

Металлургия. Материаловедение Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 621.791.722: 621.762.04

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28406>



Ю.А. Соколов ✉

ПАО "Электромеханика", Ржев, Россия

✉ s5577@inbox.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

Аннотация. В статье исследованы внутренние закономерности производственной системы электроннолучевой сварки (ЭЛС) с помощью теории иерархических систем, предлагающей различные способы декомпозиции сложной системы в виде иерархий страт, организации и сложности принятия решений. В статье рассматривается стратифицированное представление производственных систем электроннолучевой сварки. Приведенная иерархическая абстракция, состоящая из технологической, инструментальной, измерительной, информационной, алгоритмической и системной страт, представляет собой инструмент углубленного описания производственной системы, её элементов и связей. Стратифицированное представление ПС позволяет раскрыть взаимодействие разнородных по своей природе уровней и межуровневых связей, имеющих различные интерфейсы. Приведенная в статье иерархическая абстракция, состоящая из технологической, инструментальной, измерительной, информационной, алгоритмической, системной страт раскрывает содержание производственной системы ЭЛС, которая характеризуется последовательным вертикальным расположением подсистем, приоритетом действий подсистем верхнего уровня, зависимостью действий подсистем верхнего уровня от фактического исполнения нижними уровнями своих функций.

Ключевые слова: производственная система, структура, страты, оборудование, конструкция, процесс, электронный пучок, управление, измерение, алгоритмы.

Для цитирования:

Соколов Ю.А. Моделирование производственной системы электроннолучевой сварки // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 4. С. 90–109. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28406>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28406>

Y.A. Sokolov ✉

Public Joint Stock Company "Electromekhanika",
Rzhev, Russia

✉ s5577@inbox.ru

SIMULATION OF THE PRODUCTION SYSTEM OF ELECTRON BEAM WELDING

Abstract. The article explores the internal laws of the production system (PS) of electron beam welding (EBW) using the theory of hierarchical systems, which offers various ways of decomposition of a complex system in the form of hierarchies of strata, organization and complexity of decision making. The article considers a stratified representation of PSs for electron beam welding. The given hierarchical abstraction, consisting of technological, instrumental, measuring, informational, algorithmic and system strata, is a tool for in-depth description of the PS, its elements and relationships. The stratified representation of the PS allows revealing the interaction of inherently heterogeneous levels and inter-level connections that have different interfaces. The hierarchical abstraction given in the article, consisting of technological, instrumental, measuring, informational, algorithmic, system strata, reveals the content of the EBW PS, which is characterized by a consistent vertical arrangement of subsystems, the priority of the actions of the upper-level subsystems, the dependence of the actions of the upper-level subsystems on the actual execution by the lower levels of their functions.

Keywords: production system, structure, strata, equipment, design, process, electron beam, control, measurement, algorithms.

Citation:

Y.A. Sokolov, Simulation of the production system of electron beam welding, *Global Energy*, 28 (04) (2022) 90–109, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28406>

Введение. 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 характерным особенностям которой относятся: многокритериальность оценок процессов, различная природа информационных связей между подсистемами и элементами; многообразие различных форм связей [1–3].

Для описания сложных систем М. Месарович в работе [4] предложил использовать различные уровни абстрагирования или страты, позволяющие детально раскрыть взаимодействие между элементами. Для каждого уровня абстрагирования характерны сосредоточение внимания на специфических аспектах ПС (технологическом, техническом, алгоритмическом, информационном, измерительном, организационном), оригинальный язык, семейство моделей, законы и принципы, позволяющих детально раскрыть взаимодействие элементов ПС в пределах и вне страты.

Целью статьи является исследование внутренних закономерностей производственной системы электроннолучевой сварки (ЭЛС) с помощью теории иерархических систем, предлагающей различные способы декомпозиции сложной системы в виде иерархий страт, организации и сложности принятия решений.

Technological aspects

On the technological strategy, the peculiarities of physical processes of electron beam (EB) welding, based on the phenomenon of conversion of kinetic energy of electrons into heat upon their deceleration in the material of the workpiece [5–12]. Unlike arc and plasma energy sources, electron beam heating is carried out in the material of the workpiece at a certain depth from the surface.

EBs are characterized by a large number of phenomena of different physical nature: formation of an electron beam, heating and melting of the material, flow of metal in the melt pool, evaporation of the material, etc. At small values of the specific power of the beam, $\sim 10^4$ W/cm², heat is released on the surface of the metal, the melt pool is formed in the shape of a hemisphere. With an increase in the specific power of the beam to 10^6 W/cm², overheating of the surface of the melt pool occurs, intensive evaporation of the metal and a steam flow appear, the surface of the melt pool sags, forming a so-called crater and bringing the zone of heat release closer to the solid metal [13].

In the initial moment of the formation of the melt pool, its radius decreases, and together with this, the force of surface tension increases, therefore, the depth of the melt pool in the initial moment grows several times more slowly. With further deepening of the crater, the radius of curvature of the surface of the melt pool at the bottom does not change, therefore, the magnitude of the force of surface tension ceases to increase, but the static pressure continues to increase, since the height of the liquid metal column in the melt pool increases. As the crater deepens, the intensity of its action on the bottom of the crater and at a certain depth a dynamic equilibrium of forces is reached. The diameter of the crater channel is approximately 2–4 times larger than the diameter of the beam. At the beginning of the movement of the beam, a steam channel and the melt pool are deformed and acquire the shape shown in Fig. 1 [13].

The overflow of metal from the front wall of the crater to the rear wall is carried out mainly due to the action of the reaction of the steam and capillary forces. In the moving melt pool, the beam acts mainly on the front wall, on which, due to the high temperature, the force of surface tension decreases.

Structure (spatial position of the workpiece and electron beam, type of connection and form of the edge preparation, choice of technological welding methods, preliminary preheating of the

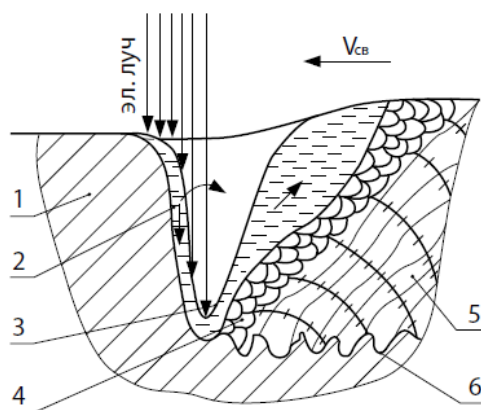


Fig. 1. The shape of the liquid metal pool and the crater during the movement of the electron beam: 1 – the base metal, 2 – the front wall of the crater, 3 – the rear wall of the crater, 4 – the crystallization zone, 5 – the weld metal, 6 – the root saw (the arrows show the direction of movement of the liquid metal, V_{sv} – welding speed)

мок, осцилляции пучка вдоль или поперек стыка и др.) и параметры (рабочее давление в рабочей камере и электронной пушке, ускоряющее напряжение, ток пучка, скорость сварки, ток фокусирующей линзы, рабочее расстояние от пушки до изделия, амплитуда и частота колебаний пучка, время импульса и паузы при импульсной сварке) технологического процесса оказывают определяющее влияние на качество сварного соединения. Технологические приёмы и поддержание оптимальных параметров режима сварки обеспечивает снижение образования дефектов сварных швов (трещины, неполное проплавление, поры, несплошности и т.д.).

