Научная статья

УДК 69.057.1:621.791.052.6

РОБОТИЗИРОВАННАЯ СБОРКА СТАЛЬНЫХ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ СВАРКОЙ

Рыжов Сергей Петрович, кандидат технических наук, Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, Ростов-на-Дону, ryzhov63@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена экспериментальному обоснованию перехода к роботизированному выполнению стыковых соединений при монтаже крупногабаритных стальных каркасов зданий. На специализированном стенде, моделирующем условия поточного возведения этажерочных конструкций из прокатных двутавров, исследована работоспособность двухступенчатой системы технического зрения на основе лазерного сканера и стереоскопических камер, обеспечивающей пространственную привязку горелки к узлам сопряжения с погрешностью не более 0,44 мм при начальных смещениях монтируемых элементов до 7 мм. Реализован замкнутый контур адаптивного управления параметрами процесса GMAW-CMT, корректирующий скорость подачи проволоки и угол наклона горелки по данным лазерного профилометра и пассивной видеокамеры. Ультразвуковой контроль 48 стыковых швов и металлографический анализ макрошлифов зафиксировали снижение доли дефектных соединений в 1,5 раза по сравнению с ручной сваркой при одновременном сокращении времени цикла вдвое. Рассмотрена схема интеграции манипулятора в поточный метод монтажа с разграничением зон крановых и сварочных операций. Результаты формируют количественную основу для разработки технологических карт роботизированного монтажа и корректировки допусков на изготовление металлоконструкций.

Ключевые слова: роботизированная сварка, стальной каркас здания, монтаж металлоконструкций, техническое зрение, адаптивное управление

сварочным процессом, допуски позиционирования, поточный метод монтажа, качество сварных соединений.

Original article

ROBOTIC ASSEMBLY OF STEEL BUILDING FRAMES WITH ADAPTIVE WELDING CONTROL

Ryzhov Sergei Petrovich, Candidate of Technical Sciences, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia, ryzhov63@mail.ru

Annotation. This article presents an experimental justification for the transition to robotic butt joints during the assembly of large-scale steel building frames. A specialized rig simulating the flow-line construction of rack-mounted structures from rolled I-beams was used to test the performance of a two-stage machine vision system based on a laser scanner and stereoscopic cameras. This system ensures spatial alignment of the torch with joints with an error of no more than 0.44 mm, with initial displacements of up to 7 mm. A closed-loop adaptive control system for the GMAW-CMT process parameters was implemented, adjusting the wire feed speed and torch tilt angle based on data from a laser profilometer and a passive video camera. Ultrasonic testing of 48 butt welds and metallographic analysis of macrosections recorded a 1.5-fold reduction in the percentage of defective joints compared to manual welding, while simultaneously halving the cycle time. A scheme for integrating a manipulator into a flow-line assembly method with delineation of crane and welding operation zones is discussed. The results form a quantitative basis for developing process charts for robotic assembly and adjusting tolerances for the manufacture of metal structures.

Keywords: robotic welding, steel building frame, metal structure assembly, machine vision, adaptive welding process control, positioning tolerances, flow assembly method, weld joint quality.

Введение. Производительность труда в строительной отрасли показывает отрицательную динамику, что подтверждается данными статистических наблюдений, проведённых в Японии, Германии и Соединённых Штатах Америки [1]. В отличие от обрабатывающей промышленности, где капиталовложения в автоматизацию обеспечивают непрерывный прирост выработки, строительство характеризуется крайне низкой капиталоёмкостью, высокой долей ручных операций и хроническим дефицитом квалифицированных кадров. Анализируя динамику отраслевых показателей, автор пришел к выводу, что традиционные методы возведения зданий приблизились к технологическому пределу, после достижения которого дальнейшее повышение производительности за счёт человеческого труда становится невозможным [2]. Удельный расход сырья и энергии на единицу возводимой площади, доля дефектов и систематическое превышение сметной стоимости свидетельствуют об исчерпании потенциала традиционных подходов и необходимости перехода к иным способам организации строительного производства.

Особое место в этом контексте занимают крупногабаритные стальные каркасы зданий и промышленных сооружений, при изготовлении и монтаже которых сварочные операции составляют значительную часть общей трудоёмкости производственного цикла. Ручная дуговая сварка соединений колонн, ригелей, ферм и узловых элементов остаётся преобладающей технологией на большинстве отечественных и зарубежных строительных площадок. Между тем исследования продемонстрировали, что автоматизированные процессы дуговой наплавки и сварки способны обеспечить механические характеристики соединения, сопоставимые с показателями литого или деформированного металла, при существенном сокращении производственного цикла [3], [4]. Речь идёт, в первую очередь, о технологиях GMAW, GTAW и плазменной сварки, которые в варианте адаптивного управления параметрами дуги дают возможность получать швы стабильного качества на элементах сложной конфигурации.

