 5).

Диаграммы последовательностей показывает временную последовательность взаимодействия объектов, диаграммы деятельности – иллюстрируют поток управления между последовательными этапами вычислений. Модели взаимодействия строятся в несколько стадий: определение границы системы; выделение действующих лиц, вариантов использования, начальных и конечных событий; подготовка типовых сценариев; описание внештатных ситуаций, выделение внешних событий, построение диаграмм деятельности, структурирование действующих лиц и вариантов использования; проверка по модели классов предметной области [20].

Каждая из трёх моделей описывает свои особенности специализированной установки. Основной моделью является модель классов, описывающая систему объектов, которыми оперируют модели состояний и взаимодействий.

Диаграммы состояний и последовательностей позволяют сформировать таблицу соответствия между технологическими операциями/переходами и техническими средствами для реализации технологии АДС в контролируемой атмосфере (табл. 1). В результате составляется список узлов, необходимый для создания установки: рабочая камера; станочный комплекс (манипулятор сва-

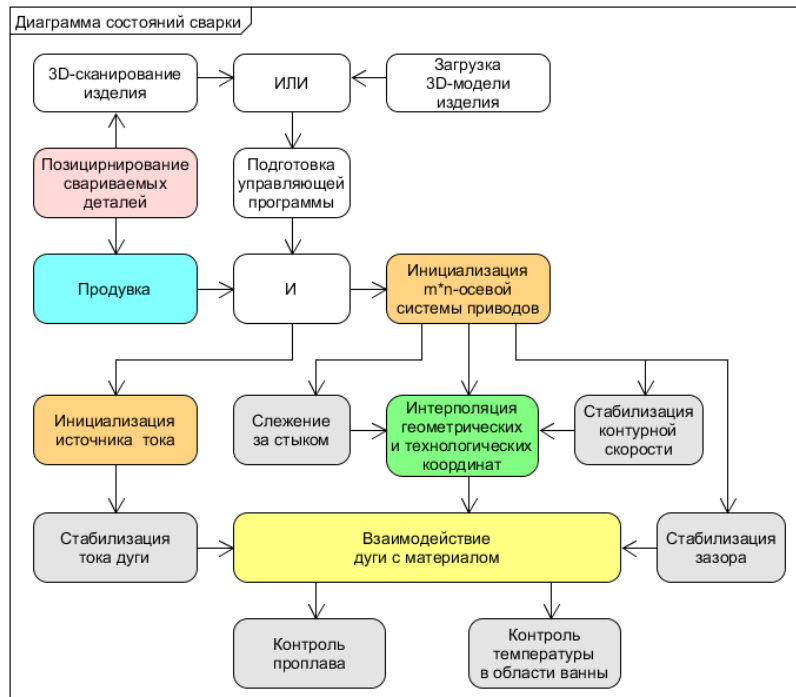


Рис. 4. Диаграмма состояний подготовки и проведения процесса аргодуговой сварки
 Fig. 4. Diagram of the states of preparation and conduct of the argon arc welding process

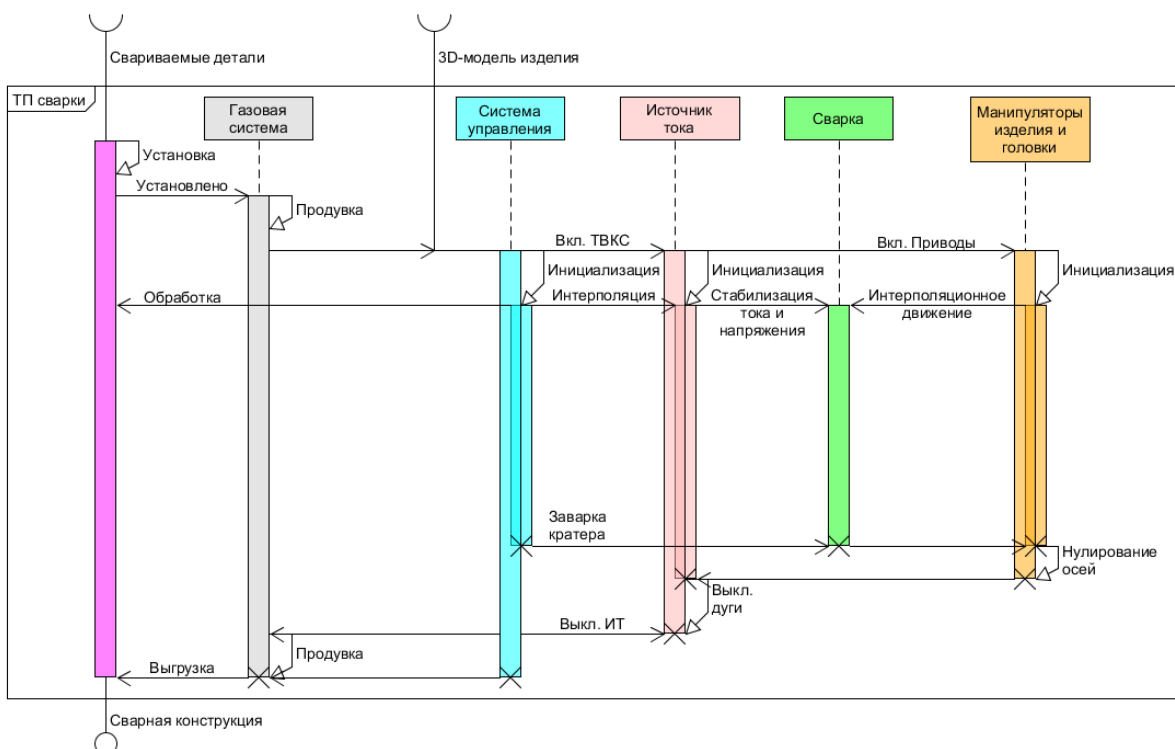


Рис. 5. Диаграмма последовательности аргодуговой сварки (ИТ – источник тока)
 Fig. 5. Argon arc welding sequence diagram (IT current source)

рочной головки, манипулятор изделия, задняя бабка, сварочная головка); энергетический блок, вакуумные станции, комплект пневматических средств; узел водяного охлаждения; блок напуска инертного газа аргона; устройства управления и др.