Инструментальная стратегия

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

Проектирование установки для реализации операции ЭЛС, 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 ПС электроннолучевой сварки 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). Средства UML позволяют построить множество диаграмм для концентрации внимания на различных аспектах ПС [14–15]. К основным способам использования UML для моделирования ПС 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) [14–15].

Для описания технологии ЭЛС, оборудования и управления процессом с различных точек зрения обычно используют модели классов, состояний и взаимодействий. Операция ЭЛС включает в себя множество переходов, для технической реализации которых необходимы различные механические узлы и программно-аппаратные средства.

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 состояний определяет состояния, в которых может находиться объект, свойства объекта и действующие на них ограничения, а также события, вызывающие переход объекта из одного состояния в другое (рис. 2). Сначала выявляются классы, которые могут находиться в разных состояниях, и выполняется запись состояния для каждого класса. Например, для описания класса «технологический процесс» можно выделить следующие состояния: получение разрежения в рабочей камере, настройка пучка на стык, взаимосвязанное перемещение пучка и изделия, сварка при заданном технологическом режиме, заварка кратера, напуск атмосферы и др.

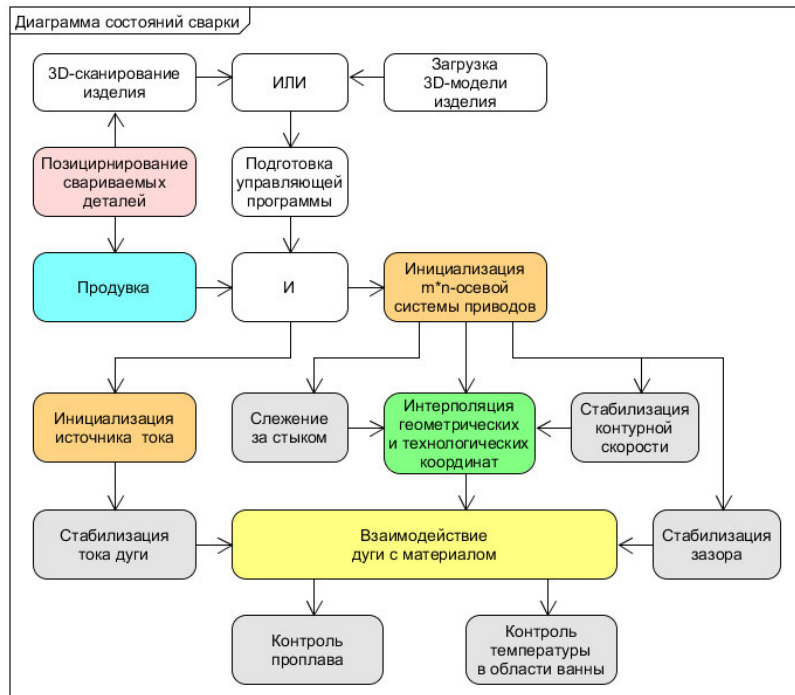


Рис. 2. Диаграмма состояний подготовки и проведения процесса ЭЛС
 Fig. 2. Diagram of the states of preparation and conduct of the EBW process

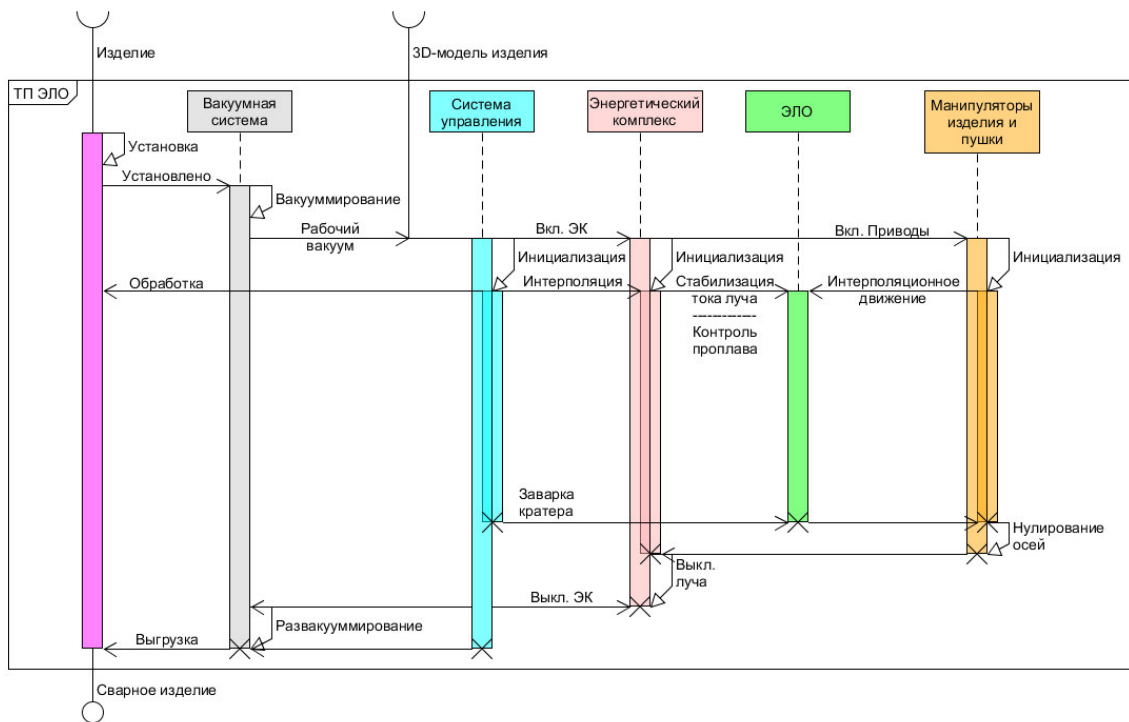


Рис. 3. Диаграмма последовательности ЭЛС (ТП – технологический процесс, ЭЛО – электроннолучевая обработка, ЭК – энергокомплекс)

Fig. 3. ELS sequence diagram (TP – technological process, ELO – electron beam processing, EC – energy complex)

Модель взаимодействия описывает взаимодействие между объектами для обеспечения поведения ПС как целого. Построение модели взаимодействия начинается с выбора варианта использования, который затем уточняется на диаграммах последовательности и деятельности. Диаграммы последовательностей показывает временную последовательность взаимодействия объектов (рис. 3), диаграммы деятельности – поток управления между последовательными этапами вычислений.

Диаграммы состояний и последовательностей позволяют сформировать таблицу соответствия между технологическими переходами и техническими средствами (табл. 1). В результате составляется список узлов, необходимый для создания установки: рабочая камера, станочный комплекс, энергетический блок, вакуумные станции, комплект пневматических средств, узел водяного охлаждения, устройства управления и др.

