

Константинов В.В.

Автоматизированная производственная система для электронно-лучевой сварки

К характерным особенностям производственной системы электронно-лучевой сварки (ЭЛС) относятся: разнородность подсистем и элементов, составляющих систему; многокритериальность оценок процессов, протекающих в системе; различная природа информационных связей между подсистемами и элементами; многообразие различных форм связей. Структурное представление производственной системы ЭЛС можно рассмотреть в рамках системного подхода, в основу которого положены следующие принципы: целостность, взаимозависимость системы и среды, целенаправленность, структурность, иерархичность, множественность описания, причинность, многовариантность достижения поставленных целей.

В статье рассматривается установка «ЭЛУ-20РЗ», предназначенная для прецизионной ЭЛС в вакууме круговых, кольцевых, прямолинейных швов изделий из высокопрочных сталей и сплавов на основе никеля, титана, ниобия, молибдена, меди, алюминия, а также разнородных металлических материалов. Стратифицированное описание производственной системы включает семейство моделей на каждом абстрактном уровне (страте) [1]. При этом, каждая страта (системная, алгоритмическая, информационная, измерительная, инструментальная и технологическая) определяется собственными законами, переменными и т.д. (рис. 1).

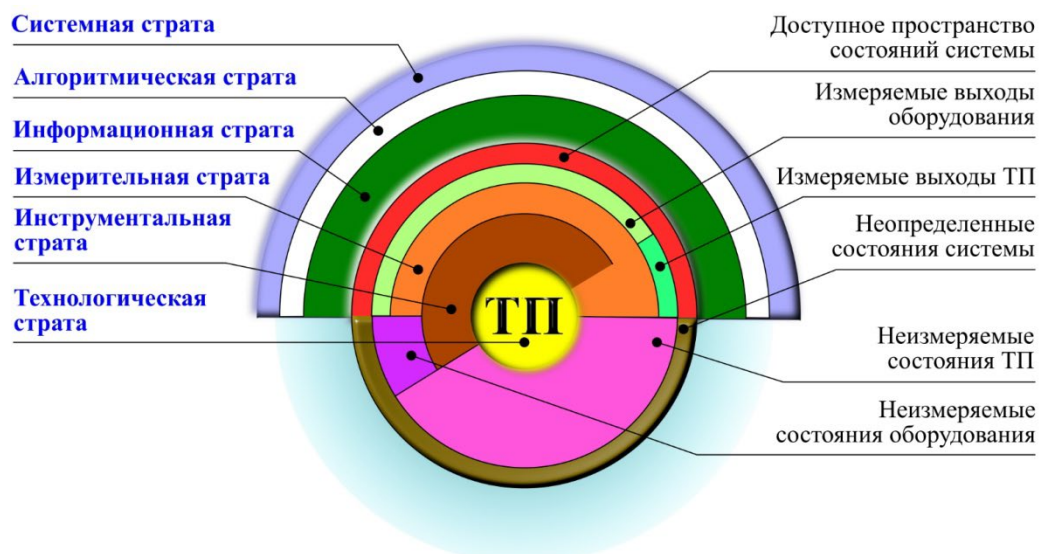


Рис. 1. Стратифицированное представление производственной системы (ТП – технологический процесс)

Технологическая страта. Технологический процесс ЭЛС – многомерный объект управления с векторными входами и выходами измеряемых и неизмеряемых параметров. ЭЛС основана на явлении превращения кинетической энергии электронов в тепловую при их торможении в поверхностных слоях свариваемого изделия. В отличие от дуговых и плазменных источников энергии, производящих нагрев поверхности, электронный нагрев осуществляется в самом веществе на некоторой глубине от поверхности. Процесс ЭЛС проводится в вакууме, что предотвращает окисление и позволяет получать химически чистые изделия.

Процесс ЭЛС характеризуется большим количеством явлений различной физической природы: нагрев, плавление, образование ванны расплава, испарение и др. Кристаллизация материала протекает в условиях больших градиентов температуры, напряжений и деформаций. На качество сварного соединения основное влияние оказывают структура и параметры технологического процесса: рабочее давление в рабочей камере и электронной пушке (Па), ускоряющее напряжение (кВ), ток пучка (мА), скорость сварки (м/ч), ток фокусирующей линзы (мА), рабочее расстояние от пушки до изделия (мм), амплитуда (мм) и частота колебаний электронного пучка (Гц), время импульса и паузы при импульсной сварке (с). Поддержание оптимальных параметров режима обработки и технологических приемов обеспечивает снижение возможности образования дефектов сварных швов (трещины, неполное проплавление, поры, несплошности и т.д.).

Инструментальная страта. На инструментальной страте рассматривается аппаратное обеспечение для выполнения ТП. Элементами подсистемы, соответствующей инструментальной страте, являются единицы специализированного оборудования для реализации ЭЛС.