Тенденция к роботизации монтажных операций в строительстве прослеживается с середины 1970-х гг., когда японские подрядные компании, в частности, Shimizu и Taisei, приступили к разработке и внедрению однофункциональных строительных роботов, предназначенных для выполнения отдельных повторяющихся операций непосредственно на площадке [1]. Первоначально подобные устройства отличались высокой гибкостью применения, поскольку не требовали перестройки всего технологического цикла, однако их изолированность от смежных процессов и необходимость организации зон безопасности для персонала нивелировали ожидаемый прирост производительности. Осмысление этого опыта привело к формированию концепции автоматизированных площадок фабричного типа, где роботизированные подсистемы интегрируются в единую управляемую среду с регламентированными материальными потоками. Выделяется пять взаимосвязанных направлений, определяющих облик будущей автоматизации строительства:

- проектирование, ориентированное на робота;
- роботизированная индустриализация сборных элементов;
- строительные роботы;
- автоматизация площадки;
- так называемая «амбиентная робототехника», предполагающая интеграцию роботизированных систем непосредственно в конструкцию здания [1].

Применительно к сварке стальных каркасов ключевым звеном роботизированного цикла оказывается стадия позиционирования соединяемых элементов. В отличие от цеховых условий, где деталь жёстко закреплена в кондукторе и геометрия стыка известна с точностью до десятых долей миллиметра, на строительной площадке крупногабаритные колонны, балки и фермы подвергаются температурным деформациям, ветровым нагрузкам и гравитационному провисанию. Допуски на изготовление прокатных профилей

по действующим стандартам составляют, как правило, ±2-3 мм на длине элемента, однако при сборке многоэтажного каркаса накопленная погрешность способна достигать нескольких сантиметров на отметке верхних этажей. Пан и соавторы отмечают, что даже в лабораторных условиях системы дуговой сварки с проволочной подачей обеспечивают точность позиционирования порядка ±0,2 мм, что уже является недостаточным для ряда ответственных применений [4]. На открытой площадке эта величина возрастает, поэтому без введения замкнутого контура обратной связи по геометрии стыка обеспечить воспроизводимое качество шва невозможно.

Существующие подходы к решению данной проблемы разделяются на две группы. Первая связана с предварительным трёхмерным сканированием зоны монтажа и корректировкой траектории горелки на основе полученного облака точек; подобные методы описаны в работах, посвящённых адаптивному управлению процессом WAAM, где отклонения высоты наплавленного слоя компенсируются изменением скорости подачи проволоки на последующем проходе. Вторая группа объединяет средства активного и пассивного визуального контроля непосредственно в момент выполнения шва: лазерная структурированная подсветка сварочной ванны, стробоскопическое наблюдение с высокоскоростным электронным затвором, а также пассивные системы на основе регистрации собственного излучения расплавленного металла [2]. Каждая из этих методик обладает собственными ограничениями - от влияния зеркальной поверхности жидкой ванны на качество отражённого сигнала до невозможности синхронизации камеры с высокочастотным капельным переносом при импульсной сварке.

Дополнительную сложность при роботизированной сборке крупногабаритных каркасов вносит необходимость планирования траектории перемещения манипулятора в условиях ограниченного рабочего пространства. Как подчёркивают исследователи, для многоэлектродных систем ориентация горелки жёстко привязана к направлению перемещения, что накладывает

существенные ограничения на алгоритм построения пути и требует учёта столкновений с ранее смонтированными элементами конструкции [5]. В строительной практике ситуация усугубляется тем, что габариты монтируемых элементов исключают возможность свободного маневрирования манипулятора, а последовательность установки связей и раскосов обусловлена требованиями устойчивости каркаса на каждой промежуточной стадии.

Таким образом, задача автоматизации сварочных операций при возведении стальных каркасов зданий предполагает разработку целостной технологической цепочки, включающей робот-ориентированное проектирование узловых соединений, адаптивное планирование траекторий с учётом реальных отклонений геометрии, мониторинг параметров дуги и формы шва в реальном времени, а также организационные решения по интеграции роботизированного комплекса в действующий строительный поток. Современный этап развития строительной автоматизации можно охарактеризовать как переходную фазу между зарождением технологии и её массовым распространением. Этот процесс может быть представлен через наложение S-образных кривых, где зрелая традиционная технология уступает место формирующемуся технологическому укладу [1]. Для отечественной практики монтажа металлоконструкций, где доля ручного труда в сварочных операциях по-прежнему превышает 80%, осмысление зарубежного опыта и его адаптация к условиям конкретных строительных площадок приобретают научное и прикладное значение и влияют на конкурентоспособность отрасли.