Таблица 1

Соответствие между технологическими переходами и техническими средствами

Table 1

Correspondence between technological transitions and technical means

Операция	Узел	Технические средства
Предварительное разрезание	Вакуумная станция Система управления Рабочая камера Замкнутое водоохлаждение	Вакуумные насосы Запорная аппаратура Трубопроводы Фильтры Масляные ловушки Датчики давления Датчики температуры Устройство управления Оболочка Иллюминаторы Перчаточный ввод Откатная крышка Патрубки Чиллер Трубопроводы Запорная аппаратура Датчик давления Фильтры
Подготовка контролируемой среды	Блок напуска инертного газа Система управления	Баллоны инертного газа Рампа Трубопроводы Датчик давления Клапаны Компрессор Ресивер Приборы Устройство управления
Установка изделия	Манипулятор изделия Задняя бабка Система управления	Несущая рама Планшайба Направляющие Шариковинтовая пара Электродвигатели Сервоприводы Устройство управления
Позиционирование вольфрамового электрода	Манипулятор сварочной головки Сварочная головка Система управления	Направляющие Шариковинтовая пара Электродвигатели Сервоприводы Устройство управления Комплект электрической разводки
Сварка	Энергетический блок Станочный комплекс Система управления	Источники тока Комплект силовой разводки Регулятор слежения за длиной дуги Исполнительные механизмы Устройства управления

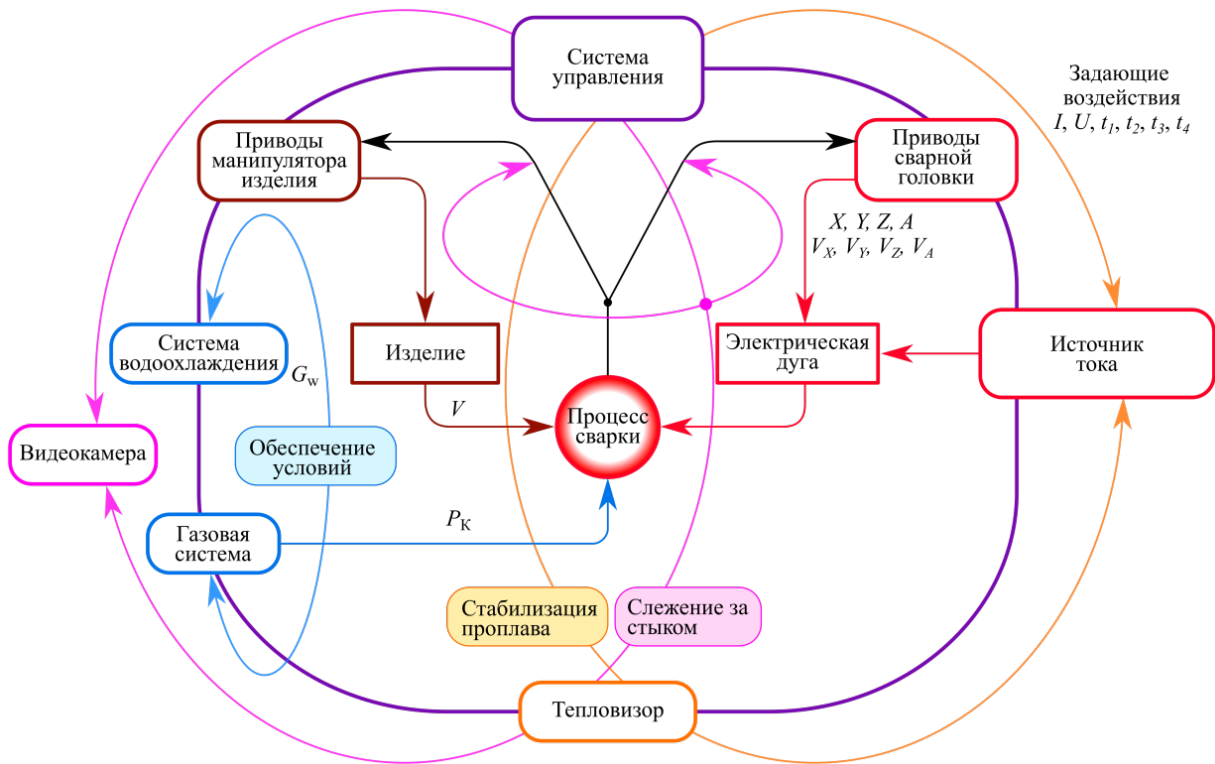


Рис. 6. Концептуальная модель аргонодуговой сварки (I – ток сварки, U – напряжение дуги, t_1, t_2, t_3, t_4 – длительности импульса и паузы, время нарастания и спада импульса, V – скорость сварки, P_k – рабочее давление в камере, $X, Y, Z, V_x, V_y, V_z, V_A$ – соответственно координаты и скорости по осям, G_w – расход воды)

Fig. 6. Conceptual model of argon arc welding (I – welding current, U – arc voltage, t_1, t_2, t_3, t_4 – pulse and pause durations, pulse rise and fall time, V – welding speed, P_k – working pressure in the chamber, $X, Y, Z, V_x, V_y, V_z, V_A$ – coordinates and velocities along the axes, respectively, G_w – water flow)

Установки для реализации технологии аргонодуговой сварки неплавящимся электродом в инертной среде отличаются различными конструкционными решениями узлов, площадью размещения, экономичностью.

К техническим параметрам установки относятся:

- геометрическая форма и размеры, толщина стенки, натекание, рабочее давление (рабочая камера);
- ток дуги, продолжительность включения, напряжение холостого хода, мощность (энергетический блок);
- мощность электрических двигателей, диапазоны скорости и перемещения, время разгона и торможения, точность позиционирования (манипуляторы);
- давление и температура воды, производительность насосов (водяное охлаждение);
- производительность низко- и высоковакуумных насосов, время выхода на режим, время срабатывания запорной аппаратуры, давление в насосах (вакуумная станция);
- концентрация кислорода, азота, водорода, паров воды в рабочей камере (блок напуска инертного газа).

При разработке концептуальной модели специализированной установки необходимо установить её структуру, выбрать элементы, определить параметры, функциональные зависимости, ограничения, критерии. На этом этапе определяются наиболее существенные элементы и взаимодействия между ними (рис. 6).

Проектирование сварочного оборудования на основе объектно-ориентированного подхода обеспечивает поддержку системно-инженерных процессов, начиная с концептуального дизайна и до поздних стадий жизненного цикла системы. Выделяя совокупность объектов и отношений между ними, можно построить модели оборудования и на их основе разработать программные средства для исследования характеристик и свойств изделий. Средства языка моделирования UML позволяют построить большое количество различных диаграмм: классов, объектов, компонентов, вариантов использования, последовательностей, коммуникаций, состояний, деятельностей, размещения, взаимодействий.

Измерительная страта

На измерительной страте рассматриваются функции контроля состояния процесса АДС и элементов сварочного оборудования. Элементами измерительной страты, образующими интерфейс между подсистемами технологической и информационной страт, являются видеокамеры, электронные приборы и нормализаторы, фотодатчики положения исполнительных механизмов, расходомеры, датчики давления и воды, преобразователи, различные средства измерительной техники и др.

На рис. 7 представлен кадр видеосъёмки процесса АДС неплавящимся электродом. На рисунке видны не только вольфрамовый электрод, но и граница электронной дуги (область 1), область плотной плазмы с четкой границей (область 2). Далее плотность плазмы резко уменьшается за счет того, что ионы разлетаются и рекомбинируют (область 3). Области двойного электрического слоя (катодного и анодного) плазма не доходят до объекта нагрева. В анодной области видна только электронная дуга (область 4). В области анода образуется избыток отрицательного пространственного заряда и появляется анодное падение напряжения U_a .