Целью разработки установки «ЭЛУ-20РЗ» является повышение качества сварного соединения за счет исключения влияния субъективных факторов на процесс посредством закрепления отлаженного нормативного технологического процесса в управляющей программе. Установка включает в себя следующие основные узлы: рабочую камеру, станочный комплекс, энергетический блок, вакуумные станции, узел водяного охлаждения, средства наблюдения, мультипроцессорное устройство управления (рис. 2).

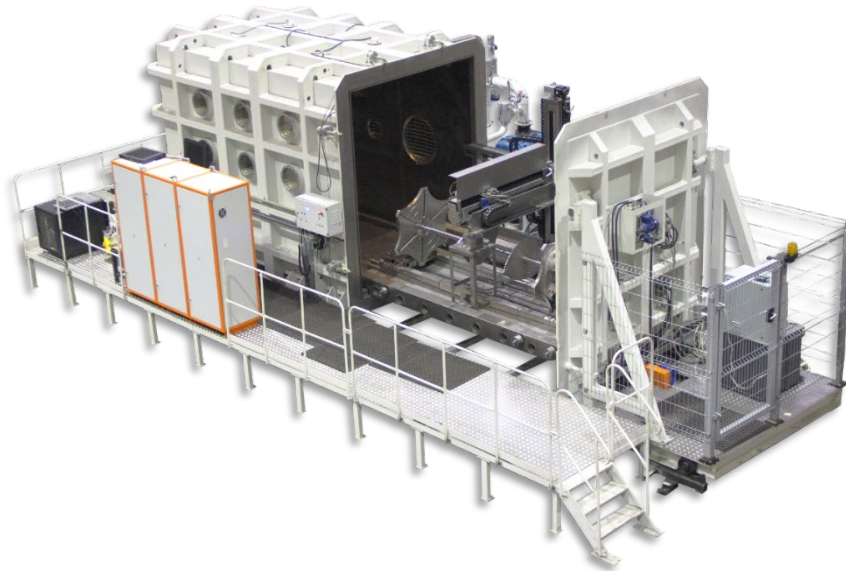


Рис. 2. Общий вид «ЭЛУ-20РЗ»

Технические средства установки «ЭЛУ-20РЗ» выполняют следующие функции: получение вакуумной среды в рабочей камере, наведение пучка на стык, задание технологического режима сварки, взаимосвязанное перемещение пушки и изделия и др. (рис. 3).

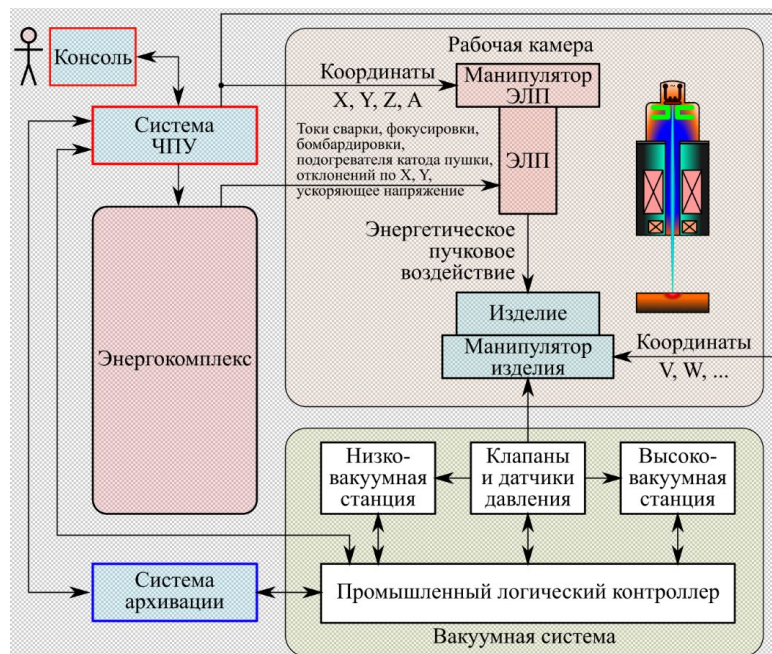


Рис. 3. Структура установки для реализации технологии ЭЛС

Конструкция установки «ЭЛУ-20РЗ» определяется размером и геометрической формой рабочей камеры, составом станочного комплекса и вакуумных станций,

типом энергетического комплекса, набором программно-аппаратных средств системы управления.

Рабочая камера предназначена для создания вакуумного пространства, размещения станочного комплекса и технологической оснастки, защиты от рентгеновского излучения, возникающего в результате торможения ускоренных электронов. Конструкция рабочей камеры «ЭЛУ-20РЗ» представляет собой прямоугольный параллелепипед из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (рис. 4). Для повышения жесткости конструкция усилена ребрами (прямоугольной трубой размером 180×100×8 мм). Габаритные размеры рабочего пространства рабочей камеры составляют 4000 х 2200 х 2750 мм (длина х ширина х высота). В камере с помощью вакуумной станции создается разрежение (менее 1×10^{-4} мм рт. ст.). Для визуального наблюдения за процессом сварки и настройки электронного луча на стык в камере предусмотрено семь иллюминаторов: шесть на лицевой стороне камеры и один – на левой боковой стороне.

