

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-06>

УДК 621.791

EDN LIKVDK

Оригинальная статья / Original paper



**Анализ сварочного производства корпусных изделий
энергетического машиностроения**

М.Е. Жидков

Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация
mezhidkov@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается специфика сварочного производства корпусного оборудования изделий энергетического машиностроения, отличающегося ярко выраженной дискретностью и характерными проблемами мелкосерийного производства, такими как низкая воспроизводимость технологических процессов и высокая степень неопределенности состояния компонентов. Затраты на подготовку производства сопоставимы или превышают затраты на непосредственное выполнение технологического процесса. В статье рассматриваются технологические свойства источников питания и сварочного автомата в единой системе «Источник питания – автомат – дуга – шов». При этом раздельно оцениваются технологические свойства в установившемся и динамическом режиме функционирования оборудования. В установившемся режиме технологические свойства как источников питания, так и сварочных автоматов, достаточно высоки и практически всегда удовлетворяют требованиям технологии сварки. Поэтому при оценке свойств оборудования чаще всего исследуют его способность отрабатывать технологические возмущения. По динамическим характеристикам элементов сварочного контура выполняется анализ переходных процессов. При этом у конвенциональных источников питания, содержащих электромеханические регуляторы динамические свойства определяются индуктивностью и конструктивными особенностями, а у полупроводниковых источников питания – характеристиками электронного блока управления. В работе сделан вывод о том, что успешное решение задачи проектирования системы управления сварочным контуром электродуговой сварки зависит от многих факторов и, в первую очередь, от информационной базы процесса для качественного формирования входного вектора состояния. По итогам работы сделан основной вывод о том, что создание современной системы управления невозможно без поддержки информационно – цифровыми аналитическими системами регистрации первичных массивов данных с последующим извлечением из них качественно новой информации о динамике процесса электродуговой сварки с целью обеспечения комплексного подхода к совершенствованию, охватывающего весь цикл сварочного производства.

Ключевые слова: энергетическое машиностроение, сварочное производство, мелкосерийное производство, контроль состояния процесса, система управления, цифровая информационно – аналитическая система, источник питания, технологическое возмущение, ручная дуговая сварка, сварка под флюсом.

Для цитирования: Жидков М.Е. Анализ сварочного производства корпусных изделий энергетического машиностроения. Глобальная ядерная безопасность. 2025;15(5):58–63. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-06>

For citation: Zhidkov M.E. Welding production analysis of power engineering housing products. *Nuclear Safety*. 2025;15(4):58–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-06>

Welding production analysis of power engineering housing products

Maxim E. Zhidkov

«Atommasch» the branch of «AEM-technology» JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation
mezhidkov@yandex.ru

Abstract. This article examines the specifics of welding the casework of power engineering equipment characterized by a pronounced discrete nature and inherent challenges of small-scale production such as low process reproducibility and a high degree of uncertainty in component condition. Pre-production costs are comparable to or exceed the costs of the

actual process. This article considers the process properties of power sources and welding machines in a single "power source – welding machine – arc – weld" system. The process properties are separately assessed in steady-state and dynamic modes of equipment operation. In steady-state mode, the process properties of both power sources and welding machines are quite high and almost always meet welding technology requirements. Therefore, when evaluating equipment properties, its ability to handle process disturbances is most often examined. A transient analysis is performed based on the dynamic characteristics of welding circuit elements. For conventional power sources containing electromechanical controllers, the dynamic properties are determined by inductance and design features, while for semiconductor power sources, they are determined by the characteristics of the electronic control unit. The paper concludes that successfully designing a control system for an electric arc welding circuit depends on many factors, primarily the process's information base for the high-quality generation of the input state vector. The main conclusion reached is that creating a modern control system is impossible without the support of information and digital analytical systems for recording primary data sets and subsequently extracting qualitatively new information about the dynamics of the electric arc welding process from them, ensuring a comprehensive approach to improvement encompassing the entire welding production cycle.

Keywords: power engineering, welding production, small-scale production, process control, control system, digital information and analytical system, power source, process disturbance, manual arc welding, submerged arc welding.

Сварочные производства корпусного оборудования изделий энергетического машиностроения отличается от общемашиностроительных производств явно выраженной дискретностью. Естественно, что загрузка сварочных участков по изготовлению одних и тех же узлов сравнительно не велика, следовательно, при организации сварочного производства возникают проблемы, характерные для мелкосерийного производства: воспроизводимость технологии, неопределенность состояния компонент технологического процесса [1].