Обзор литературы. Разработка систем технического зрения для роботизированной сварки металлических конструкций опирается на обширный массив исследований, сформировавшийся в контексте аддитивного производства и автоматизации дуговых процессов. Систематизированы два класса сенсорных подходов, применимых к задачам контроля сварочной ванны: активное визуальное зондирование, при котором источник структурированного света направляется в зону дуги, и пассивное наблюдение, основанное на

регистрации собственного излучения расплавленного металла [6]. Авторы указывают, что в первом случае критическим ограничением являются резкие перепады яркости изображения, вызванные сварочной дугой, для подавления которой применяются стробоскопические методы с синхронизацией высокоскоростного электронного затвора и импульсного лазерного излучателя [6]. Во втором случае, характерном для импульсной сварки вольфрамовым электродом, чёткое изображение удаётся получить в фазе минимального тока, но при высокочастотном капельном переносе в среде GMAW синхронизация камеры с дугой становится затруднительной [6].

Применительно к крупногабаритным строительным конструкциям задачи пространственной привязки горелки к стыку приобретают дополнительную специфику, нехарактерную для лабораторных установок аддитивного производства. Если в цеховых условиях, описанных коллективом авторов, отклонение позиционирования при дуговой наплавке составляет порядка ±0,2 мм [6], то на строительной площадке при монтаже колонн и ригелей длиной 6–12 м накопленная погрешность из-за температурных деформаций, гравитационного провисания и неточности заводской прирезки возрастает на порядок. Рассматривая эволюцию строительной автоматизации от единичных однофункциональных роботов к интегрированным площадкам фабричного типа, можно подчеркнуть, что переход к роботизированному монтажу подразумевает предварительное структурирование рабочей среды по аналогии с производственным цехом, где материальные потоки и зоны операций жёстко регламентированы [7]. Другими словами, система технического зрения строительного робота должна компенсировать как локальные отклонения геометрии стыка, так и глобальные смещения координатной базы, обусловленные неточностью установки монтируемых элементов.

Среди методов коррекции траектории в литературе выделяются два взаимодополняющих направления. Первое связано с предварительным трёхмерным сканированием зоны монтажа и построением скорректированной

программы перемещения горелки на основе полученного облака точек. Эффективность итеративного обучения показана для стабилизации высоты наплавленного слоя, так как после сканирования геометрии каждого проложенного валика отклонения по высоте компенсируются адаптивным изменением скорости подачи проволоки на последующем проходе [8]. Второе направление предполагает мониторинг непосредственно в момент выполнения шва. Существует метод наблюдения за динамической зеркальной поверхностью сварочной ванны с использованием лазерных диодов малой мощности (50 мВт), при котором точки или полосы, спроецированные на жидкий металл, отражаются и проецируются на экран регистрации, обеспечивая косвенное измерение геометрии ванны [9]. Также разработана интегрированная с промышленным манипулятором система отслеживания шва на основе компьютерного зрения для роботизированной сварки в режимах GTAW и GMAW [10].

Вопросы контроля качества сварных соединений стальных каркасов регламентированы действующими нормативными документами, однако сравнительные данные по дефектности швов, выполненных роботизированным и ручным способами на элементах строительного сортамента, в литературе представлены фрагментарно. Между тем именно такие данные необходимы для обоснования технологической целесообразности замены ручной сварки роботизированной в условиях поточного монтажа. Анализ S-образных кривых технологического развития показывает, что новая технология на начальной стадии уступает зрелой по ряду эксплуатационных характеристик [2]. Это наблюдение непосредственно переносится на роботизированную сварку строительных металлоконструкций, поскольку без количественной оценки качества швов в сопоставлении с ручной дуговой сваркой переход к автоматизированному процессу не может быть обоснован ни технологически, ни экономически.

Методы исследования. Экспериментальная часть работы выполнена на роботизированном стенде, моделирующем условия поточного монтажа

этажерочных стальных каркасов. Стенд представляет собой пространственную раму размером 12,0 × 6,0 × 4,5 м, собранную из двутавровых балок 30Б1 и 35Ш1 по ГОСТ 26020, с предустановленными узловыми фасонками, имитирующими сопряжения колонн с ригелями. В центральной части стенда закреплён шестикоординатный промышленный манипулятор грузоподъёмностью 16 кг и досягаемостью 2,01 м, оснащённый сварочной горелкой GMAW с системой холодного переноса металла (CMT). Управление движением робота осуществляется через контроллер, координирующий перемещение осей манипулятора и параметры источника питания, по аналогии со схемой, описанной для лабораторных установок WAAM [1].