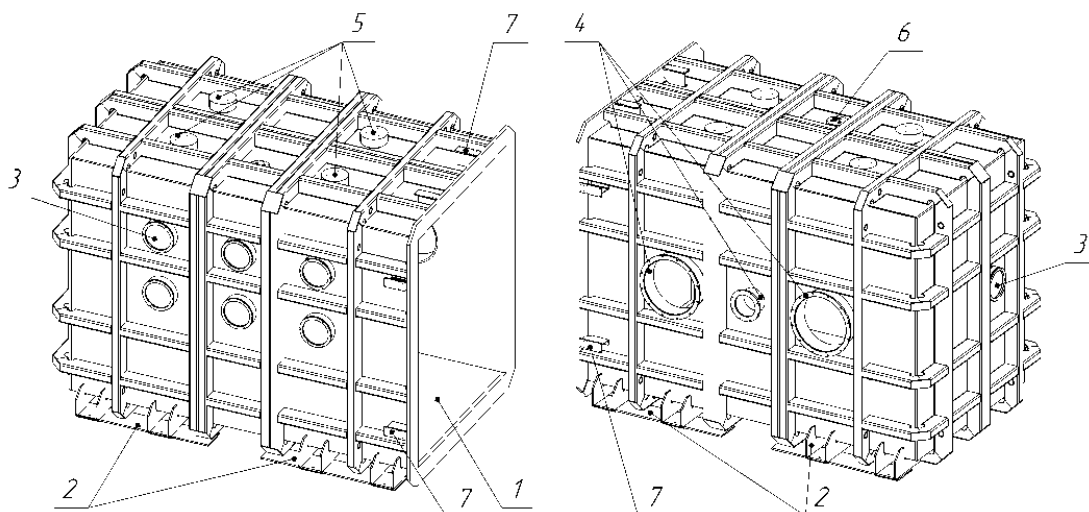


Рис. 4. Рабочая камера (1 - корпус, 2 - плита, 3 - иллюминаторы, 4 - патрубок для стыковки вакуумной станции, 5 - фонари, 6 - гермоввод, 7 - пневматический зажим)

Рабочая камера выполнена с откатной передней крышкой (рис. 5), которая фиксируется в рабочем положении пневматическими цилиндрами. По периметру крышки установлены вакуумные уплотнения.



Рис. 5. Откатная крышка рабочей камеры

К внутренней стороне крышки, обращенной к рабочей камере, крепится станочный комплекс. Это техническое решение позволило существенно снизить передачу микровибраций от стенок камеры, упростить процесс разработки и отладки управляющей программы. С внешней стороны крышка удерживается на стойках тележки, которая перемещается по рельсовому пути, состоящему из двух соединенных между собой секций. Одна из секций крепится к опорам и фундаменту, а другая – к секции и фундаменту.

Станочный комплекс (рис. 6) установки «ЭЛУ-20РЗ», включающий в себя манипулятор электронно-лучевой пушки, манипулятор изделия и заднюю бабку, обеспечивает выполнение сварочных, установочных и транспортных перемещений, которые осуществляются в соответствии с геометрической формой сварных швов. В механизмах станочного комплекса используются высокоточные шариковинтовые пары (ШВП), линейные направляющие, редукторы, современные серводвигатели. Благодаря конструктивным решениям точность позиционирования исполнительных механизмов при линейных перемещениях составляет $\pm 0,05$ мм.

Манипулятор пушки обеспечивает её перемещение в продольном, поперечном, вертикальном направлениях (оси X , Y и Z) и вращение в плоскостях XZ и YZ (оси C и D). Диапазон перемещения пушки по трем линейным осям составляет соответственно 0-3000 мм (X), 0-1200 мм (Y) и 0-1000 мм (Z). В плоскостях XZ и YZ диапазон вращения сварочной головки составляет 0-90° и $\pm 45^\circ$.

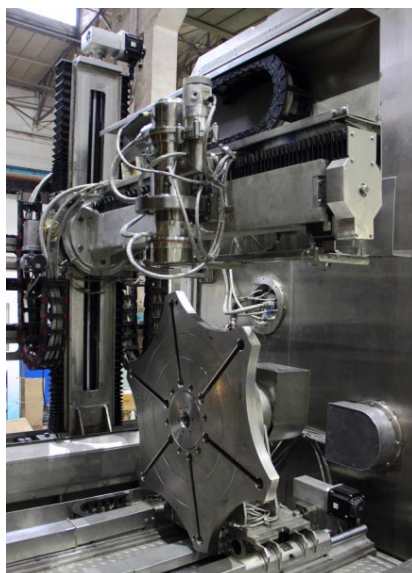


Рис. 6. Общий вид электромеханического комплекса

Конструктивно манипулятор пушки состоит из следующих основных узлов: платформы, колонны, траверсы, механизмов поворота траверсы и пушки (рис. 7). Платформа (сварная пространственная рама из нержавеющей стали) опирается роликами на направляющие и закреплена к откатной крышке с помощью шарнирных кронштейнов. На платформе установлены рельсовые направляющие, по которым перемещается каретка, на которую установлена колонна с траверсой.