При разработке концептуальной модели установки ЭЛС необходимо установить её структуру, выбрать элементы, определить параметры, функциональные зависимости, ограничения, критерии. На этом этапе определяются наиболее существенные технологические параметры сварки и состав технических средств, взаимодействие между ними (рис. 4).

Оборудование для реализации операции ЭЛС оценивается следующими критериями: конструктивными решениями узлов, коэффициентом использования объема рабочей камеры, коэффициентом металлоемкости рабочей камеры, временем получения рабочего разреза, производительностью установки, степенью автоматизации основных операций, площадью размещения, экономичностью, временем перехода на сварку другой номенклатуры изделий, удобством обслуживания, модульностью, качеством сварных соединений [16]. К техническим параметрам основных узлов установки относятся:

- геометрическая форма и размеры, толщина стенки, натекание, рабочее давление (рабочая камера);
- ток пучка, ускоряющее напряжение, ток бомбардировки, напряжение Венельта, амплитуда развёртки, токи фокусировки и отклонения пучка, давление в катодной части (энергетический комплекс);
- мощность электрических двигателей, диапазоны скорости и перемещения, время разгона и торможения, точность позиционирования (станочный комплекс);
- 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).

Рабочая камера предназначена для создания вакуумного пространства, размещения станочного комплекса и технологической оснастки, защиты от рентгеновского излучения, возникающего в результате торможения ускоренных электронов. Рабочая камера является одним из наиболее важных и трудоемких узлов установки. От их формы, конструкции, жесткости и размеров зависят габариты и качество свариваемых изделий. Камеры должны быть технологичными, обеспечивать механическую прочность и жесткость конструкции, а также биологическую защиту обслуживающего персонала [16]. По форме рабочие камеры подразделяются на цилиндрические, с прямоугольным и восьмигранным сечением. К особенностям камер цилиндрического типа относятся технологичность изготовления, повышенная прочность, низкий коэффициент использования рабочего пространства при сварке изделий, отличных от тел вращения. Камеры с прямоугольным сечением используются для сварки изделий широкой номенклатуры. Рабочие камеры с восьмигранным сечением имеют высокий коэффициент использования рабочего пространства.

Состав станочного комплекса, выполняющего сварочные, установочные и транспортные перемещения, зависит от класса установки, её назначения, специализации, размеров свариваемых изделий, степени автоматизации. В состав станочного комплекса в зависимости от технологической задачи входят манипуляторы изделия и пушки, механизм подачи присадочной

Таблица 1

Соответствие между технологическими переходами и техническими средствами

Table 1

Correspondence between technological transitions and technical means

Оперция	Узел	Технические средства
Разрезание	Вакуумная станция Рабочая камера Замкнутое водоохлаждение	Вакуумные насосы Запорная аппаратура (клапаны, затворы) Трубопроводы Фильтры Масляные ловушки Приборы Датчики давления Датчики температуры Устройство контроля и управления Оболочка Иллюминаторы Откатная крышка Патрубки Чиллер Трубопроводы Запорная аппаратура Датчик давления Фильтры
Установка изделия	Манипулятор изделия Задняя бабка	Сварная рама Планшайба Направляющие Шариковинтовая пара Электродвигатели Сервоприводы Устройство управления Комплект электрической разводки
Позиционирование пушки	Манипулятор пушки	Направляющие Шариковинтовая пара Электродвигатели Сервоприводы Устройство управления Комплект электрической разводки
Сварка	Энергетический блок Станочный комплекс Устройство видеонаблюдения	Пушка Источники питания Блок управления Вакуумный насос Комплект силовой разводки Исполнительные механизмы станочного комплекса Видеокамера Стробоскоп Фильтры Блок обработки изображения Память

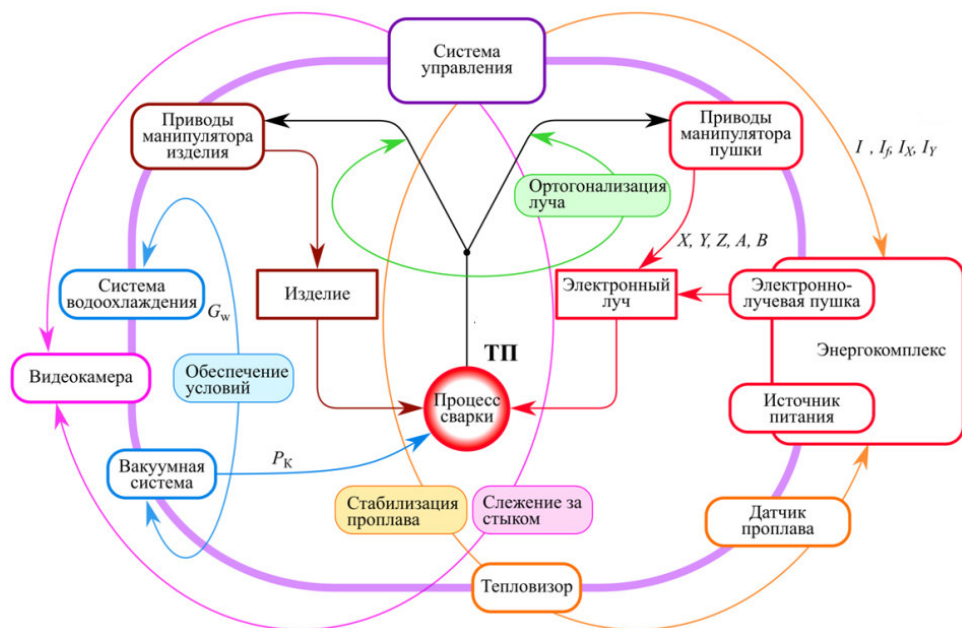


Рис. 4. Концептуальная модель установки ЭЛС (I – ток сварки, I_f – ток фокусировки, I_x, I_y – токи отклонения пучка по осям X и Y , P_k – рабочее давление в камере, X, Y, Z, A, B – координаты перемещения пушки по осям, G_w – расход воды)

Fig. 4. Conceptual model of the ELW installation (I is the welding current, I_f is the focusing current, I_x, I_y are the beam deflection currents along the X and Y axes, P_k is the working pressure in the chamber, X, Y, Z, A, B are the coordinates of the gun movement along the axes, G_w – water consumption)

проволоки, задняя бабка, исполнительные механизмы для выполнения вспомогательных операций и др. По конструктивному исполнению манипуляторы пушки и изделия подразделяются на универсальные и специализированные. Универсальные манипуляторы, как правило, многоосевые, применяются для сварки изделий широкой номенклатуры; специализированные манипуляторы – для сварки однотипных изделий.

Станочный комплекс, представленный на рис. 5, обеспечивает взаимосвязанное перемещение электроннолучевой пушки и изделия по замкнутому и незамкнутому контурам в соответствии с управляющей программой. Манипулятор изделия, помимо трех линейных перемещений по осям X , Y и Z , обеспечивает наклон закреплённого изделия с оснасткой и вращение планшайбы. Исполнительные механизмы обеспечивают перемещение двух электронных пушек в горизонтальном и вертикальном направлениях. Процесс сварки может происходить на наклонных, конусных, сферических поверхностях.