Пространственная привязка горелки к узлам сопряжения реализована посредством комбинированной системы технического зрения, включающей твердотельный лазерный сканер (LiDAR) с угловым разрешением 0,25° и дальностью действия до 60 м, а также пару стереоскопических камер с разрешением 12 Мп и базой 350 мм, смонтированных на фланце шестой оси манипулятора. LiDAR выполняет функцию грубого позиционирования, по результатам однократного сканирования рабочей зоны формируется облако точек с шагом 3 мм, из которого алгоритмом сегментации выделяются плоскости полок и стенок двутавров, а также контуры разделки кромок в узлах сопряжения. Стереокамеры обеспечивают точную локализацию корня шва на расстоянии от 200 до 800 мм от объектива с погрешностью не более ±0,35 мм. Полученные данные передаются в контроллер робота, где производится пересчёт проектной траектории горелки в фактическую систему координат узла.

Адаптивное управление процессом сварки организовано по замкнутому контуру. Непосредственно перед возбуждением дуги лазерный профилометр, установленный на горелке, сканирует поперечное сечение разделки кромок с частотой 500 Гц, фиксируя ширину зазора, угол скоса и смещение кромок. На основании полученных профилей алгоритм корректирует угол наклона горелки, скорость перемещения и амплитуду поперечных колебаний. В ходе сварки

пассивная камера с узкополосным оптическим фильтром (центральная длина волны 650 нм, полуширина 10 нм) регистрирует контур сварочной ванны в фазе паузы импульсного тока, а система обработки изображений в реальном времени вычисляет ширину и площадь видимой части ванны. При отклонении ширины более чем на 15% от номинального значения контроллер изменяет скорость подачи проволоки в диапазоне от 2,5 до 8,0 м/мин с шагом 0,1 м/мин.

Качество сварных соединений оценивалось двумя взаимодополняющими методами. Ультразвуковой контроль выполнялся на частоте 4 МГц пьезоэлектрическим преобразователем с углом ввода 70° в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 17640. Обследовано 48 стыковых швов, выполненных роботизированным способом, и 48 швов, сваренных вручную электродами Э50А диаметром 4 мм теми же сварщиками на идентичных образцах стенда. Для металлографического анализа из контрольных участков вырезаны темплеты, подготовленные макрошлифы путём механической шлифовки и травления 10%-ым водным раствором персульфата аммония. Микроструктурные исследования проведены на оптическом микроскопе при увеличениях от ×50 до ×500.

Организация поточного процесса на стенде воспроизводила последовательность операций, характерную для монтажа многоэтажного стального каркаса: установка колонны в проектное положение, фиксация временными связями, подача ригеля, выверка, прихватка и окончательная сварка узлов сопряжения. Робот-манипулятор интегрировался в технологическую цепочку после этапа выверки, выполняя сварку нижнего пояса ригеля с колонной в нижнем положении, затем — сварку верхнего пояса и стенки в горизонтальном положении. Время цикла фиксировалось электронным хронометром контроллера. Безопасность зоны работы манипулятора обеспечивалась световыми барьерами и программным ограничением рабочей области в соответствии с рекомендациями по организации автоматизированных площадок фабричного типа, где параллельное присутствие персонала в зоне действия

робота исключается конструктивно [2].

Результаты исследования и их обсуждение. Комбинированная система технического зрения продемонстрировала устойчивость пространственной привязки к узловым соединениям в условиях, когда начальные отклонения монтируемых элементов достигали 4-7 мм по вертикали и 2-5 мм по горизонтали. В таблице 1 приведены обобщённые данные по точности позиционирования горелки относительно оси шва при различных значениях начального смещения узла, зафиксированные по 32 измерениям на стенде.

Таблица 1 - Точность позиционирования сварочной горелки относительно оси шва в зависимости от начального смещения узла сопряжения

Начальное смещение узла, мм	Средняя погрешность привязки по LiDAR, мм	Итоговая погрешность после коррекции стереокамерами, мм	Максимальное зафиксированное отклонение, мм
до 2,0	0,9	0,22	0,31
2,0 – 4,0	1,4	0,28	0,38
4,0 – 7,0	2,1	0,33	0,44

Источник: разработано автором.