Плазменный столб не граничит с электродом и изделием. Наличие сил кулоновского взаимодействия между электронами и ионами делает их соударения в плазменном столбе более сложными, чем столкновения нейтральных частиц. Вместо броуновского беспорядочного движения молекул траектории заряженных частиц становятся более извилистыми, соответствующими изменению электрического поля в плазме. Результатом упругих соударений электрона с частицами является увеличение кинетической энергии последних, т.е. повышение температуры плазменного столба. Энергия тепловых электронов в дуге составляет примерно 1 эВ.

Скорость и энергия частиц в плазме распределяются по закону Максвелла-Больцмана. Средняя квадратичная скорость частиц может быть определена из равенства

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT,$$

откуда

$$v = \sqrt{3kT/m} = \sqrt{3RT/A},$$

где m – масса частицы, k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-21}$ Дж/к, A – атомная масса; R – универсальная газовая постоянная, T – температура газа, К.

Изделие нагревается вследствие потока электронов и теплового излучения. Температура в различных областях электрической дуги отличается: в катодном слое – 2400 °С, в середине плазменного столба – до 6000 °С, на изделии – примерно 2600 °С [21].

Процесс АДС отличается стохастическим характером. При возникновении несоответствия между имеющимся объемом априорной информации и параметрами процесса, неразрешаемого другими методами управления, применяется адаптивное управление [22]. В этом случае, неопре-

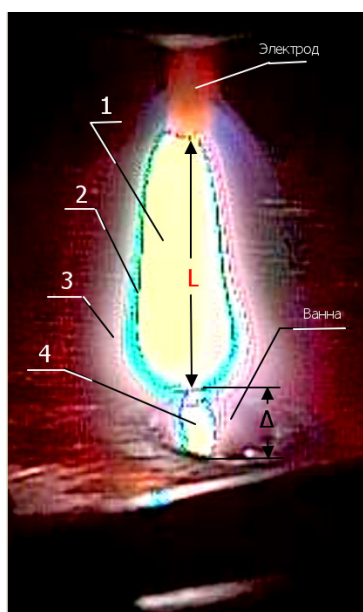


Рис. 7. Кадр видеосъёмки процесса электродугового нагрева
 Fig. 7. Video frame of the electric arc heating process

деленность может быть уменьшена или устранена. Наряду с переменными, доступными для контроля посредством прямых измерений, процесс АДС в контролируемой атмосфере характеризуется переменными, которые рассчитываются косвенными измерениями. Расширение средств измерений снижает фактор неопределенности.

Современные средства контроля [23], включающие электронные и оптические средства видеонаблюдения и измерения, позволяют контролировать технологические параметры процесса (зазор между электродом и изделием, положение электрода относительно стыка, температурное поле в ванне расплава и др.), что отчасти компенсирует воздействие случайных факторов на процесс АДС. Устройство видеонаблюдения состоит из видеокамеры, монитора, стробоскопа для защиты объектива камеры от напыления и брызг металла при сварке.

Важнейшее значение для получения качественного сварного соединения имеет поддержание в процессе сварки постоянного зазора между вольфрамовым электродом и изделием. Первичная обработка напряжения дуги осуществляется модулем источника тока, затем сигнал подается на вход модуля аналого-цифрового преобразователя устройства ЧПУ. Система управления (СУ) обеспечивает два варианта слежения за длиной дуги: по заданному напряжению и первоначально выставленному зазору между электродом и изделием. Во втором случае, программно-аппаратные средства СУ определяют напряжение дуги, соответствующее первоначально выставленному зазору, и в дальнейшем поддерживают рассчитанное значение напряжения дуги на протяжении всего процесса сварки. В зависимости от знака и значения рассогласования между заданным и текущим напряжением регулятор выдаёт управляющий сигнал на привод перемещения электрода. Регулятор имеет зону нечувствительности, значение которой определяет оператор. При возрастании зазора происходит увеличение скорости перемещения электрода. На практике нашёл применение и другой алгоритм: для устранения рассогласования исполнительный механизм перемещается на максимальной скорости.

Для контроля температурного поля в области сварки используется тепловизор. Оптическая камера обрабатывает сигналы пропорциональные энергии излучения и передает по цифровому протоколу информацию в промышленный компьютер (ПК), который выполняет обработку по-

лученных данных, визуализацию теплового изображения поверхности изделия. Использование тепловизора позволяет реализовать контур управления по температуре, прогнозировать структуру сварного соединения, компенсировать недостатки априорной технологии с заранее заданными значениями параметров процесса.

Информационная страта

При проектировании сварочного оборудования к числу наиболее наукоемких задач относится разработка информационного обеспечения и программно–аппаратных средств системы управления, представляющей собой особый класс динамических систем, которые отличаются наличием самостоятельных функций и целей управления, высоким уровнем системной организации.

На информационной страте рассматривается множество взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем управления, выполняющих самостоятельные и общесистемные функции управления и передачи данных. Элементами информационной страты являются оборудование вычислительных цифровых сетей, промышленные компьютеры (ПК), программируемые логические контроллеры (ПЛК), устройства числового программного управления, микропроцессорные и аналоговые устройства, устройства измерения параметров и видеонаблюдения, объединённые в единую цифровую локальную сеть, по которой осуществляется обмен информацией. Программно–аппаратные средства таких СУ позволяют совместить функции проектирования технологии в машинном масштабе времени и управления процессом сварки в реальном масштабе времени.

С развитием мультипроцессорных СУ появилась возможность создания целостных производственных систем АДС, базирующихся на принципах комплексной автоматизации основных и вспомогательных технологических операций, лёгком и удобном интерфейсе оператора к информационным и вычислительным ресурсам. Как правило, проектирование 3D-модели изделия, содержащей комплекс конструкторских, технологических и механических параметров, осуществляется в среде системы автоматизированного проектирования (САД-система). Графический файл 3D-модели изделия поступает на вход постпроцессора, который рассчитывает координаты перемещения исполнительных механизмов станочного комплекса для формирования управляющей программы устройства ЧПУ.

Современная система управления процессом АДС в контролируемой атмосфере включает следующие основные компоненты:

- промышленный компьютер, программно–аппаратные средства которого выполняют моделирование технологического процесса, оптимизацию режима сварки, разработку управляющей программы на базе 3D-модели изделия, визуализацию элементов оборудования и переменных процесса, документирование параметров и др.;
- устройство ЧПУ, формирующее сигналы на исполнительные механизмы и источник тока в соответствии с командами управляющей программы;
- программируемый логический контроллер, обеспечивающий условия проведения технологического процесса (получение контролируемой среды в рабочей камере, диагностика узлов и механизмов оборудования и др.);
- локальные микропроцессорные устройства (анализ химического состава инертной среды, локальное регулирование механическими перемещениями, источниками тока, измерение параметров процесса и др.).