Станочный комплекс, представленный на рис. 6, включает в себя манипулятор электроннолучевой пушки и манипулятор изделия. Манипулятор пушки обеспечивает перемещение пушки в продольном, поперечном, вертикальном направлениях (оси X , Y и Z) и вращение в плоскостях XZ и YZ (оси A и B). Манипулятор изделия обеспечивает вращение (ось W) и дополнительное поперечное перемещение (ось Y_1) изделий.

В состав энергетического комплекса входят электронная пушка, вакуумный насос, узел охлаждения, устройство управления, комплект источников питания, включая высоковольтный. Основные параметры энергетического комплекса определяются толщиной и теплофизическими свойствами свариваемых материалов, требованиями к коэффициенту формы проплавления. По ускоряющему напряжению сварочные пушки подразделяются на низковольтные (10...30 кВ), средневольтные (40...60 кВ) и высоковольтные (100...200 кВ).

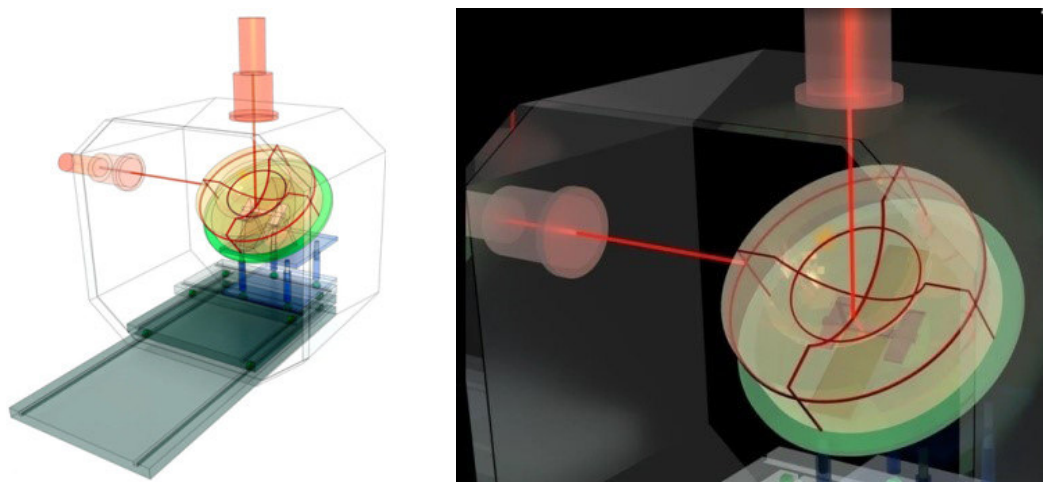


Рис. 5. Станочный комплекс: 5-осевой манипулятор изделия, два одноосевых механизма пушек
 Fig. 5. Machine complex: 5-axis product manipulator, two single-axis gun mechanisms

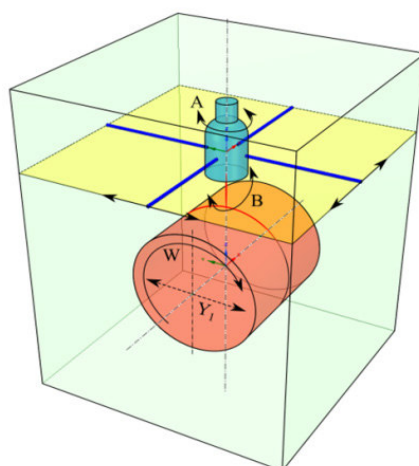


Рис. 6. Станочный комплекс: 5-осевой манипулятор электронной пушки, 2-осевой манипулятор изделия
 Fig. 6. Machine complex: 5-axis electron gun manipulator, 2-axis product manipulator

В пушках используются прямо- и косвенно-накальные источники электронов (катоды). Прямо-накальные вольфрамовые или танталовые катоды изготавливаются из металлических лент и допускают высокотемпературный нагрев до 2400...2600°С. В качестве косвенно-накальных применяются катоды из вольфрама, тантала и гексаборида лантана LaB_6 . Эмиссионные свойства катода из гексаборида лантана превосходят все известные высокотемпературные катоды.

Вакуумная система установки состоит из набора насосов, запорной аппаратуры, трубопроводов, фильтров, ловушек и обеспечивает создание и поддержание необходимого разрежения в рабочей камере ($1,33 \cdot 10^{-2}$ Па) и в пушке ($6,65 \cdot 10^{-3}$ Па). В зависимости от исполнения, технических требований установки оснащаются турбомолекулярными, криогенными и/или диффузионными насосами.

Конструкции установок для ЭЛС определяются размером и геометрической формой рабочей камеры, составом станочного комплекса и вакуумных станций, типом энергетического комплекса, набором программно-аппаратных средств системы управления.

Информационная стратегия

При проектировании оборудования ЭЛС к числу наиболее наукоемких задач относится разработка информационного обеспечения и программно–аппаратных средств системы управления (СУ), представляющей собой особый класс динамических систем, которые отличаются наличием самостоятельных функций и целей управления, высоким уровнем системной организации. На информационной страте рассматривается множество взаимосвязанных подсистем управления, выполняющих самостоятельные и общесистемные функции управления и передачи данных. Элементами информационной стратегии являются оборудование вычислительных цифровых сетей, промышленные компьютеры (ПК), устройства числового программного управления (ЧПУ), программируемые логические контроллеры (ПЛК), микропроцессорные и аналоговые устройства.

С развитием мультипроцессорных СУ появилась возможность создания целостных производственных систем ЭЛС, 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 подготовки управляющей программы устройства ЧПУ.

Диаграмма уровней управления с расшифровкой атрибутов, операций и обязанностей представлена на рис. 7. 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 разводок, минимизирует электромагнитные помехи на измерительные цепи.

Вычислительный потенциал промышленного компьютера позволяет выполнить задачи расчета технологического режима ЭЛС на базе математической модели (ММ), визуализации элементов оборудования и параметров процесса, документирования параметров и др. Устройство ЧПУ обеспечивает управление как механическими перемещениями, так и параметрами энергетического комплекса. Управление процессом получения разреза в рабочей камере и вспомогательными механизмами осуществляется с помощью программируемого логического контроллера.

Основные функции СУ определяются через совокупность её внешних взаимодействий:

- управление механизмами перемещения изделия и электроннолучевой пушки (геометрическая задача);
- последовательно–параллельное управление дискретными механизмами, элементами вакуумных станций (логическая задача);
- взаимосвязанное управление энергокомплексом и приводами механических перемещений (технологическая задача);
- организация интерфейса с оператором (терминальная задача);
- документирование параметров ЭЛС (архивная задача);
- идентификация состояния основных элементов установки, формирование файлов состояния элементов, файлов событий и аварийных ситуаций (диагностическая задача);
- математическое моделирование ЭЛС (задача оптимизации);
- диспетчеризация приведённых выше задач (системная задача).