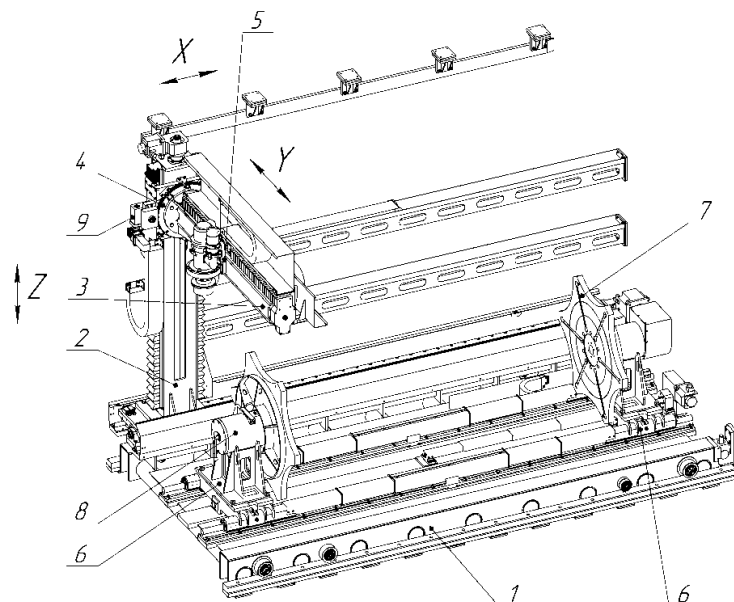


Рис. 7. Станочный комплекс (1 - платформа, 2 - колонна, 3 - траверса, 4 - механизм поворота траверсы, 5 - механизм поворота пушки, 6 - каретка, манипулятор изделия, 8 - задняя бабка 9 - редуктор)

На раме платформы также установлены две рельсовые направляющие цилиндрической формы, по которым перемещаются две каретки, на которых установлены задняя бабка и манипулятор изделия. Каретка манипулятора изделия имеет возможность настроечного продольного перемещения с помощью ШВП (ось *B*). На колонне и траверсе (сварных балках прямоугольного сечения) установлены рельсовые направляющие и винт ШВП, по которым осуществляется перемещение электронно-лучевой пушки соответственно в вертикальном и поперечном направлениях.

Манипулятор изделия состоит из сварного корпуса, шпинделя и планшайбы с шестью Т-образными пазами для крепления заготовки. Манипулятор изделия обеспечивает крепление, позиционирование и вращение (ось *A*) цилиндрических, конических и других объемных изделий с оснасткой массой до 2500 кг (рис. 8). Бабка задняя обеспечивает поджатие свариваемого изделия с горизонтальной осью вращения. Габаритные размеры изделий и сборочных единиц для сварки составляют до 1000 мм (диаметр) и до 2500 мм (длина).

Таким образом, станочный комплекс «ЭЛУ-20РЗ» обеспечивает перемещение по 7 осям: продольное, поперечное и вертикальное перемещение электронной пушки (оси *X*, *Y* и *Z*), вращение сварочной головки в плоскости *XZ* (ось *C*) и в плоскости *YZ* (ось *D*), вращение планшайбы с изделием (ось *A*), перемещение манипулятора изделия в продольном направлении (ось *B*). Интерполяционное перемещение по всем осям осуществляется с помощью устройства числового программного управления NC-310. Контурная скорость регулируется в диапазоне от 0 до 1000 мм/мин.

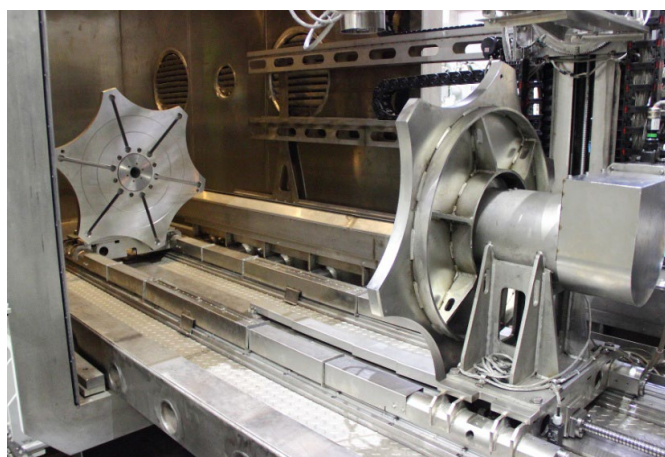


Рис. 8. Манипулятор изделия и задняя бабка

Наиболее важными технологическими параметрами процесса сварки являются пространственное положение электронного пучка и изделия, тип соединения и форма разделки кромок. Станочный комплекс позволяет проводить сварку в нижнем положении и на вертикальной плоскости (рис. 9).