Диаграмма уровней управления с расшифровкой атрибутов, операций и обязанностей представлена на рис. 8. Иерархическое построение СУ обеспечивает её повышенную устойчивость к внешним воздействиям, согласует отдельные задачи элементов и подсистем с общими задачами всей системы, позволяет сократить длины электрических разводов, минимизирует электромагнитные помехи на измерительные цепи.

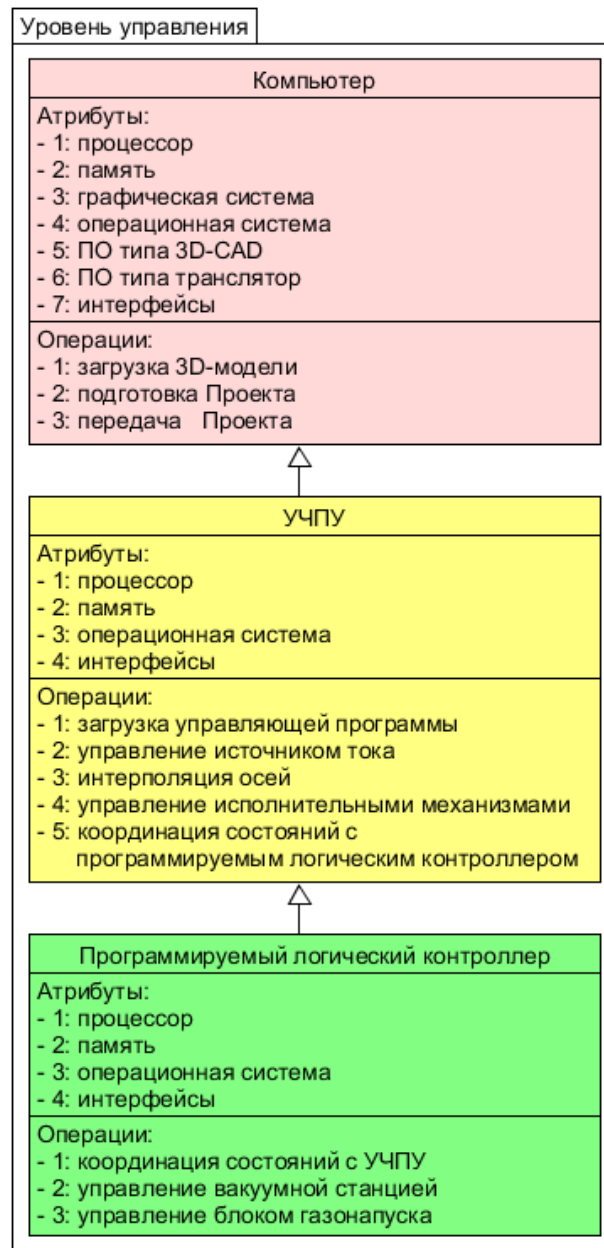


Рис. 8. Диаграмма уровней управления

Fig. 8. Diagram of control levels

Вычислительный потенциал СУ обеспечивает автоматическое управление процессом получения разреза в рабочей камере, слежение за длиной дуги, взаимосвязанное перемещение электрода и изделия, управление контурами тока сварки, напряжения дуги, скоростей сварки и подачи присадочного проволоки, документирование основных параметров сварки (паспорт сварки детали с указанием даты и номера изделия).

Функции системы управления. Основной задачей управления процессом АДС является получение сварного соединения, соответствующего заданным техническим требованиям. Процесс сварки – многомерный объект управления с векторными входами и выходами измеряемых и неизмеряемых параметров. Основные функции СУ определяются через совокупность её внешних взаимодействий (рис. 9):

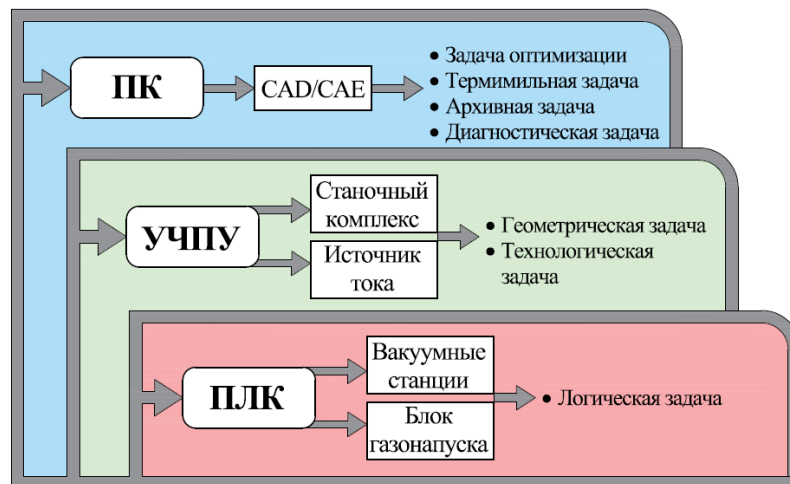


Рис. 9. Функции управления

Fig. 9. Control functions

- управление механизмами перемещения изделия и сварочной головки (геометрическая задача);
- последовательно–параллельное управление дискретными механизмами, элементами вакуумных станций (логическая задача);
- взаимосвязанное управление источником питания сварочной дуги, приводами механических перемещений и подачи присадочной проволоки (технологическая задача);
- организация интерфейса с оператором (терминальная задача);
- документирование параметров сварки (архивная задача);
- идентификация состояния основных элементов установки, формирование файлов состояния элементов, файлов событий и аварийных ситуаций (диагностическая задача);
- математическое моделирование сварки (задача оптимизации);
- диспетчеризация приведенных выше задач (системная задача).

Решение *геометрической и технологической задач управления* обеспечивает устройство числового программного управления (ЧПУ). Управляющая программа процесса сварки составляется в стандартных G-кодах и M-функциях. При этом осуществляется программирование всех механических осей и технологических параметров (координаты точек, ток сварки, напряжение дуги, скорость подачи присадочной проволоки, колебание электрода).

Организация диалога с оператором (*терминальная задача*) выполняется через человеко-машинный интерфейс. Для визуального наблюдения за состоянием механизмов вакуумных станций используется мнемосхема установки, на которой отображается динамика процесса сварки. Программное обеспечение обеспечивает удобный многооконный интерфейс «оператор–система», в котором реализован простой доступ к информации и средствам управления «нажал и смотри». Использование цветных изображений элементов мнемосхемы, максимально приближенных к виду реальных конструкций, облегчает работу оператора.