Данные таблицы 1 свидетельствуют о том, что при значительных начальных отклонениях, характерных для крупногабаритных элементов на строительной площадке, итоговая погрешность позиционирования не превышает 0,44 мм, что сопоставимо с точностью цеховых установок аддитивного производства, указанной в [1]. Важно, что двухступенчатая архитектура системы позволяет избежать необходимости многократного перепозиционирования манипулятора и сократить время подготовительного этапа до 40-55 с на один узел.

Адаптивный контур управления параметрами сварки в реальном времени показал наибольшую эффективность при переменном зазоре в разделке кромок, что типично для узлов сопряжения прокатных двутавров с допусками на изготовление по ГОСТ 26020. На рисунке 1 представлена концепция функционирования адаптивного контура, реализованного на стенде.

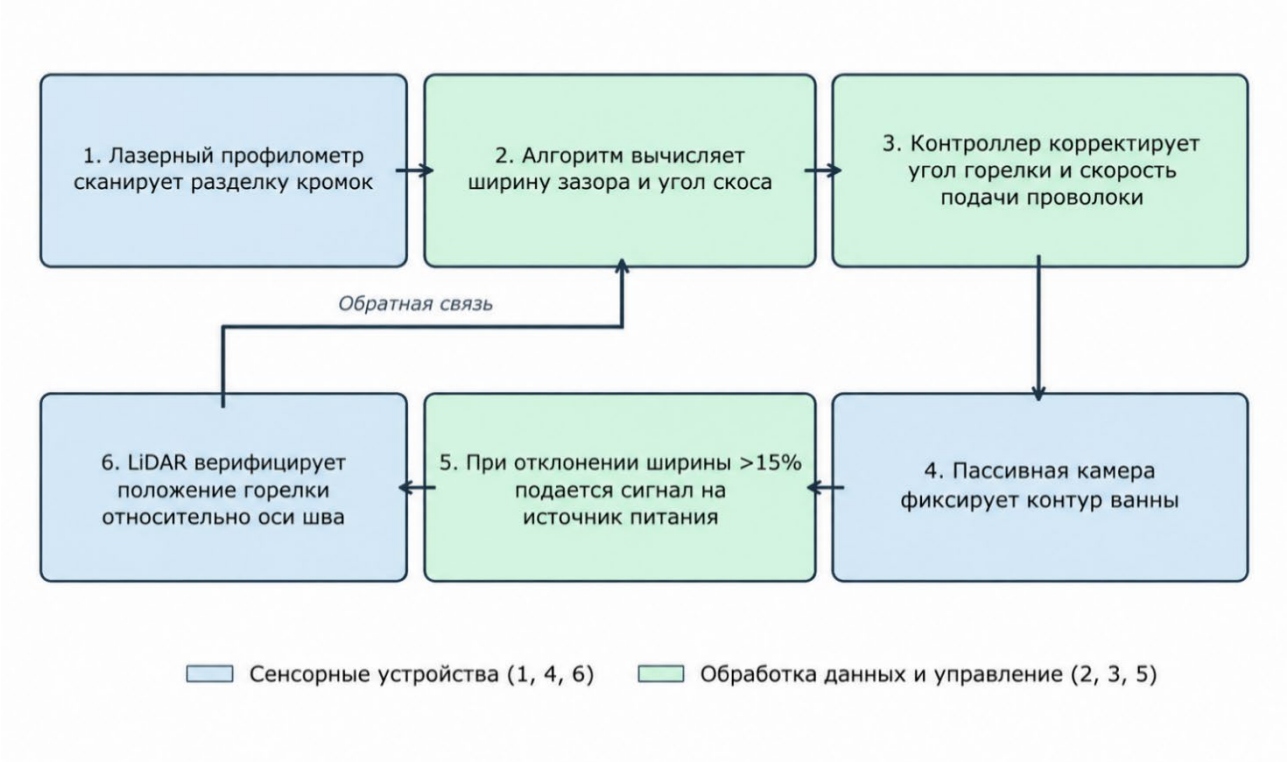


Рисунок 1 - Концепция адаптивного управления сварочным процессом на роботизированном стенде (источник: разработано автором)

Замкнутый контур функционирует на двух временных масштабах: быстрый контур (частота 500 Гц) реагирует на локальные изменения геометрии разделки, а медленный контур (период 0,8-1,2 с) компенсирует накопленные отклонения высоты и ширины валика по данным сканирования предыдущего прохода. Такое разделение согласуется с выводами о том, что в системах WAAM с открытым контуром качество наплавленного металла определяется точностью используемых моделей, тогда как замкнутый контур обеспечивает устойчивость системы к возмущениям [1].