Решение геометрической и технологической задач управления обеспечивает устройство ЧПУ, которое представляет собой управляющую машину реального времени, имеющую набор периферийных модулей для управления технологическим процессом. Устройство ЧПУ обеспечивает выполнение следующих функций: числовое программное управление исполнительными механизмами станочного комплекса; программирование профилей токов пучка, фокусировки, отклоне-

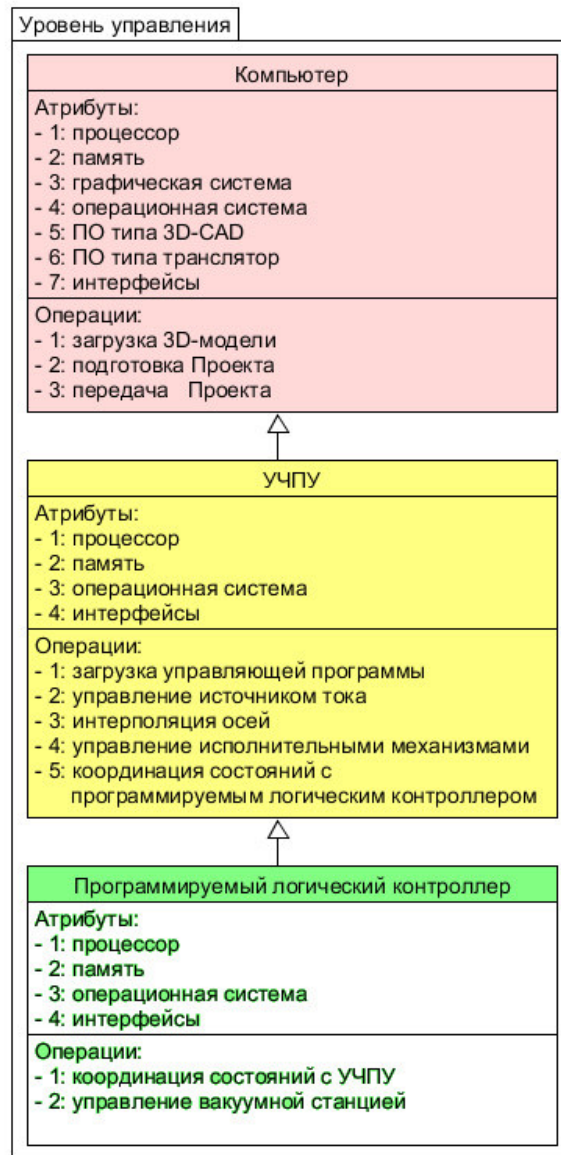


Рис. 7. Структура системы управления
 Fig. 7. Structure of the management system

ния пучка по осям X и Y , амплитуды развертки; реализацию режима "Обучение". Токи сварки, фокусировки, отклоняющих катушек, амплитуды развертки являются программно-задаваемыми параметрами и в процессе отработки программы могут изменяться по линейному закону.

Управляющая программа процесса сварки составляется в стандартных G-кодах и M-функциях. При этом обеспечивается программирование и интерполяция механических осей и тока сварки. Пример задания различных контуров в управляющей программе в стандартных G-кодах приведен ниже:

- N1G0P50Q670
- N2G1G90P150Q700F50
- N3S100
- N4X5.5Y120F450
- N5V5W7F5

В первом кадре задана функция G0 (быстрое позиционирование), поэтому ток пучка (ось P) и ток фокусирующей линзы изменяется мгновенно от текущего значения до 50 мА и 670 мА соответственно. Во втором кадре включается функция G1 (линейная интерполяция), токи пучка и фокусировки линейно возрастают до 150 мА и 700 мА. Скорость нарастания тока определяет значение функции F. В третьем кадре задаётся амплитуда развертки (S), в четвертом кадре – перемещение пушки по осям X и Y с контурной скоростью 450 мм/мин, в пятом кадре – токи отклонения 5 мА и 7 мА соответственно (оси V и W).

В качестве управляющей компоненты для решения логической задачи применяется программируемый логический контроллер, программно-аппаратные средства которого организуют последовательное выполнение операций по управлению исполнительными элементами вакуумных станций, рабочих и вспомогательных механизмов в соответствии с заданным алгоритмом работы. Вакуумные станции обеспечивают откачку воздушной среды из рабочей камеры с помощью низко- и высоковакуумных насосов, запорной аппаратуры. Контроль давления в камере и рабочих точках осуществляется от вакуумных датчиков.

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.

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 СУ обеспечивает перевод установки в безопасное состояние, на мониторе появляется окно, в котором отображается код ошибки, описание ошибки и рекомендации оператору.

СУ в режиме реального времени выполняет документирование основных технологических параметров процесса сварки (архивная задача): время (общее время и время включения), токи пучка, фокусировки, отклонения, 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.

На информационном уровне исследуются задачи оперативного управления на основе общего контроля состояния процесса ЭЛС. С развитием мультипроцессорных СУ, построенных на базе устройств ЧПУ, промышленных компьютеров, сетевых программируемых логических контроллеров и устройств видеонаблюдения появилась возможность создания целостных производственных систем ЭЛС, базирующихся на принципах комплексной автоматизации основных и вспомогательных технологических операций, лёгком и удобном для использования интерфейсе оператора к информационным и вычислительным ресурсам.

Измерительная стратегия

На измерительной страте рассматриваются средства контроля процесса ЭЛС и диагностики оборудования. Элементами измерительной стратегии, образующими интерфейс между подсистемами технологической и информационной стратегий, являются видеокамеры, электронные приборы и нормализаторы, фотодатчики положения исполнительных механизмов, расходомеры, датчики давления и воды, преобразователи, различные средства измерительной техники и др. Наряду с переменными, доступными для контроля посредством прямых измерений, процесс ЭЛС характеризуется переменными, которые рассчитываются косвенными измерениями.

Важное значение для получения качественного сварного соединения имеет контроль положения стыка в процессе сварки с помощью современных электронных и оптических устройств и приборов [17–18].

Работа видеоконтрольного устройства основана на принципе использования информации о состоянии поверхности изделия в потоке вторичных электронов, возникающих при бомбардировке поверхности изделия пучком электронов. Электронный пучок прочеркивает на поверхности изделия прямоугольный растр, вторичные электроны, отраженные от поверхности изделия, попадают на металлический диск (коллектор), изолированный от пушки. После обработки электрический сигнал усиливается и подводится к управляющему электроду лучевой трубки, на экране которой формируется изображение поверхности изделия.

Видеоконтрольное устройство [16] применяется в трех режимах: настройка пучка на стык, "Обучение", слежение за стыком в процессе сварки. Функция настройки пучка на стык осуществляется до начала операции сварки. В процессе сварки управление пространственным положением пушки относительно кромок изделия осуществляется с помощью устройства числового программного управления (ЧПУ). В этом случае, технологический режим сварки должен обеспечивать минимальные тепловые деформации, исключающие нарушение геометрических параметров стыка.

В режиме "Обучение" видеоустройство совмещает пучок со стыком в ряде точек по траектории стыка. Измеренные координаты запоминаются в параметрах и затем используются в управляющей программе устройства ЧПУ. Во время сварки осуществляется взаимосвязанное перемещение пучка и изделия по записанным точкам с помощью линейной или круговой интерполяции.