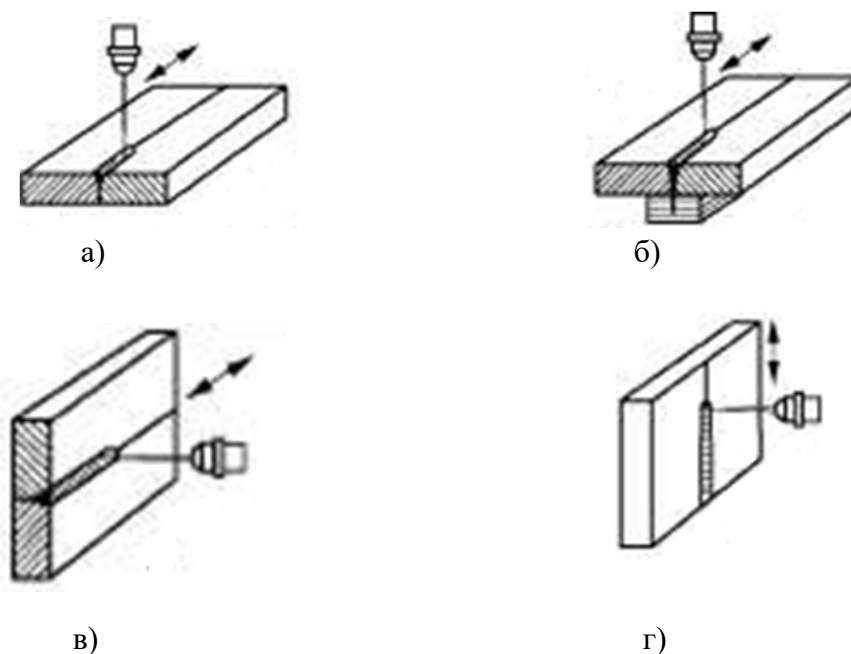


Рис. 9. Схема пространственного расположения сварных швов (а - горизонтальный шов в нижнем положении без подкладки; б - горизонтальный шов в нижнем положении с подкладкой; в - горизонтальный шов на вертикальной плоскости; г - вертикальный шов на вертикальной плоскости)

Для соединения изделий из стали толщиной до 40 мм, титановых и алюминиевых сплавов толщиной до 80 мм, как правило, применяется сварка в нижнем положении (вертикальным электронным пучком) как без подкладки (рис 9а), так и на подкладке (рис 9б). Сварка на вертикальной плоскости осуществляется в горизонтальном (рис 9в) или вертикальном направлении (рис 9г). При сварке на подъем создаются благоприятные условия для более глубокого проплавления и даже небольшого усиления.

Станочный комплекс обеспечивает взаимосвязанное перемещение электронно-лучевой пушки и изделия по замкнутому и незамкнутому контурам в соответствии с заданной управляющей программой (рис. 10).

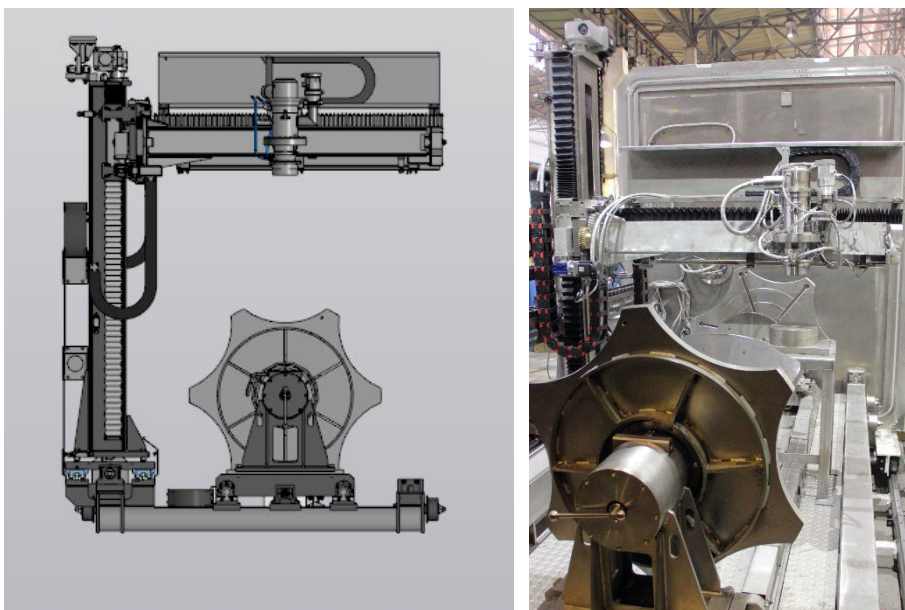


Рис. 10. Расположение манипуляторов станочного комплекса

Установка «ЭЛУ-20РЗ» оснащается энергетическим комплексом типа "ЭЛА-60/60", в состав которого входят устройство управления, высоковольтный источник питания и электронная пушка. Электроннооптическая система пушки формирует пучок электронов с заданными параметрами. Микропроцессорное устройство контролирует все параметры энергокомплекса, обеспечивает необходимые блокировки. Основные технические характеристики энергетического комплекса представлены в табл. 1. Для повышения работоспособности и срока службы катода осуществляется дифференциальная откачка катодного узла пушки с помощью турбомолекулярного насоса Agilent TURBO-V 81M.