СУ обеспечивает высокий уровень информационного обеспечения оператора и технолога: диагностика работы насосов по температуре, контроль воды, аварийная звуковая и световая сигнализации, набор блокировок при некорректных действиях оператора, цифровая и графическая визуализация параметров сварки, увеличение количества датчиков для локализации неисправности. При возникновении внештатных ситуаций обеспечивается перевод установки в безопасное состояние, на мониторе появляется окно, в котором отображается код ошибки, описание ошибки и рекомендации оператору.

СУ в режиме реального времени документирует основные параметров процесса сварки (*архивная задача*): время (общее время и время включения), ток и напряжение электрической дуги, параметры управляющей программы (координаты осей, скорость сварки), давление в рабочей камере и др.

Решение *диагностической задачи* управления подразумевает идентификацию состояния ПС, формирование файлов состояния отдельных элементов, файлов событий и аварийных ситуаций. Файл событий имеет важное значение для технического диагностирования основных элементов установки. Периодичность опроса и записи которых в память определяет оператор. Также возможна передача данных по сети Internet на сервисную службу завода-изготовителя. В результате повышается стабильность работы установки, осуществляется диагностика и прогнозирование работоспособности элементов, отслеживаются некорректные действия оператора.

Алгоритмическая страта

На алгоритмическом уровне рассматриваются общие алгоритмы управления, математические модели (ММ), технологические карты процесса сварки. Элементами данной страты являются алгоритмы управления, записанные в виде программ на алгоритмических языках в памяти микропроцессорных устройств.

Основной задачей на данном уровне является проектирование технологии АДС на двух уровнях: формирование структуры операции (выбор кинематической схемы сварки, предварительный прогрев стыка, непрерывный/импульсный режим тока сварки и подачи присадочной проволоки, создание благоприятных условий образования ванны и заварки кратера и др.) и оптимизация значений параметров процесса.

Математическое моделирование процесса сварки включает в себя исследование физических явлений; изучение закономерностей плавления, движения и затвердевания материала. Одним из подходов к исследованию сварочного производства является многоуровневый многомасштабный подход, сочетающий в себе модели, описывающие состояние системы в микро-, мезо- и макро- масштабах. Многомасштабное моделирование предполагает моделирование сварочного производства на различных уровнях его детализации. Преимущество многомасштабного подхода состоит в возможности анализа процесса на разных масштабных уровнях. При создании многоуровневых информационных систем и схем многомасштабного моделирования используются либо теоретические построения, основанные на применении методов теории графов и множеств, либо описательные и неформализованные подходы к созданию многомасштабных моделей [24–25]. На основе многомасштабных композиций строятся сложные иерархические программные системы, применяемые для решения задач многомасштабного моделирования физических явлений и процессов [26].

Разработка математической модели процесса АДС осуществляется как на имеющихся теоретических и экспериментальных положениях механики двухфазных сред, так и на новых разработках и экспериментальных данных. Выделяют два направления проектирования ММ процесса сварки:

- на основе баз данных и знаний, включающих в себя результаты многочисленных исследований;
- на базе аппарата гидромеханики, механики деформации твердых тел, методов моделирования, исследования операций.

Математической базой первого, вероятностно-статистического метода, являются положения теории вероятностей и математическая статистика. Главным недостатком этого подхода является возможность разработки модели только для исследованных материалов, что ограничивает пределы применения подобных пакетов.

Второе направление базируется на математическом описании процесса сварки. Разработка наукоемких моделей для известных и новых материалов имеет важное прикладное значение.

Для анализа тепловых процессов АДС сварки используется объемный источник нагрева с нормальным (гауссовским) распределением удельной тепловой мощности по всем координатным осям в объеме тела, имеющего форму эллипсоида (модель Голдака) [27].

Поток теплоты создается дугой, перемещаемой вдоль стыка и совершающей периодические поперечные колебания. Тепловой поток $q_a(x, y)$, создаваемый плазмой дуги, описывается соотношением (нормальное распределение)

$$q_a(x, y) = \frac{2P(t)}{\pi R^2} \exp\left\{-\frac{2}{R^2}[(x-x_0)^2 - (y-y_0)^2]\right\},$$

где $P(t)$ — мощность теплового потока, периодически изменяющаяся во времени t , R — радиус действия плазмы дуги, (x_0, y_0) — координаты центра источника, изменяющиеся во времени t .

Для описания процессов, проходящих в расплавленном металле ванны, необходимо решить нелинейную систему уравнений магнитной гидродинамики движения вязкой жидкости, систему уравнений Максвелла распределения векторов напряженностей электрической и магнитной составляющих электромагнитных полей. При отсутствии протекания тока через металлическую ванну в качестве силовых факторов, воздействующих на расплавленный металл, выступают термомгравитационная сила Архимеда и термокапиллярная сила Марангони.

Процессы, протекающие в сварочной ванне, описываются системой уравнений электрогидродинамики, которые получаются объединением системы уравнений гидродинамики и системы уравнений Максвелла.

Система уравнений Максвелла для неподвижной среды в системе СИ имеет вид

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_e; \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) дополняются материальными уравнениями

$$\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}, \quad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}.$$

Здесь ρ_e — объемная плотность заряда в жидкости, \mathbf{E} — вектор электрической напряженности, \mathbf{D} — вектор электрической индукции, \mathbf{H} — вектор магнитной напряженности, \mathbf{B} — вектор магнитной индукции, \mathbf{j} — вектор плотности тока проводимости, σ — удельная проводимость, μ_0 — магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м), μ — относительная магнитная проницаемость, ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды, ε_0 — электрическая постоянная.

При изменении поля во времени, согласно уравнениям (1) и (2), в среде индуцируется магнитное поле \mathbf{H} за счет токов проводимости $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ и токов смещения $\mathbf{j}_s = \partial \mathbf{D} / \partial t$.

Уравнения, описывающие нестационарное течение вязкой несжимаемой жидкости, включают уравнение неразрывности, уравнение изменения количества движения и уравнение изменения температуры

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0;$$

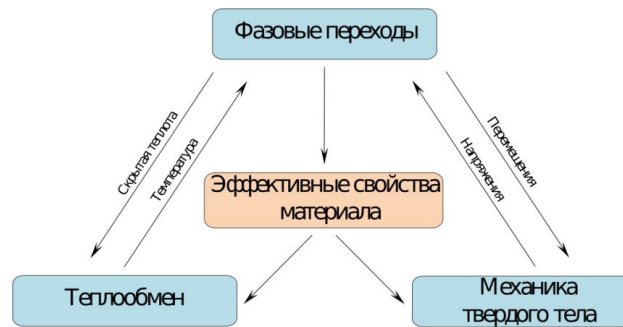


Рис. 10. Моделирование фазовых превращений, сопряженных с теплопередачей и механикой твердого тела

Fig. 10. Modeling of phase transformations associated with heat transfer and solid mechanics

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mu \Delta \mathbf{v} + \mathbf{g} + \mathbf{f};$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T = a \Delta T.$$

Здесь \mathbf{v} – скорость жидкости, p – давление, T – температура, μ – динамическая вязкость жидкости, a – коэффициент температуропроводности жидкости, \mathbf{g} – вектор ускорения силы тяжести, \mathbf{f} – объемная внешняя сила.