Первоначально видеоустройства, реализованные на принципе использования токов вторичной эмиссии, из-за технических сложностей не обеспечивали наблюдение за стыком при рабочих токах сварки. В дальнейшем были разработаны устройства, обеспечивающие режим слежения за стыком в процессе сварки с помощью модуляции токов пучка, фокусировки и отклоняющих катушек: пучок периодически при малом токе сканирует стык впереди ванны в течение 5 мс и затем возвращается в ванну расплава для продолжения процесса с рабочим током. Режим активного слежения за положением ванны расплава обеспечивает контроль и управление положением пучка относительно стыка. Применяются два способа управления по стыку: электромагнитное отклонение пучка и/или его механическое перемещение в направлении, перпендикулярном траектории стыка. При механическом перемещении пучка отключается контроль устройства ЧПУ над соответствующей осью, которая переводится в режим слежения по сигналу от видеоконтрольного устройства. После сварки электрические приводы вновь подключаются к устройству ЧПУ. Слежение за стыком в реальном масштабе времени существенно снижает требования к точности механизмов электромеханической системы установки. При этом, уменьшается трудоёмкость подготовки управляющей программы.

Блок определения проплава обеспечивает автоматический контроль сквозного проплавления соединения. Регулирование тока пучка осуществляется с учетом информационного сигнала от датчика-резистора, один конец которого соединен с корпусом рабочей камеры установки, а другой – с коллектором электронов, проникающих через сквозной парогазовый канал.

Основной задачей управления процессом ЭЛС является получение бездефектного сварного соединения с заданной структурой и требуемыми свойствами. В связи с этим разработка средств оптического наблюдения и контроля за процессом ЭЛС (рис. 8) открывает новые возможности по увеличению способов его управления и разработке алгоритмов адаптивного управления.

Устройство оптического наблюдения состоит из объектива, микропроцессорного блока обработки информации, промышленного компьютера для оцифровки и визуализации области сварки. Для защиты оптики видеокамеры, находящейся в рабочей камере установки, от засветки и напыления парами металла используются стробоскоп и фильтры. Оптическое устройство обеспечивает настройку пучка на стык и режим слежения в процессе ЭЛС. На рис. 9 приведен кадр из видеонаблюдения при настройке пучка на стык свариваемого изделия, а на рис. 10 – числовая матрица этого изображения. Синим цветом выделена линия центра стыка, желтым цветом – след от электронного пучка. Точность ввода пучка в стык составляет $\pm 0,05$ мм [17].

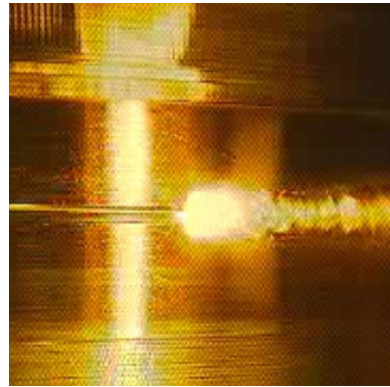


Рис. 8. Формирование сварного соединения

Fig. 8. Formation of a welded joint



Рис. 9. Кадр видеонаблюдения за стыком

Fig. 9. Surveillance frame behind the joint

149	110	169	122	125	142	127	149	141	115	165	119	122	122	100	118	113	102	119	100	114
156	117	164	132	135	143	136	154	146	111	161	127	124	124	113	114	108	116	111	108	109
143	176	110	159	150	138	166	136	140	159	100	147	129	117	146	97	125	134	98	142	101
153	155	150	140	148	150	137	129	133	141	127	121	129	109	108	120	128	106	121	120	109
143	121	149	121	131	136	123	170	129	116	157	117	121	137	97	153	100	117	145	82	139
170	182	160	184	166	164	164	143	149	132	120	142	131	127	142	89	120	127	97	129	91
135	145	116	134	136	125	145	98	124	137	89	114	114	95	119	92	122	109	92	126	82
144	125	143	121	132	138	109	144	110	107	134	98	107	121	78	139	89	100	129	72	124
151	155	148	140	136	149	156	148	140	132	125	121	121	117	117	99	108	108	105	105	106
149	164	130	151	148	140	148	91	121	132	78	110	103	76	131	80	127	111	83	141	84
139	123	132	136	138	125	119	150	128	114	144	127	119	125	103	134	106	109	125	96	117
172	146	175	142	146	167	148	165	147	132	152	114	129	124	125	143	111	128	119	100	127
149	189	133	188	175	136	169	117	144	169	98	161	132	120	145	106	141	110	113	143	96
176	166	175	162	161	169	147	153	151	145	139	126	136	134	119	113	107	108	116	107	109
167	129	173	124	132	163	135	160	130	108	152	98	117	107	120	146	90	120	112	79	124
146	181	131	178	164	132	174	128	154	170	100	152	126	116	131	97	128	97	86	119	76
150	158	144	154	150	141	145	136	145	147	119	127	128	125	116	99	111	98	105	111	94
182	135	191	131	139	181	138	171	133	112	177	111	136	125	105	137	70	111	118	71	130
115	139	104	136	126	104	117	88	105	113	61	91	78	71	82	61	90	64	56	79	46
81	107	64	90	85	75	75	70	62	61	68	126	141	40	57	26	48	40	36	52	31
141	102	151	112	103	121	108	119	64	79	211	213	224	79	64	33	25	30	31	39	61
135	111	132	107	123	111	89	105	90	172	250	243	247	210	187	170	161	179	165	139	124
74	103	54	82	84	67	76	65	103	202	208	230	151	92	131	104	124	96	90	68	37
126	135	126	136	104	126	116	88	101	148	165	179	86	46	70	79	52	56	61	42	65
111	85	113	86	92	91	85	91	103	162	228	169	74	81	83	103	70	67	68	60	80
186	174	173	160	190	160	152	155	136	148	169	135	108	153	142	110	128	108	101	138	95
149	160	145	156	129	147	153	121	129	141	101	109	116	97	100	93	83	90	97	91	90
156	123	186	128	146	146	129	156	129	130	124	92	113	92	101	145	108	92	131	84	105
149	170	135	153	150	141	133	135	128	128	125	114	119	109	114	102	105	103	89	93	85
145	186	122	171	155	148	149	118	131	115	96	115	99	108	130	90	112	119	78	107	83
139	128	180	143	145	136	121	135	112	112	117	104	110	111	90	126	96	81	111	73	89
165	121	187	139	136	125	115	142	112	117	129	103	117	112	95	102	91	85	87	76	77
150	185	120	171	145	138	159	122	142	126	105	125	107	111	133	85	112	121	73	109	80
145	185	127	159	152	148	151	129	140	131	117	124	115	110	91	115	93	82	99	73	82
159	127	185	131	142	136	107	130	105	112	120	95	109	99	70	125	72	87	91	60	93
159	164	140	161	145	111	120	110	106	96	88	95	88	95	130	73	105	97	79	88	64
166	174	171	178	133	130	122	100	122	119	107	118	96	105	112	87	104	90	82	88	70
158	158	199	150	132	139	126	150	101	98	103	80	107	101	79	119	92	84	88	81	85

Рис. 10. Числовая матрица кадра видеонаблюдения за стыком

Fig. 10. Numerical matrix of the video surveillance frame for the joint



Рис. 11. Кадр перед замыканием кольцевого шва
 Fig. 11. Frame before closing the circumferential seam

При ЭЛС часто возникают такие дефекты, как корневая пила, паровые полости, неполномерность, начальные и конечные дефектные участки. Для устранения корневой пилы, занижений с лицевой стороны шва, непроваров в начале шва и кратеров в конце шва, на стадии проектирования необходимо предусмотреть технологический припуск.