В мелкосерийном производстве трудозатраты на его подготовку соизмеримы или превосходят трудозатраты, связанные непосредственно с реализацией технологического процесса, поэтому совершенствование мелкосерийного производства необходимо рассматривать в контексте требований всего производственного цикла, включающего как подготовку, так и реализацию технологического процесса. Теоретические концепции совершенствования подготовки мелкосерийного производства базируются на создание структурных подразделений, располагающих системными методами и средствами объективного количественного контроля состояния компонент производственного процесса [2,3]. Решение проблемы уменьшения влияния нестабильности связаны с организацией промышленных экспериментов и исследований информационных потоков.

Существующая в настоящее время система проведения аттестационных процедур

проводимых путем установления соответствия фактических параметров компонент технологий с параметрами, приведенными в паспортах организаций-изготовителей имеет существенные недостатки связанные с высокой трудоемкостью и низкой эффективностью экспертных оценок.

Повышение производительности, эффективности и снижение себестоимости процесса подготовки сварочного производства может быть достигнуто за счет автоматизации аттестационных процедур и использования методов и средств системного анализа [4].

Реализация принципов промышленных исследований предопределяет разработку структуры инструментальных средств исследований и системы математического обеспечения. Ориентация современных цифровых средств контроля состояния технологического процесса в принципе совпадает с традиционными требованиями технологической подготовки, однако будучи реализованными на современных средствах вычислительной техники обеспечивают сокращение сроков и повышают достоверность результатов.

Проблемная ориентация средств контроля касается не только математического обеспечения, но и затрагивает аппаратную реализацию. Измерительные системы должны быть надежными и пригодными для использования в производственно-цеховых условиях. Интерфейс систем должен быть удобным и адаптированным представлению информации

ции в соответствии с нормативной документацией.

Исследования сварочного оборудования, как составной части сварочного контура, позволяют проанализировать требования к нему. Комплекс требований, вытекающих из конкретных условий сварки, свойств свариваемых металлов, степени автоматизации приводится в соответствие с технологическими свойствами сварочного оборудования [5].

При автоматической сварке плавлением рассматриваются технологические свойства источников питания и сварочного автомата в единой системе «Источник питания – автомат – дуга – шов». При этом раздельно оцениваются технологические свойства в установившемся и динамическом режиме функционирования оборудования. В установившемся режиме технологические свойства как источников питания, так и сварочных автоматов, достаточно высоки и практически всегда удовлетворяют требованиям технологии сварки. Поэтому при оценке свойств оборудования чаще всего исследуют его способность отрабатывать технологические возмущения. К ним, прежде всего, относят: изменение нагрузки питающей сети, нагрузки на валах приводов, изменения проводимости дугового промежутка и другие факторы. Следует отметить, что привод электродной проволоки автомата и источник питания находятся в неодинаковых условиях по отношению к сварочному контуру. Источник питания является непосредственно связанным элементом сварочного контура по основным параметрам – току и напряжению.

Учитывая динамические характеристики элементов сварочного контура, можно произвести анализ переходных процессов. Авторам работ [6,7] удалось сформулировать требования к источникам питания, содержащим простые параметрические регуляторы электромеханического типа. Динамические характеристики подобных источников питания определяются наличием индуктивности, а так как намоточные данные трансформаторов отличаются незначительно, и дроссели имеют параметры одного и того же порядка, динамические свойства про-

стейших источников питания практически не отличаются друг от друга и описываются апериодическим звеном первого порядка. Применительно к источникам питания, имеющим электронную систему управления такой подход неприемлем.

У источников питания, содержащих электромеханические регуляторы динамические свойства определяются индуктивностью и конструктивными особенностями, а у полупроводниковых источников питания – характеристиками электронного блока управления. Результаты исследований [8] подтверждают наличие разброса динамических характеристик у однотипных источников питания. Наиболее убедительным объяснением этому явлению следует считать факт зависимости характеристик электронных схем от настройки и изменение параметров полупроводниковых устройств от старения элемента. В тиристорных источниках питания отмечается различие характера переходных процессов. Естественно, что существенный разброс динамических свойств может отразиться на процессе сварки [8].

Учитывая вышеизложенное, можно отметить, что технологические свойства сварочного оборудования должны формулироваться не только как качественные показатели, но и должны содержать количественные характеристики, позволяющие отследить их изменение в процессе эксплуатации оборудования.