Математическое исследование процесса сварки осуществляется в среде многодисциплинарных программных комплексов, обладающих большим набором инструментов для моделирования движения жидкости, переноса тепла и реакций, позволяют охватить весь спектр протекающих процессов (теплообмен, фазовые переходы и др.). Функциональные возможности программных комплексов позволяют моделировать диффузионные, а также сдвиговые фазовые превращения (рис. 10). Совместное использование термомеханического анализа открывает возможности для более сложного и детального анализа процесса сварки.

Таким образом, алгоритмический уровень объединяет множество правил и законов управления, которые могут быть записаны на какой-либо носитель информации. В то же время, правила и законы управления не могут быть реализованы без остальных, имеющих физическое воплощение уровней иерархической структуры производственной системы.

В качестве прикладного инструмента для разработки ММ процесса АДС используются компьютерные системы автоматизированного проектирования (Computer-Aided Design, CAD), автоматизированного производства (Computer-Aided Manufacturing, CAM), инженерных расчётов (Computer-Aided Engineering, CAE), включая анализ конечных элементов (Finite Element Analysis, FEA), динамику многотельных систем (Multi-Body Dynamics, MBD), вычислительную гидродинамику (Computational Fluid Dynamics, CFD), взаимодействие жидкости (газа) с конструкцией (Fluid-Structure Interaction, FSI), электромагнитный анализ (Electro-Magnetic Analysis, EMA), автоматизированную оптимизацию (Computer-Aided Optimization, CAO).

Системная стратегия

На системной стратегии рассматриваются задачи оценки качества моделей на нижестоящих уровнях с учётом основных структурных и параметрических характеристик, общие комплексные вопросы, определяется методика оптимизации параметров процесса на базе векторного критерия. На данной стратегии анализируются все технические и экономические вопросы, задаются проектные ограничения.

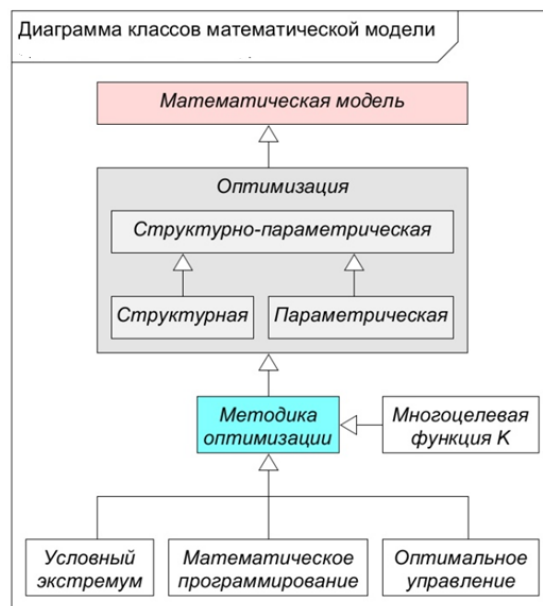


Рис. 11. Элементы оптимизации сварочного производства

Fig. 11. Elements of optimization of welding production

При постановке задачи оптимизации необходимо ввести в рассмотрение все основные параметры ПС. Процедура оптимизации позволяет определить наиболее эффективные технологии, структуру и состав оборудования при выполнении параметрических и функциональных ограничений.

В задаче оптимизации предусматривается наличие трёх основных элементов: математической модели, целевой функции и метода оптимизации (рис. 11). Математическая модель и целевая функция описывают все существенные для проектирования ПС связи технологических (допуски на размер изделия, структура и свойства сварного соединения и т.д.), технических (кинематические возможности установки, мощность исполнительных механизмов, параметры энергетического блока) и организационных (согласование работы различных элементов установки) ограничений на искомые решения.

Задача оптимизации сварочного производства является многокритериальной (многоцелевой или векторной), так как при выборе наилучшего варианта приходится учитывать множество технико-экономических требований, часто противоречивых.

Известны различные принципы выбора оптимальных решений: доминантности, Парето, Слейтера, Джеффри, Нэша, компромисса, гарантированного результата, критерия Гурвица и другие. К числу наиболее эффективных и распространенных относится область Парето, которая характеризуется тем важным свойством, что на ней ни одно решение не может быть улучшено по одному из показателей без ухудшения по другому показателю. При выделении области доминирующих решений значительно сокращается перечень возможных решений и тем самым облегчает выбор единственного решения.

В ряде работ, посвящённых методам решения задач многоцелевой оптимизации [28–30], показана эффективность построения процедуры оптимизации по модульно-иерархическому принципу [29]. Разбиение процедуры многоцелевой оптимизации на уровни обусловлено сложностью рассматриваемой задачи. Нижний уровень определяет способ задания и структуру множества альтернатив параметров производственной системы сварки и соответствующее им множество частных критериев оптимизации. На среднем уровне значительно сокращается допустимое мно-

жество вариантов выбора параметров путем определения их эффективных (Парето-оптимальных) значений. Численная реализация моделей этого уровня позволяет сформировать пакет эффективных решений. На верхнем уровне из пакета выбирается единственный наилучший вариант. Наиболее распространенным способом поиска единственного решения является метод свертки локальных критериев оптимизации, сводящий многоцелевую задачу оптимизации к соответствующей скалярной задаче математического программирования, когда многоцелевая функция «свёртывается» в виде одной результирующей функции Q . Для выпуклой области поиска оптимизируемых управляемых параметров обычно применяется свертка Карлина [31]

$$Q = \max(a_v \bar{K}_v + a_\mu \bar{K}_\mu),$$

где a_v и a_μ – весовые коэффициенты. Значения критериев \bar{K}_v и \bar{K}_μ определяются соотношениями естественной нормализации

$$\bar{K}_{v,\mu} = \frac{\bar{K}_{v,\mu} - \min \bar{K}_{v,\mu}}{\max \bar{K}_{v,\mu} - \min \bar{K}_{v,\mu}}.$$

Набор критериев в зависимости от выбранной модели может быть любым, при этом алгоритм поиска эффективных решений не меняется. При решении задачи многоцелевой оптимизации большое значение имеет способ задания и учета определяющих элементов (нормализации, свертки, приоритета критериев).

Системный уровень подобно кровеносной системе биологического организма обеспечивает коммуникационные процессы всех разнородных страт производственной системы АДС в контролируемой атмосфере для достижения главной задачи: получение сварного соединения с заданной структурой и свойствами.

Стратифицированное представление производственной системы для реализации технологии АДС позволяет раскрыть взаимодействие разнородных по своей природе уровней и межуровневых связей, имеющих различные интерфейсы. Приведенная иерархическая абстракция, состоящая из технологической, инструментальной, измерительной, информационной, алгоритмической, системной страт позволяет достаточно полно раскрыть содержание производственной системы сварки.