Важными стадиями процесса ЭЛС являются формирование ванны расплава, заварка кратера, перекрытие шва. Момент формирования сварного соединения перед перекрытием кольцевого шва показан на рис. 11. Для уменьшения размеров кратера применяется плавное уменьшение тока сварки и вывод пучка из стыка.

При использовании двух видеокамер можно получать объемное изображение процесса ЭЛС, т. е. контролировать выпуклость ванны расплава и следовательно управлять геометрической формой ванны.

Сварочное оборудование может также оснащаться тепловизором, обеспечивающим измерение температурного поля в области ванны расплава. Оптическая камера, направленная на зону плавления, обрабатывает сигналы, пропорциональные энергии излучения, и передает по цифровому протоколу информацию в компьютер, на котором выполняется обработка полученных данных и визуализация теплового изображения поверхности изделия. Использование тепловизора расширяет возможности управления, способствует формированию сварного соединения с заданной структурой, компенсирует недостатки априорной технологии.

Современные электронно-оптические и оптические средства позволяют контролировать важные параметры процесса ЭЛС. Автоматизация процесса ЭЛС подразумевает разработку наукоемких математических моделей и реализацию адаптивных алгоритмов управления с использованием программно-аппаратных средств видеонаблюдения.

Алгоритмическ я стр т

На алгоритмическом уровне рассматриваются алгоритмы управления, математические модели (ММ), технологические карты процесса ЭЛС. Элементами данной страты являются алгоритмы управления, записанные в виде программ на алгоритмических языках в памяти микропроцессорных устройств. Проектирование операции ЭЛС осуществляется на двух уровнях: формирование структуры операции (выбор кинематической схемы сварки, предварительный прогрев стыка, осцилляция пучка, непрерывный/импульсный режим, заварки кратера и др.) и оптимизация значе- ний параметров технологического процесса.

Значение математического моделирования для изучения влияния технологических параметров на свойства изделий постоянно возрастает. Средства инженерного анализа, основанные на численных методах, стали важной частью проектирования операции сварки. К числу пакетов, ориентированных на решение междисциплинарных задач, относятся, в частности, пакеты

Ansys CFX, Ansys Fluent, LS-DYNA и др. Математическое моделирование ЭЛС основывается на тщательном изучении физики гидрогазодинамических, тепло- и массообменных, динамических процессов. Методы математического моделирования позволяют учесть мультидисциплинарный характер процесса сварки, обеспечить высокую степень точности вычислений, выбрать оптимальные значения параметров технологического процесса ЭЛС.

Разработка наукоемких моделей для известных и новых материалов является одной из актуальнейших задач, имеющей большое прикладное значение. В основе моделирования процесса ЭЛС лежит решение нелинейных дифференциальных уравнений изменения энергии, изменения количества движения (уравнения Навье–Стокса) и уравнения неразрывности. Моделирование фазовых переходов материала изделия основано на решении задачи Стефана с привлечением нелинейной зависимости скорости движения границы раздела фаз от температуры. При моделировании необходимо учитывать зависимость теплофизических свойств материала изделия (удельной теплоемкости, теплопроводности и плотности) от температуры.

Особенностью процесса формирования слоя электронным пучком является движение жидкой проводящей поверхности под действием электрического и магнитного полей.

Уравнения теплопроводности с учётом влияния жидкого проводящего слоя в электромагнитном поле имеет следующий вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + f - \delta_s L V_n + \rho_{\text{пр}} j^2.$$

Здесь c – теплоемкость материала, λ – коэффициент теплопроводности материала, ρ – плотность материала, T – температура, f – плотность теплового источника, δ_s – поверхностная δ -функция, V_n – скорость движения границы фазового перехода по нормали, L – энтальпия фазового перехода, $\rho_{\text{пр}}$ – проводимость жидкого металла, j – плотность тока внутри жидкости.

Поверхность ванны расплава стремится принять свою равновесную форму под влиянием силы тяжести и сил поверхностного натяжения. Дифференциальное уравнение движения жидкости имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \nabla) \bar{v} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \frac{\mu}{3\rho} \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{v} + \frac{\mu}{\rho} \Delta \bar{v} - \sigma R \delta(\varphi) \nabla \varphi.$$

Здесь \mathbf{g} – ускорение свободного падения; ρ – плотность; p – давление; μ – коэффициент динамической вязкости; $\bar{v} = (v_x, v_y, v_z)$ – вектор эффективной скорости расплава, рассчитываемый через истинную скорость жидкой фазы, R – искривление линии раздела двух фаз; φ – расстояние от текущей линии раздела двух фаз до нулевого интерфейса; $\delta(\varphi)$ – волновая функция от φ .

Уравнение неразрывности имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{v}) = 0.$$

В качестве прикладного инструмента для численного моделирования ЭЛС используются пакеты 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).

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 СУ.

Системный уровень

На системном уровне 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 данном уровне анализируются все технические и экономические вопросы, задаются проектные ограничения.

Оптимальные значения параметров процесса ЭЛС рассчитываются с учётом вектора критериев оптимизации K , компоненты которого являются функциями исходных, рассчитываемых и искомым параметров. В качестве критериев векторной оптимизации процесса можно выбрать следующие экономические и технологические показатели: K_1 – приведённые затраты, K_2 – производительность процесса.

Анализ ряда работ по методам решения задач многоцелевой оптимизации показал эффективность её построения по модульно–иерархическому принципу. Разбиение подсистемы многоцелевой оптимизации на три уровня обусловлено сложностью рассматриваемой задачи. Нижний уровень подсистемы определяет способ задания и структуру множества альтернатив управляющих параметров процесса и соответствующее им множество частных критериев оптимизации. На среднем уровне подсистемы значительно сокращается допустимое множество вариантов выбора параметров ТП путем определения их эффективных (Парето–оптимальных) значений. Простейшим методом приближенного построения множества Парето можно считать ЛП–поиск, обеспечивающего заполнение области возможных решений в многомерном пространстве параметров равномерно расположенными пробными точками, в каждой точке определяют значения всех критериев и исключают неэффективные. Численная реализация моделей этого уровня позволяет сформировать пакет эффективных решений. На верхнем уровне из этого пакета выбирается единственный наилучший вариант.