Сравнительная оценка качества сварных соединений проведена по результатам ультразвукового контроля двух групп, каждая из которых включала 48 соединений. При роботизированной сварке внутренние дефекты зарегистрированы в 3 соединениях, что соответствует 6,25 % обследованной совокупности. Все выявленные дефекты локализовались в зоне перехода от корневого к заполняющему слою; эквивалентный диаметр отражателей не превышал 1,8 мм. В группе соединений, выполненных ручным способом,

дефекты выявлены в 9 случаях, или 18,75 % обследованной совокупности. В четырёх соединениях эквивалентный диаметр отражателя превышал 3,0 мм. Таким образом, наблюдаемая доля дефектных соединений при роботизированном выполнении работ оказалась ниже на 12,5 процентного пункта, что соответствует относительному уменьшению на 66,7 %. Полученные различия характеризуют сравнительные результаты контроля двух технологических вариантов. Их интерпретация должна учитывать возможное влияние применяемого способа сварки, параметров режима и характеристик соединяемых элементов (таблица 2).

Таблица 2 - Результаты ультразвукового контроля стыковых швов на стенде

Показатель	Роботизированная сварка (GMAW-CMT)	Ручная дуговая сварка (Э50А, d = 4 мм)
Общее число обследованных швов	48	48
Швы без дефектов	45 (93,8 %)	39 (81,3 %)
Швы с дефектами, имеющими эквивалентный диаметр ≤ 2 мм	3 (6,2 %)	5 (10,4 %)
Швы с дефектами, имеющими эквивалентный диаметр > 3 мм	0	4 (8,3 %)
Среднее время выполнения одного стыкового шва, мин	7,2	14,6

Источник: разработано автором.

В образцах роботизированной сварки зона термического влияния имела ширину 1,8-2,3 мм с чётко выраженной мелкозернистой структурой нормализованного участка, тогда как при ручной сварке ширина зоны термического влияния варьировалась в пределах 2,5-4,1 мм, а в 3 из 12 исследованных темплетов зафиксированы участки перегрева с крупноигольчатым видманштеттовым строением. Различие объясняется стабильностью погонной энергии при автоматизированном процессе: контроллер поддерживает скорость перемещения горелки с отклонением не более ±0,3 мм/с, при ручной сварке скорость перемещения электрода колеблется в значительно более широком диапазоне в зависимости от квалификации и физического состояния сварщика.

Показатели производительности, зафиксированные на стенде, указывают

на сокращение времени выполнения одного стыкового соединения в среднем в 2,03 раза при роботизированной сварке по сравнению с ручной. При этом следует учитывать, что в поточном цикле монтажа робот-манипулятор не требует перерывов, связанных с заменой электродов, отдыхом оператора и переналадкой рабочего места. На стенде суммарное время монтажа одного яруса каркаса (четыре колонны, четыре ригеля, восемь узлов сопряжения) составило 3 ч 40 мин при роботизированной сварке против 6 ч 50 мин при ручной, включая время выверки и прихватки, общее для обоих вариантов.

Интеграция робота-манипулятора в поточный метод монтажа этажерочных конструкций реализована по схеме, представленной на рисунке 2.