Таблица 1. Технические характеристики энергетического комплекса

№	Параметр	Значение
	Ускоряющее напряжение, кВ	60
	Ток сварки, mA	1 до 1000
	Ток фокусировки, mA	300...1000
1	Нестабильность тока пучка в диапазоне 5 – 1000 mA, %	±0,5
2	Пульсации тока пучка в диапазоне 5 – 1000 mA, %	5
3	Нестабильность ускоряющего напряжения, %	±0,5
4	Пульсации ускоряющего напряжения, %	0,5
	Импульсная модуляция тока луча с частотой, Гц	3...500
	Виды разверток	круг, эллипс, синусоида, треугольник и прямоугольник

Получение разрежения ($1,3 \times 10^{-2}$ Па) в рабочей камере выполняется с помощью вакуумных станций (рис. 11), которые представляют собой комплекс взаимосвязанных устройств (насосов, запорной аппаратуры, трубопроводов, фильтров, ловушек), приборов для измерения вакуума, средств контроля и управления. Две низковакуумные станции включают в себя механические золотниковые насосы 2Н160DV, насосы Рутса ZJ-300 и ZJ-900DV1, датчики для измерения вакуума, пневматические клапаны. В состав высоковакуумной станции, обеспечивающей подготовку двух диффузионных насосов НД-630 к работе, входят механический насос TRIVAC D90T и насос Рутса RUVAC WAU-251, пневматические клапаны и датчики давления. На диффузионных насосах установлены ловушки, препятствующая попаданию вакуумного масла в камеру. Контроль за давлением в рабочей камере осуществляется с помощью широкодиапазонного датчика компании VOC-EDWARDS.

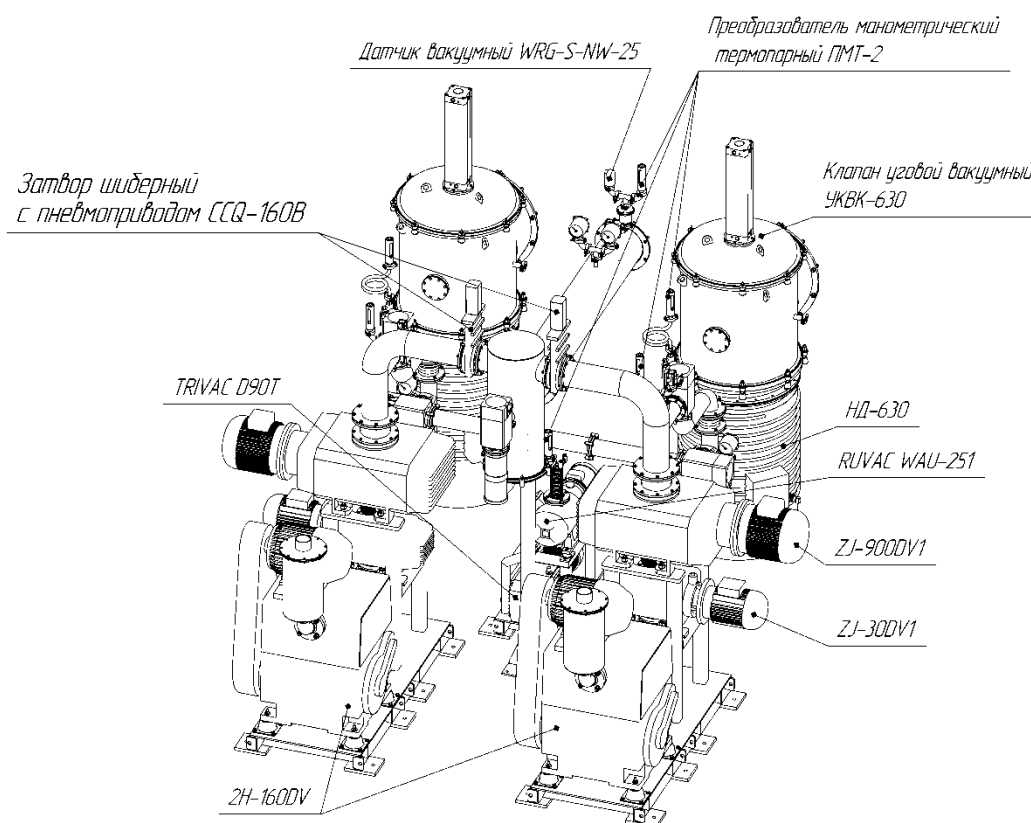


Рис. 11. Вакуумные станции установки «ЭЛУ-20РЗ»

Комплект пневматических средств обеспечивает подачу сжатого воздуха к цилиндрам прижимов откатной крышки и цилиндрам клапанов вакуумной системы. Настройка рабочего давления осуществляется производится регулятором давления,

встроенным в фильтр-регулятор. Питание установки сжатым воздухом – автономное, от компрессора с ресивером.