Заключение

Для развития сварочного производства необходимо создать единую цифровую платформу, объединяющую области проектирования и численных расчётов. Проектирование производственной системы на основе объектно-ориентированного подхода обеспечивает поддержку системно-инженерных процессов, начиная с концептуального дизайна и до поздних стадий жизненного цикла системы. Интеграция технологических, проектных, расчетных и эксплуатационных процессов на базе CASE-технологии позволяет максимально автоматизировать процесс разработки, обеспечивает отсутствие ошибок и простоту в обслуживании программных продуктов.

Современная СУ, связывающая в единое информационное пространство промышленный компьютер, устройство ЧПУ, программируемый контроллер, цифровые и аналоговые средства измерения, обеспечивает получение сварного соединения заданной структуры и свойств. Автоматизация процесса сварки на базе современных вычислительных средств открывает новые возможности управления. С развитием микропроцессорных устройств и локальных вычислительных сетей появилась возможность создания целостных технологических систем обработки данных.

Дальнейшее развитие предполагается в следующих направлениях:

- разработка эффективных алгоритмов управления процессом сварки в реальном масштабе времени;
- прогнозирование механических и теплофизических свойств изделий с различной структурой;
- разработка новых способов принятия решений в алгоритме структурно-параметрической оптимизации;
- использование более мощных аппаратных средств для технической реализации системы управления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Рудской А.И., Волков К.Н., Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю. Цифровые производственные системы: технологии, моделирование, оптимизация. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – 828 с.
- [2] Рудской А.И., Волков К.Н., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Физические процессы и технологии получения металлических порошков из расплава. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 610 с.
- [3] Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Алгоритм и технологические процессы синтеза порошковых деталей электронным лучом в вакууме // Технология машиностроения. 2015. № 1. С. 11–16.
- [4] Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Технология послойного электронно-лучевого синтеза порошковых изделий в вакууме // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 8. С. 40–45.
- [5] Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O. Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components // Welding International. – August 2012. – Vol. 26. – No. 8. – Pp. 629–632.
- [6] Кондратьев С.Ю., Фукс М.Д., Фролов М.А., Петров С.Н. Анализ структуры, фазового состава и механических свойств трубного сварного соединения из жаропрочного сплава HP40NbTi // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 11 (785). С. 21–31.
- [7] Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева, В.Г.Митрофанова. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
- [8] Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
- [9] Теория сварочных процессов / Под ред. В.В. Фролова. М.: Высшая школа, 1988. 559 с.
- [10] Piekarska W., Kubiak M. Modeling of thermal phenomena in single laser beam and laser-arc hybrid welding processes using projection method // Applied Mathematical Modelling. 2013. Vol. 37. Pp. 2051–2062.
- [11] Wang S., Nates R., Pasang T., Ramezani M. Modelling of gas tungsten arc welding pool under marangoni convection // Universal Journal of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 3. Pp. 185–201.
- [12] Kou S., Sun D.K. Fluid flow and weld penetration in stationary arc welds // Metallurgical Transactions A. 1985. Vol. 16. Pp. 203–213.
- [13] Kou S., Wang Y.H. Computer simulation of convection in moving arc weld pools // Metallurgical Transactions A. 1986. Vol. 17. Pp. 2271–2277.
- [14] Lin M.L., Eagar T.W. Pressures produced by gas tungsten arcs // Metallurgical Transactions B. 1986. Vol. 17. Pp. 601–607.
- [15] Oreper G.M., Szekely J. Heat and fluid flow phenomena in weld pool // Journal of Fluid Mechanics. 1984. Vol. 147. Pp. 63–76.
- [16] Шолохов М.А. Траекторные задачи при автоматической и роботизированной сварке. Методы и алгоритмы решения, датчики, программно-аппаратные средства / Под ред. Э.А. Гладкова, Р.А. Перковского. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 168 с.

- [17] **Буч Г.** Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++. Бином, 1998. 720 с.
- [18] **Гома Х.** UML. Проектирование систем реального времени, параллельных и распределенных приложений. М.: ДМК Пресс, 2016. 700 с.
- [19] **Новиков Ф., Иванов Д.** Моделирование на UML. Учебно-методическое пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. 200 с.
- [20] **Рамбо Дж., Блаха М.** UML 2.0. Объектно-ориентированное моделирование и разработка. СПб.: Питер, 2007. 544 с.
- [21] **Краснов А.Н., Шаривкер С.Ю., Зильберберг В.Г.** Низкотемпературная плазма в металлургии. М.: Металлургия, 1970. 216 с.
- [22] Адаптивное управление технологическими процессами / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.П. Протопопов и др. М.: Машиностроение, 1980. 536 с.
- [23] **Shen H., Lin T., Chen S., Li L.** Real-Time Seam Tracking Technology of Welding Robot with Visual Sensing // J. Intell, Robot Syst., 2010, No. 59. – Pp. 283–298.
- [24] **Годунов С.К., Киселев С.П., Куликов И.М., Мали В.И.** Моделирование ударноволновых процессов в упругопластических материалах на различных (атомный, мезо и термодинамический) структурных уровнях. Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2014. 279 с.
- [25] **Borg M.K., Lockerby D.A., Reese J.M.** A Hybrid molecular-continuum method for unsteady compressible multiscale flow // Journal of Fluid Mechanics. 2015. Vol. 768. Pp. 388–414.
- [26] **Абгарян К.К., Гаврилов Е.С., Марасанов А.М.** Информационная поддержка задач многомасштабного моделирования композиционных материалов // International Journal of Open Information Technologies. 2017. № 12. С. 24–29.
- [27] **Goldak J., Chakravarti A., Bibby M.** A new finite element model for welding heat source // Metallurgical Transactions. В. 1984. 15В. Pp. 299–305.
- [28] **Поддиновский В.В., Ногин В.Д.** Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. 254 с.
- [29] **Сенькин Е.Н.** Подсистема многокритериальной параметрической оптимизации режущего инструмента // Станки и инструмент. 1989. № 4. С. 15–17.
- [30] **Соболь И.М.** Многомерные квадратурные формулы и функции Хаара. М.: Наука, 1969. 288 с.
- [31] **Хоменюк В.В.** Элементы теории многоцелевой оптимизации. – М.: Наука, 1983. – 123 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

СОКОЛОВ Юрий Алексеевич – зам. директора, ПАО "Электромеханика", д-р техн. наук.
 E-mail: s5577@inbox.ru
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0280-0178>

REFERENCES

- [1] **A.I. Rudskoy, K.N. Volkov, Yu.A. Sokolov, S.Yu. Kondratyev,** Tsifrovyye proizvodstvennyye sistemy: tekhnologii, modelirovaniye, optimizatsiya. – SPb.: POLITEKKh-PRESS, 2020. – 828 s.
- [2] **A.I. Rudskoy, K.N. Volkov, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov,** Fizicheskiye protsessy i tekhnologii polucheniya metallicheskikh poroshkov iz rasplava. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2018. – 610 s.
- [3] **A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov,** Algoritm i tekhnologicheskiye protsessy sinteza poroshkovykh detaley elektronnyim luchom v vakuume // Tekhnologiya mashinostroyeniya. 2015. № 1. S. 11–16.
- [4] **A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov,** Tekhnologiya posloynnogo elektronno-luchevogo sinteza poroshkovykh izdeliy v vakuume // Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii. 2014. № 8. S. 40–45.