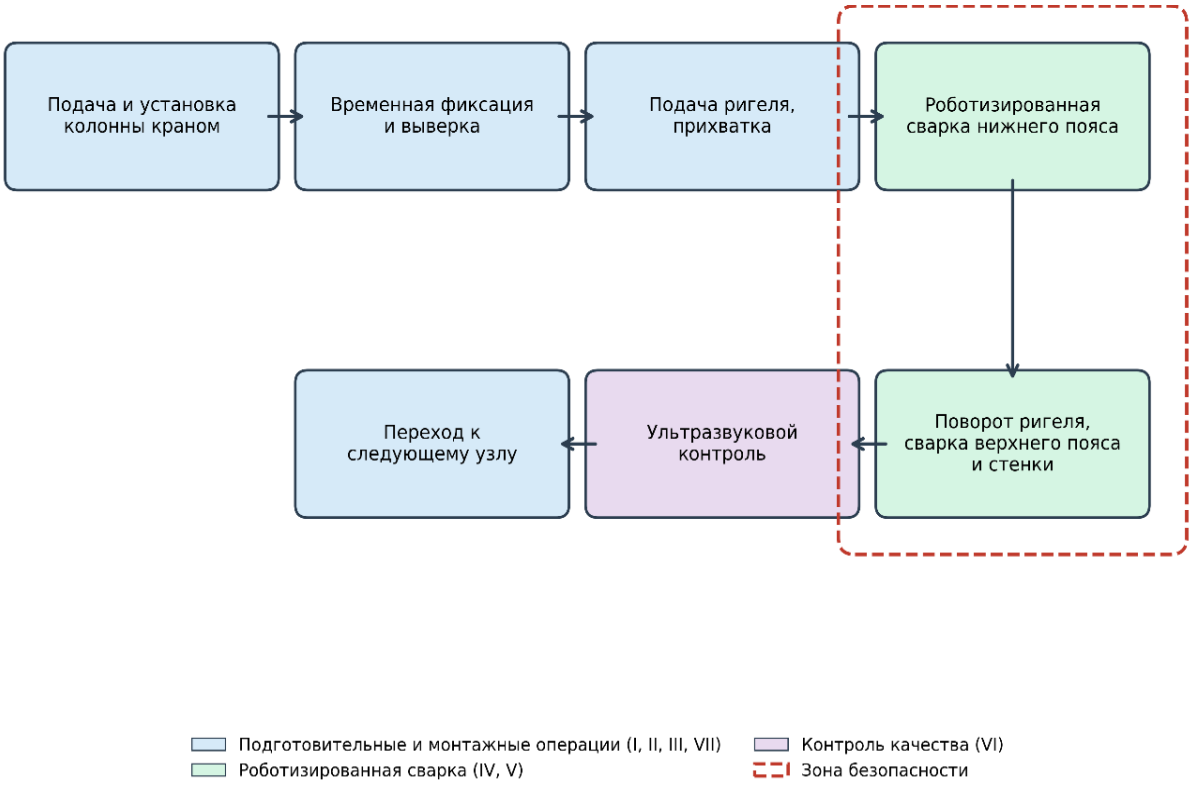


Рисунок 2 - Схема интеграции роботизированного комплекса в поточный монтаж стального каркаса (источник: разработано автором)

Робот-манипулятор занимает позиции IV и V, а крановые и выверочные операции остаются за пределами его рабочей области. Разделение функций соответствует принципу робот-ориентированного проектирования, сформулированному ещё в 1988 году и предполагающему адаптацию последовательности строительных операций к возможностям

автоматизированного оборудования [2]. Безопасность персонала обеспечена тем, что зона действия манипулятора физически отделена от зоны перемещения кранового груза: кран подаёт элемент на позицию III, после чего отходит за пределы ограждения, и лишь тогда световой барьер деактивируется, разрешая роботу начать сварку. Аналогичная логика заложена в концепции однофункциональных строительных роботов, где необходимость организации зон безопасности для персонала рассматривалась как одно из главных ограничений производительности [2]. В поточной схеме стенда это ограничение снято за счёт последовательного выполнения операций.

Следует подчеркнуть, что технологическая эффективность роботизированной сварки крупногабаритных стальных каркасов определяется качеством подготовки монтажной базы и допустимыми отклонениями устанавливаемых элементов. Данные таблицы 1 показывают, что при начальных смещениях свыше 7 мм погрешность привязки возрастает до значений, при которых стабильное формирование шва без дополнительных компенсирующих приёмов становится проблематичным. Это требует ужесточения допусков заводского изготовления проката и требований к точности фундаментных опор по сравнению с условиями, допустимыми при традиционной ручной сварке, когда небольшие смещения могут компенсироваться сварщиком визуально. В терминах технологии и организации строительства, речь идёт о необходимости робот-ориентированного проектирования всей цепочки предшествующих операций.

Резюмируя результаты экспериментальной кампании на стенде, роботизированная сварка крупногабаритных стальных каркасов при условии применения комбинированной системы технического зрения и адаптивного управления параметрами обеспечивает снижение доли дефектных соединений в 1,5-2 раза по сравнению с ручной дуговой сваркой при одновременном сокращении времени цикла вдвое. Данные ультразвукового контроля и металлографического анализа макрошлифов подтверждают, что стабильность

погонной энергии и точность позиционирования горелки являются определяющими факторами формирования качественной структуры шва. Вместе с тем переход к роботизированному монтажу в полномасштабном строительстве требует уточнения допусков на изготовление и установку элементов, разработки специализированных кондукторных приспособлений для временной фиксации и интеграции систем технического зрения непосредственно в технологию производства работ.

Выводы. Проведённая на стенде серия экспериментов подтвердила, что роботизированная сварка крупногабаритных стальных каркасов при условии применения двухступенчатой системы технического зрения и адаптивного контура управления параметрами дуги способна обеспечить более высокое качество стыковых соединений по сравнению с результатами ручной дуговой сварки теми же операторами на идентичных образцах. Доля швов, прошедших ультразвуковой контроль без регистрации внутренних дефектов, составила 93,8% для автоматизированного процесса против 81,3% при ручном выполнении, а среднее время формирования одного стыкового соединения сократилось до 7,2 мин.