Характер протекания процессов в сварочном контуре при ручной дуговой сварке во многом зависит от использующихся электродов. Свойства электродов для ручной дуговой сварки обычно связывают со стабильностью горения дуги, надежностью первоначального зажигания, стабильностью переноса электродного металла. Для оценки этих свойств введено более широкое понятие – технологические свойства электродов для ручной дуговой сварки. К ним принято относить следующие свойства покрытых электродов [5]: стабильность горения дуги, возможность сварки в различных пространственных положениях, производительность плавления электрода, надежность начального зажигания дуги, потеря металла на угар и разбрзгивание, хорошее формирование

валика, отделимость шлаковой корки, достаточная стойкость покрытия против механических повреждений. Под стабильностью дуги подразумевается способность сварочной дуги сохранять свои параметры при наличии возмущений: удлинений и обрывов дуги, коротких замыканий.

Под надежностью начального зажигания дуги понимается способность сварочной дуги возбуждаться при касании электродом изделия. Этот параметр определяет склонность электродов к образованию дефектов на начальных участках шва.

Разбрзывание металла объясняется тем, что покрытие электрода не сбалансировано. Основными причинами разбрзывания является:

- отклонение от оси электрода направления сил, отрывающих каплю расплавленного металла;
- взрывообразное выделение газов в объеме расплавленного металла;
- электрический взрыв перемычки между электродом и ванной.

Возможность реализации процесса сварки в различных пространственных положениях оценивается скоростями плавления основного и электродного металла. Существует так называемый тип «холодных» электродов, у которых используется тепловая мощность меньшая, чем мощность дуги у «горячих» электродов, предназначенных для сварки горизонтальных поверхностей.

Качество формирования валика определяется гладкой или мелкочешуйчатой поверхностью, без подрезов, наплавов и несплавлений.

Влияние технологических характеристик электродов на стабильность физико-химических процессов в сварочном контуре подробно изучено в работе [9]. Естественно, что это влияние распространяется и на электрический процесс в сварочном контуре, поэтому появляется перспектива решения обратной задачи – по оценкам стабильности протекания электрических процессов характеризовать технологические свойства сварочных материалов. Приведенный анализ в определенной степени распространяется и на другие способы сварки, в частности, на сварку под флюсом. Исходя из опыта сва-

рочного производства филиала ОАО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», процесс сварки под флюсом характеризуется большей стабильностью, и от объединения не поступало предложений по разработке методов оценки технологических свойств сварочного флюса.

Использование сварочного контура, как объекта управления рассмотрено в работах [7,10]. Суть наиболее интересных работ в этом направлении сводится к построению вектора состояния [11], характеризующего связь между показателями качества, управляемыми параметрами и технологическими возмущениями. Успешное решение такой задачи зависит от многих факторов.

Во-первых, создание системы управления требует хорошо развитой надежной информационной базы, позволяющей измерять значительное количество параметров.

Во-вторых, необходимы быстродействующие исполнительные устройства для компенсации технологических возмущений различной физической природы.

В-третьих, необходимо знать, как связаны показатели качества с параметрами процесса. Это требует разработки сложных математических моделей.

В-четвертых, нужны средства, позволяющие в реальном масштабе времени обрабатывать информацию от датчиков, проводить оценку состояния процесса и вырабатывать управляющие воздействия.

Наиболее распространенными дефектами сварных соединений изделий корпусного оборудования являются шлаковые включения. Опыт работы по разработке систем управления, отслеживающих причины появления таких дефектов на основе информации о сварочном токе и напряжении дал отрицательный результат. Обработка мгновенных значений тока и напряжения не позволяет идентифицировать момент образования дефектов типа шлаковых включений. Как показали проведенные исследования распределение значений тока и напряжения имеет нормальный закон. Такой характер распределения говорит о том, что в сварочном контуре действует большое количество возмущений равнозначного значения. Поэтому выделить главную компоненту возмущения, приводящую к образованию дефекта не

представляется возможным. Построение системы управления для борьбы с дефектами такого типа требует разработки принципиально новых решений. Снижение уровня нестабильности компонентов технологического процесса (сварочного оборудования, сварочных материалов) и управления процессом сварки по сути является борьбой не со следствием причин, вызывающих отклонение технологических процессов от нормы, а попыткой ликвидации самих причин. Такой подход широко используется в современной технике и является перспективным. Схема локализации источника нестабильности применительно к сварочному производству энергетического оборудования АЭС представлена на рисунке 1.