- [5] **S.Y. Kondrat'ev, V.I. Gorynin, V.O. Popov**, Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components // *Welding International*. – August 2012. – Vol. 26. – No. 8. – Pp. 629–632.
- [6] **S.Yu. Kondratyev, M.D. Fuks, M.A. Frolov, S.N. Petrov**, Analiz struktury, fazovogo sostava i mekhanicheskikh svoystv trubnogo svarnogo soyedineniya iz zharoprochnogo splava HP40NbTi // *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2020. № 11 (785). S. 21–31.
- [7] *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye i proizvodstvo v mashinostroyenii* / Pod obshch. red. Yu.M. Solomentseva, V.G. Mitrofanova. – M.: Mashinostroyeniye, 1986. – 256 s.
- [8] **M. Mesarovich, D. Mako, I. Takahara**, Teoriya iyerarkhicheskikh mnogourovnevnykh sistem. – M.: Mir, 1973. – 344 s.
- [9] *Teoriya svarochnykh protsessov* / Pod red. V.V. Frolova. M.: Vysshaya shkola, 1988. 559 s.
- [10] **W. Piekarska, M. Kubiak**, Modeling of thermal phenomena in single laser beam and laser-arc hybrid welding processes using projection method // *Applied Mathematical Modelling*. 2013. Vol. 37. Pp. 2051–2062.
- [11] **S. Wang, R. Nates, T. Pasang, M. Ramezani**, Modelling of gas tungsten arc welding pool under marangoni convection // *Universal Journal of Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 3. Pp. 185–201.
- [12] **S. Kou, D.K. Sun**, Fluid flow and weld penetration in stationary arc welds // *Metallurgical Transactions A*. 1985. Vol. 16. Pp. 203–213.
- [13] **S. Kou, Y.H. Wang**, Computer simulation of convection in moving arc weld pools // *Metallurgical Transactions A*. 1986. Vol. 17. Pp. 2271–2277.
- [14] **M.L. Lin, T.W. Eagar**, Pressures produced by gas tungsten arcs // *Metallurgical Transactions B*. 1986. Vol. 17. Pp. 601–607.
- [15] **G.M. Oreper, J. Szekely**, Heat and fluid flow phenomena in weld pool // *Journal of Fluid Mechanics*. 1984. Vol. 147. P. 63–76.
- [16] **M.A. Sholokhov**, Trayektnyye zadachi pri avtomaticheskoy i robotizirovannoy svarke. Metody i algoritmy resheniya, datchiki, programmno-apparatnyye sredstva / Pod red. E.A. Gladkova, R.A. Perkovskogo. – M.: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Baumana, 2015. – 168 s.
- [17] **G. Buch**, Obyektno-oriyentirovanny analiz i proyektirovaniye s primerami prilozheniy na C++. Binom, 1998. 720 s.
- [18] **Kh. Goma**, UML. Proyektirovaniye sistem realnogo vremeni, parallelnykh i raspredelennykh prilozheniy. M.: DMK Press, 2016. 700 s.
- [19] **F. Novikov, D. Ivanov**, Modelirovaniye na UML. Uchebno-metodicheskoye posobiye. SPb.: SPbGU ITMO, 2010. 200 s.
- [20] **Dzh. Rambo, M. Blakha**, UML 2.0. Obyektno-oriyentirovannoye modelirovaniye i razrabotka. SPb.: Piter, 2007. 544 s.
- [21] **A.N. Krasnov, S.Yu. Sharivker, V.G. Zilberberg**, Nizkotemperaturnaya plazma v metallurgii. M.: Metallurgiya, 1970. 216 s.
- [22] *Adaptivnoye upravleniye tekhnologicheskimi protsessami* / Yu.M. Solomentsev, V.G. Mitrofanov, S.P. Protopopov i dr. M.: Mashinostroyeniye, 1980. 536 s.
- [23] **H. Shen, T. Lin, S. Chen, L. Li**, Real-Time Seam Tracking Technology of Welding Robot with Visual Sensing // *J. Intell. Robot Syst.*, 2010, No. 59. – Pp. 283–298.
- [24] **S.K. Godunov, S.P. Kiselev, I.M. Kulikov, V.I. Mali**, Modelirovaniye udarnovolnovnykh protsessov v uprugoplasticheskikh materialakh na razlichnykh (atomnyy, mezo i termodinamicheskii) strukturnykh urovnyakh. Izhevsk: Izhevskiy institut kompyuternykh issledovaniy, 2014. 279 s.
- [25] **M.K. Vorg, D.A. Lockerby, J.M. Reese**, A Hybrid molecular-continuum method for unsteady compressible multiscale flow // *Journal of Fluid Mechanics*. 2015. Vol. 768. Pp. 388–414.
- [26] **K.K. Abgaryan, Ye.S. Gavrilov, A.M. Marasanov**, Informatsionnaya podderzhka zadach mnogomasshtabnogo modelirovaniya kompozitsionnykh materialov // *International Journal of Open Information Technologies*. 2017. № 12. S. 24–29.

[27] **J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby**, A new finite element model for welding heat source // Metallurgical Transactions. B. 1984. 15B. Pp. 299–305.

[28] **V.V. Podinovskiy, V.D. Nogin**, Pareto-optimalnyye resheniya mnogokriterialnykh zadach. M.: Nauka, 1982. 254 s.

[29] **Ye.N. Senkin**, Podsystema mnogokriterialnoy parametriceskoy optimizatsii rezhushchego instrumenta // Stanki i instrument. 1989. № 4. S. 15–17.

[30] **I.M. Sobol**, Mnogomernyye kvadraturnyye formuly i funktsii Khaara. M.: Nauka, 1969. 288 s.

[31] **V.V. Khomenyuk**, Elementy teorii mnogotselovoy optimizatsii. – M.: Nauka, 1983. – 123 s.

THE AUTHOR

SOKOLOV Yuriy A. – *Public Joint Stock Company "Electromekhanika"*.

E-mail: s5577@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0280-0178>

Статья поступила в редакцию 25.03.2022; одобрена после рецензирования 28.03.2022; принята к публикации 28.03.2022.

The article was submitted 25.03.2022; approved after reviewing 28.03.2022; accepted for publication 28.03.2022.