Простейшим методом приближенного построения множества Парето можно считать ЛП–поиск, который представляет собой модификацию метода случайного поиска, пригодную для решения задач нелинейного программирования при большой размерности многоцелевой функции [19]. Метод осуществляет заполнение области возможных решений в многомерном пространстве параметров равномерно расположенными пробными точками Q_1, Q_2, \dots . Для каждой точки исследуемого пространства параметров вычисляются значения всех критериев, по которым составляются таблицы испытаний, где эти значения расположены в порядке возрастания или убывания. Численная реализация моделей этого уровня позволяет сформировать пакет эффективных решений. На верхнем уровне из этого пакета выбирается единственный наилучший вариант.

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

3 заключение

Понимание внутренних закономерностей производства с помощью теории иерархических систем позволяет выявить различные способы декомпозиции сложной системы в виде иерархий абстрагирования, организации и сложности принятия решений. Стратифицированное представление ПС 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 ЭЛС, которая характеризуется последовательным вертикальным расположением подсистем, приоритетом действий подсистем верхнего уровня, зависимостью действий подсистем верхнего уровня от фактического исполнения нижними уровнями своих функций.

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., Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Волков К.Н. Наука, искусство, технологии: монография. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 706 с.
- [3] Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева, В.Г. Митрофанова. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
- [4] Месрович М., Мико Д., Тихон И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
- [5] Sabchevski S.P., Mladenov G.M., Wojcicki S., Dabek J. An analysis of electron guns for welding // Journal of Physics. 1996. V. 29. Is. 6. Pp. 1446–1456.
- [6] Chiang S., Albright C.E. The limit of joint penetration in high energy density beam welding // Welding Journal. 1993. № 3. Pp. 117–121.
- [7] Gross P.M. Technical note: creating deeper electron beam penetration // Welding Journal. 1993. № 2. Pp. 61–62.
- [8] Borrow N.P. New low cost electron beam welder // Metallurgia. 1993. V. 60. Is. 1. Pp. 36–43.
- [9] Соколов Ю.А., Пивушин Н.В., Кондратьев С.Ю. Новые аддитивные технологии с использованием пучка ионов // Вестник машиностроения. 2016. № 9. С. 72–76.
- [10] Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Часть 1. Технологические особенности процесса // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2016. № 1 (727). С. 30–35.
- [11] Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Часть 2. Практические результаты на примере сплава ВТ6 // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2016. № 3 (729). С. 40–44.
- [12] 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.
- [13] Будкин Ю.В., Сивов Е.Н., Соколов Ю.А. Электроннолучевая сварки. – М.: ДПК Пресс, 2010. – 96 с.
- [14] Рамбо Дж., Блэк М. UML 2.0. Объектно-ориентированное моделирование и разработка. – СПб.: Питер, 2007. – 544 с.
- [15] Новиков Ф., Иванов Д. Моделирование на UML. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 200 с.
- [16] Глазов СИ., Люшинский А.В., Могитов В.С. и др. Основы технологии электронно-лучевой и диффузионной сварки. – Рыбинск: НПО «Сатурн», 2001. – 284 с.
- [17] Соколов Ю.А., Пивушин Н.В. Особенности управления процессом электроннолучевой сварки // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2022. № 10. С. 11–15.
- [18] Шолохов М.А. Траекторные задачи при автоматической и роботизированной сварке. Методы и алгоритмы решения, датчики, программно-аппаратные средства. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 168 с.
- [19] Хоменок 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, Yu.A. Sokolov, S.Yu. Kondratyev, K.N. Volkov**, Nauka, iskusstvo, tekhnologii: monografiya. – SPb.: POLITEKKh-PRESS, 2022. – 706 s.
- [3] Avtomatizirovannoye proyektirovaniye i proizvodstvo v mashinostroyenii / Pod obshch. red. Yu.M. Solomentseva, V.G. Mitrofanova. – M.: Mashinostroyeniye, 1986. – 256 s.
- [4] **M. Mesarovich, D. Mako, I. Takakihara**, Teoriya iyerarkhicheskikh mnogourovnevnykh sistem. – M.: Mir, 1973. – 344 s.
- [5] **S.P. Sabchevski, G.M. Mladenov, S. Wojcicki, J. Dabek**, An analysis of electron guns for welding // Journal of Physics. 1996. V. 29. Is. 6. P. 1446–1456.
- [6] **S. Chiang, C.E. Albright**, The limit of joint penetration in high energy density beam welding // Welding Journal. 1993. № 3. P. 117–121.
- [7] **P.M. Gross**, Technical note: creating deeper electron beam penetration // Welding Journal. 1993. № 2. P. 61–62.
- [8] **N.P. Borrow**, New low cost electron beam welder // Metallurgia. 1993. V. 60. Is. 1. P. 36–43.
- [9] **Yu.A. Sokolov, N.V. Pavlushin, S.Yu. Kondratyev**, Novyye additivnyye tekhnologii s ispolzovaniyem pu-chka ionov // Vestnik mashinostroyeniya. 2016. № 9. S. 72–76.
- [10] **A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov**, Novyy podkhod k sintezu poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov elektronnykh luchom. Chast 1. Tekhnologicheskiye osobennosti protsessa // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2016. № 1 (727). S. 30–35.
- [11] **S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov**, Novyy podkhod k sintezu poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov elektronnykh luchom. Chast 2. Prakticheskiye rezultaty na primere splava VT6 // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2016. № 3 (729). S. 40–44.
- [12] **A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov**, Algoritm i tekhnologicheskiye protsessy sinteza poroshkovykh detaley elektronnykh luchom v vakuume // Tekhnologiya mashinostroyeniya. 2015. № 1. S. 11–16.
- [13] **Yu.V. Budkin, Ye.N. Sivov, Yu.A. Sokolov**, Elektronoluchevaya svarka. – M.: DPK Press, 2010. – 96 s.
- [14] **Dzh. Rambo, M. Blakha**, UML 2.0. Obyektno-orientirovannoye modelirovaniye i razrabotka. – SPb.: Piter, 2007. – 544 s.
- [15] **F. Novikov, D. Ivanov**, Modelirovaniye na UML. – SPb.: SPbGU ITMO, 2010. – 200 s.
- [16] **S.I. Glazov, A.V. Lyushinskiy, B.C. Magnitov i dr.**, Osnovy tekhnologii elektronno-luchevoy i diffuzionnoy svarki. – Rybinsk: NPO «Saturn», 2001. – 284 s.
- [17] **Yu.A. Sokolov, N.V. Pavlushin**, Osobennosti upravleniya protsessom elektronoluchevoy svarki // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2022. № 10. S. 11–15.
- [18] **M.A. Sholokhov**, Trayektornyye zadachi pri avtomaticheskoy i robotizirovannoy svarke. Metody i algoritmy resheniya, datchiki, programmno-apparatnyye sredstva. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2015. – 168 s.
- [19] **V.V. Khomenyuk**, Elementy teorii mnogotsel'evoy optimizatsii. – M.: Nauka, 1983. – 123 s.

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Yuriy A. SOKOLOV – *Public Joint Stock Company "Electromekhanika"*.
E-mail: s5577@inbox.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0280-0178>

Поступила: 06.11.2022; Одобрена: 07.12.2022; Принята: 20.12.2022.
Submitted: 06.11.2022; Approved: 07.12.2022; Accepted: 20.12.2022.