Для технологической реализации влияния факторов нестабильности была использована процессорная информационно-измерительная система контроля параметров технологического процесса сварки.

Выводы:

- сварочное производство является открытой производственной системой с характерными признаками и проблемами мелкосерийного производства: низкая воспроизводимость технологии, неопределенность

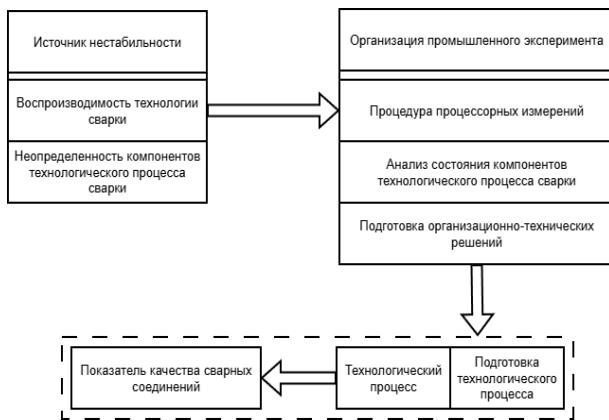


Рисунок 1. Схема локализации источников нестабильности в сварочном производстве
Figure 1. Diagram of localization of instability sources in welding production

состояния компонент технологического процесса;

- повышение эффективности современных систем управления качеством в сварочном производстве изделий ответственного назначения может быть обеспечено использованием информационно-аналитических систем предназначенных для сбора и обработки информации при подготовке и реализации технологического процесса сварки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Плескунин В., Фомин Б., Яковлев В., Крамер З., Штан Х., Воронина Е. Управление гибкими производственными системами: Модели и алгоритмы. Под общ. ред. С.В. Емельянова. Москва: Машиностроение, 1987. 368 с. Режим доступа: <https://bookmix.ru/book.phtml?id=2608939&ysclid=miifgi0pk9231811045> (дата обращения: 29.07.2025).
2. Pleskunin V., Fomin B., Yakovlev V., Kramer Z., Shtan H., Voronina E. Management of flexible manufacturing systems: Models and algorithms. Under the general editorship of S. V. Emelianov. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 368 p. (In Russ.). Available at: <https://bookmix.ru/book.phtml?id=2608939&ysclid=miifgi0pk9231811045> (accessed: 29.07.2025).
3. Грувер М., Зиммерс Э. САПР и автоматизация производства: Пер. с англ. Москва: Мир, 1987. 528 с. Режим доступа: <https://elcat.bntu.by/index.php?url=/notices/index/IdNotice:130293/Source:default> (дата обращения: 29.07.2025).
4. Gruber M., Zimmers E. CAD and automation of production: Translated from English. Moscow: Mir, 1987. 528 p. (In Russ.). Available at: <https://elcat.bntu.by/index.php?url=/notices/index/IdNotice:130293/Source:default> (accessed: 29.07.2025).
5. Хартли Дж. ГПС в действии: Пер. с англ. Москва: Машиностроение, 1987. 328с. Режим доступа: <https://knigogid.ru/books/1958869-gps-v-deystvii-fms-at-work-1984-proizvodstvennoe-izdanie?ysclid=miig1qki33995118172> (дата обращения: 29.07.2025).
6. Hartley J. GPS in action: Trans. from English. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 328 p. (In Russ.). Available at: <https://knigogid.ru/books/1958869-gps-v-deystvii-fms-at-work-1984-proizvodstvennoe-izdanie?ysclid=miig1qki33995118172> (accessed: 29.07.2025).
7. Чернов А.В. Обработка информации в системах контроля и управления сварочным. Новочеркасский гос. техн. ун-т. Новочеркаск. НГТУ. 1995. 178 с. ISBN 5-88998-004-1. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001729345?ysclid=mismcs29o3249016171> (дата обращения: 29.07.2025).