Узел водяного охлаждения, состоящий из напорно-сливного коллектора, chillера, комплекта датчиков температуры, протока воды и давления, обеспечивает безопасную работу электронно-лучевой пушки, насосов и ловушек. Контроль наличия и температуры воды в каналах охлаждения на выходе выполняется с помощью датчиков протока и температуры.

Измерительная страта. На измерительной страте рассматриваются функции мониторинга состояния процесса ЭЛС и элементов специализированного 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. Общее пространство состояний включает векторы переменных процесса ЭЛС и оборудования. Наряду с переменными, доступными для мониторинга посредством прямых измерений, производственная система сварки характеризуется переменными, которые рассчитываются косвенными измерениями.

Для процесса ЭЛС актуальным является автоматизация следующих операций: сварка изделия по стыку в реальном масштабе времени, реализация режима «Обучение», управление положением кроссовера по глубине стыка в реальном масштабе времени, контроль и управление выпуклостью сварочной ванны. Современные средства контроля, включающие электронные и оптические средства измерения, позволяют контролировать технологические параметры процесса в реальном масштабе времени, например, устройство видеонаблюдения, включающее объектив и модуль цифровой обработки информации, позволяет оцифровывать положение стыка.

Блок определения проплава осуществляет автоматический контроль сквозного проплавления свариваемого соединения. Информационный сигнал снимается с резистора, расположенного в рабочей вакуумной камере, один конец которого соединен с корпусом камеры, а другой с изолированным от корпуса электродом — коллектором электронов тока луча, проникающих через сквозной парогазовый канал. Конструкция коллектора зависит от свариваемой сборки и оснастки.

Информационная страта. 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 [3]. На информационной страте рассматривается множество взаимосвязанных и взаимодействующих 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 (УЧПУ), программируемые логические контроллеры (ПЛК), микропроцессорные и другие аналогичные устройства.

Мультипроцессорная система управления (СУ) установки «ЭЛУ-20РЗ» построена на базе устройства ЧПУ NC-310, промышленного компьютера, программируемого логического контроллера Direct Logic семейства DL-205 (рис. 12).

СУ обеспечивает выполнение следующих функций:

- интерполяционное числовое программное управление осями манипуляторов пушки и изделия по управляющей программе;
- задание контуров параметров энергетического комплекса (тока пучка, тока фокусировки, токов отклоняющих систем по осям X и Y, амплитуды развёртки) в управляющей программе процесса сварки;
- автоматическое управление работой элементами вакуумных станций с возможностью работы в ручном режиме;
- настройка пучка на стык;
- документирование основных параметров сварки (распечатка паспорта сварки детали с указанием даты, номера детали, режима сварки).

Программно-аппаратные средства устройства ЧПУ типа NC-310 позволили совместить в одном вычислительном устройстве основные функции управления механическими перемещениями и параметрами энергетического комплекса, что значительно упростило процесс подготовки управляющей программы ЭЛС. Помимо этого, устройство ЧПУ NC-310 позволяет реализовать режим «Обучение», который обеспечивает запись в энергонезависимую память координат интерполяционных осей непосредственно в процессе настройки пучка на стык.

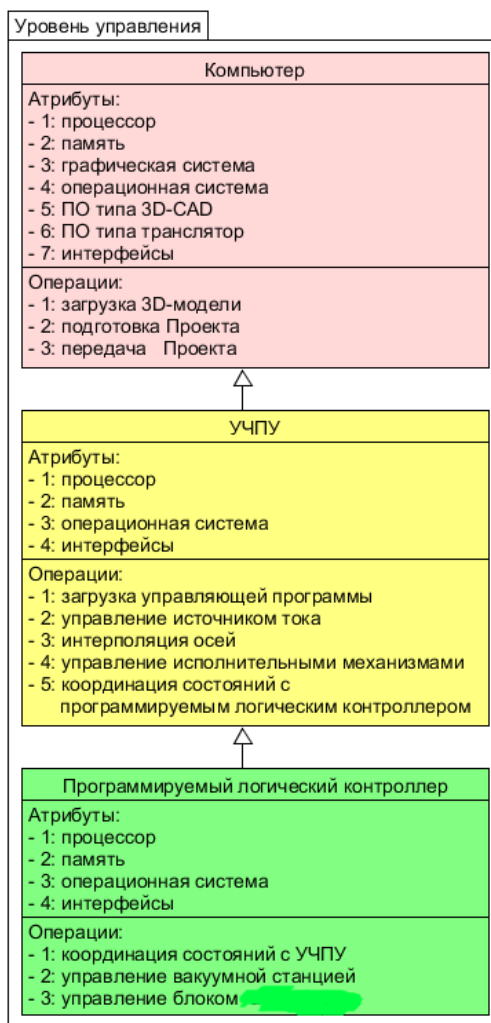


Рис. 12. Уровни управления

Информационный уровень предназначен для решения задач оперативного управления на основе общего контроля состояния процесса ЭЛС. Соответственно, человеко–машинный интерфейс адаптирован к человеческим органам восприятия, обеспечивает контроль всех элементов установки (рис. 13).