- Chernov A.V. Information processing in monitoring and control systems for welding. Novocherkassk. state tech. univ. Novocherkassk: NSTU. 1995. 178 c. ISBN 5-88998-004-1. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001729345?ysclid=mismcs29o3249016171> (accessed: 29.07.2025)
5. Милютин В.С. Испытания сварочных свойств оборудования для дуговой сварки. Екатеринбург. 2019. 446 с. Режим доступа: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/71955/1/milytin_2019.pdf?ysclid=miig9dqa1j630413850 (дата обращения: 29.07.2025).
- Milyutin V.S. Testing the welding properties of arc welding equipment. Ekaterinburg. 2019. 446 p. (In Russ.). Available at: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/71955/1/milytin_2019.pdf?ysclid=miig9dqa1j630413850 (accessed: 29.07.2025).
6. Резницкий А.М., Коцюбинский В.С. Ремонт и наладка электросварочного оборудования. Москва: Машиностроение, 1991. 254 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001589583?ysclid=miigeon3c16072935> (дата обращения: 29.07.2025).
- Reznitsky A.M., Kotsyubinsky V.S. Repair and adjustment of electric welding equipment. Moscow: Mashinostroenie, 1991. 254 p. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001589583?ysclid=miigeon3c16072935> (accessed: 29.07.2025).
7. Розавсков Ю.Н. Оборудование для сварки плавлением. Москва: Энергоатомиздат, 1981. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001395204?ysclid=miight33bk521379804> (дата обращения: 29.07.2025).
- Rozavskov Yu.N. Equipment for fusion welding. Moscow: Energoatomizdat, 1981. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001395204?ysclid=miight33bk521379804> (accessed: 29.07.2025).
8. Сараев Ю.Н., Чинахов Д.А., Ильяшенко Д.П., Киселёв А.С., Гордынец А. С. Исследование стабильности плавления и переноса электродного металла в процессе дуговой сварки плавящимся электродом от источников питания с различными динамическими характеристиками. *Сварочное производство.* 2016;12:3–10. Режим доступа: <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=PRSV-svar/2016/12> (дата обращения: 29.07.2025).
- Saraev Yu.N., Chinakhov D.A., Ilyashchenko D.P., Kiselev A.S., Gordynets A.S. Study of the stability of melting and transfer of electrode metal in the process of arc welding with a consumable electrode from power sources with different dynamic characteristics. *Welding production.* 2016;12:3–10. (In Russ.). Available at: <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=PRSV-svar/2016/12> (accessed: 25.08.2025).
9. Гладков Э.А., Малолетков А.В. Управление технологическими параметрами сварочного оборудования для дуговой сварки: учебное пособие. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2007. 148с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/62060> (дата обращения: 25.08.2025).
- Gladkov E. A., Maloletkov A.V. Control of technological parameters of welding equipment for arc welding: a tutorial. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2007. 148 p. (In Russ.). Available at: <https://e.lanbook.com/book/62060> (accessed: 25.08.2025).
10. Алешин Н.П., Чернышов Г. Г., Гладков Э. А. и др. Сварка. Резка. Контроль: справочник: в 2 т. Москва: Машиностроение, 2004. 624 с. Режим доступа: <https://lib-bkm.ru/12911?ysclid=misnur0dea606876979> (дата обращения: 29.07.2025).
- Aleshin N.P., Chernyshov G.G., Gladkov E.A. and others. Welding. Cutting. Control: reference book: in 2 volumes. Moscow: Mechanical Engineering, 2004. 624 p. (In Russ.). Available at: <https://lib-bkm.ru/12911?ysclid=misnur0dea606876979> (accessed: 25.08.2025).
11. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов : Монография. Москва: Изд-во МГТУ, 2014. 487 с. Режим доступа: https://urss.ru/PDF/add_ru/193160-1.pdf?ysclid=misnzttxph970170291 (дата обращения: 25.08.2025).
- Makarov E. L., Yakushin B.F. Theory of weldability of steels and alloys. Monograph. Moscow: Publishing house of Moscow State Technical University. 2014. 487 p. (In Russ.). Available at: https://urss.ru/PDF/add_ru/193160-1.pdf?ysclid=misnzttxph970170291 (accessed: 25.08.2025).
- ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:**
Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.
- КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:**
Конфликт интересов отсутствует.
- ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ:**
Жидков Максим Евгеньевич, директор, Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.
e-mail: mezhidkov@yandex.ru
- FUNDING:**
The author declare no external funding.
- CONFLICT OF INTEREST:**
No conflict of interest.
- NFORMATION ABOUT THE AUTHOR:**
Maxim E. Zhidkov, Head of «Atommasch» the branch of AEM-Technologies JSC, Volgodonsk, Rostov reg., Russian Federation.
e-mail: mezhidkov@yandex.ru