Алгоритмическая страта. Алгоритмический уровень объединяет в себе общие алгоритмы управления, математические модели (ММ), технологические карты процесса ЭЛС. Согласно ГОСТ 34.003–90 под алгоритмом понимается задание условий и последовательность действий компонентов системы при выполнении ею своих функций [2]. Элементами данной страты являются алгоритмы управления, записанные в виде программ на алгоритмических языках в памяти микропроцессорных устройств.

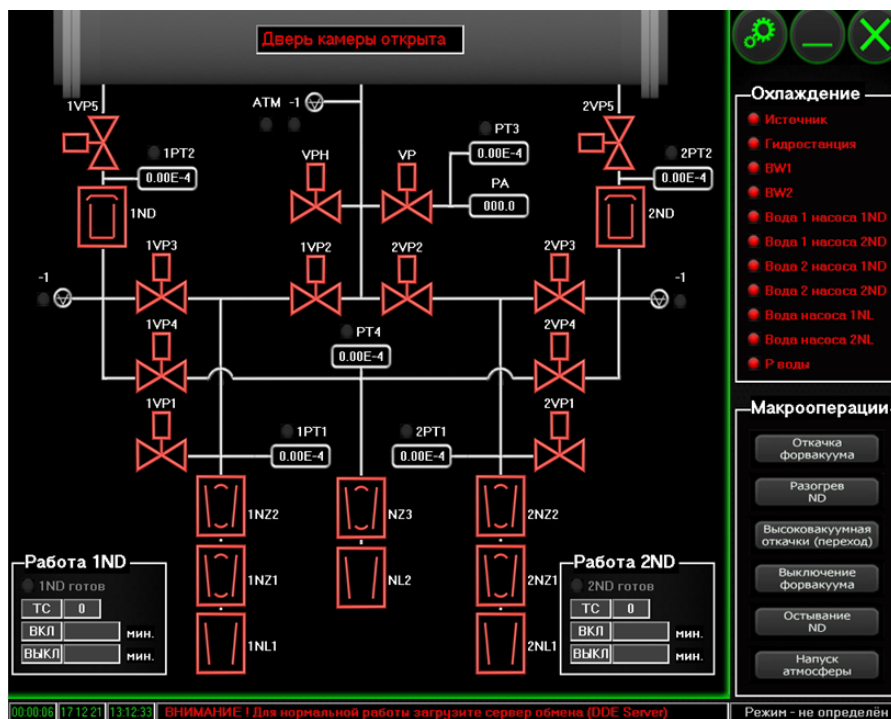


Рис. 13. Человеко-машинный интерфейс установки «ЭЛУ-20РЗ»

Основной задачей на данном уровне является проектирование технологии ЭЛС на двух уровнях: формирование структуры операции (выбор кинематической схемы обработки, способа сканирования пучка, осцилляция пучка, непрерывный/импульсный режим, облегчение условий образования ванны и заварки кратера и др.) и оптимизация значений параметров процесса.

Разработка ММ процесса ЭЛС основана как на имеющихся теоретических и экспериментальных положениях механики двухфазных сред, так и на новых разработках и экспериментальных данных. Выделяют два направления проектирования ММ процесса ЭЛС:

- 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 ЭЛС. Разработка наукоемких моделей для известных и новых материалов является одной из

актуальнейших задач, имеющей большое прикладное значение. В качестве прикладного инструмента для разработки ММ процесса ЭЛС 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).

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.

Системная страта. На системной страте 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 страте анализируются все технические и экономические вопросы, задаются проектные ограничения.

К настоящему времени разработано значительное число методик определения оптимальных параметров ТП, которые можно условно разделить на три группы по способам решения задачи: на условный экстремум, математического программирования, оптимального управления. Анализ приведенных методик показал, что наиболее эффективно представление задачи проектирования ТП как задачи оптимального управления, которая характеризуется свойствами иерархичности и многокритериальности. Для поиска оптимального варианта используются алгоритмы динамического программирования и определяются условия, которым должен удовлетворять оптимальный многошаговый процесс принятия решений.

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.

Стратифицированное представление производственной системы для реализации технологии ЭЛС позволяет раскрыть взаимодействие разнородных по своей природе

уровней и межуровневых связей, имеющих различные интерфейсы (рис. 14). Приведенная иерархическая абстракция, состоящая из технологической, инструментальной, измерительной, информационной, алгоритмической, системной страт позволяет достаточно полно раскрыть содержание сложной технологической системы.



Рис. 14. Взаимодействие различных уровней производственной системы ЭЛС