Вместе с тем экспериментальные данные выявили ряд ограничений, которые необходимо учитывать при масштабировании технологии на строительные площадки. Погрешность позиционирования горелки, не превышающая 0,44 мм при начальных смещениях узла до 7 мм, возрастает за пределами этого диапазона, что указывает на необходимость ужесточения допусков заводского изготовления прокатных профилей и фундаментных опор по сравнению с действующими нормативными значениями. Без соответствующей корректировки допусков робот-манипулятор оказывается неспособным компенсировать накопленные погрешности.

С точки зрения организации строительного производства, поточная схема монтажа, реализованная на стенде, показала, что интеграция манипулятора в технологическую цепочку после этапа выверки и временной фиксации позволяет

исключить параллельное присутствие персонала в зоне сварки без ущерба для ритмичности процесса. Суммарное время возведения одного яруса каркаса сократилось с 6 ч 50 мин до 3 ч 40 мин, что при экстраполяции на многоэтажное здание даёт существенное уменьшение продолжительности монтажного периода. Данный результат согласуется с выводами о том, что автоматизированные площадки фабричного типа обеспечивают выигрыш в производительности прежде всего за счёт непрерывности и регламентированности материальных потоков. Ограничение, связанное с необходимостью организации зон безопасности для персонала, которое ранее рассматривалось как главный недостаток однофункциональных строительных роботов первого поколения [2], в поточной схеме снимается последовательным выполнением крановых и сварочных операций.

Следует, однако, признать, что стендовые испытания моделируют часть условий, характерных для полномасштабного строительства. Ветровые нагрузки, температурные перепады в течение рабочей смены, вибрации от соседних монтажных операций, ограниченная досягаемость манипулятора при высоте этажа свыше 4,5 м, необходимость перемещения робота между ярусами остаются за рамками проведённого эксперимента и требуют отдельного исследования. Полноценная автоматизированная система от CAD-модели до готового изделия до настоящего времени не коммерциализирована, а планирование траекторий содержит элементы, подразумевающие участие оператора [1]. Аналогичная ситуация складывается и в строительном монтаже, поскольку алгоритмы адаптивной коррекции траектории горелки, эффективно работающие на одиночном стыке в лабораторных условиях, нуждаются в верификации на многоузловых конфигурациях с переменным пространственным положением шва.

Список литературы

1. Байбурин А. Х., Мельник А. А., Лебедь А. Р. Общие тенденции развития строительных технологий // Современные тенденции в строительстве,

градостроительстве и планировке территорий. – 2026. – Т. 5. – №. 1. – С. 68-78.

2. Dong Y., Wang P., Xie D., Wu Z., Xiao M., Feng Y. Computer-aided and intelligent steel construction in a high-rise complex: A case study // Structures. – Elsevier, 2025. – Т. 82. – С. 110607.

3. Bulganbayev M. A., Suliyev R., Fonseca Ferreira N. M. Prototype for the application of production of heavy steel structures // Electronics. – 2024. – Т. 13. – №. 2. – С. 387.

4. Zhang W., Li J. The application of intelligent welding robots and visual detection algorithms in building steel structures // Scalable Computing: Practice and Experience. – 2024. – Т. 25. – №. 5. – С. 4265-4273.

5. Yu H., Peng Z., He Z., Huang C. Application maturity evaluation of building steel structure welding robotic technology based on multi-level gray theory // Engineering, Construction and Architectural Management. – 2024. – Т. 31. – №. 11. – С. 4372-4397.

6. Xiao M., Wang P., Liu W., Wu H., Dong Y. Applications of advanced off-site manufacturing for steel modular buildings // Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering. – Emerald Publishing Limited, 2026. – С. 1-13.

7. Yu H., Peng Z., He Z., Huang C. Application maturity evaluation of building steel structure welding robotic technology based on combination weight and multi-level grey theory // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 2023. – Т. 44. – №. 4. – С. 6435-6451.

8. Khosravani M. R., Haghighi A. Large-scale automated additive construction: overview, robotic solutions, sustainability, and future prospect // Sustainability. – 2022. – Т. 14. – №. 15. – С. 9782.

9. Chou C. C., Yu G. J., Wang K. J., Chang W. T., Wu C. L., Zhao C. C. J., ... Chou M. T. Application of robotic welding technology to the continuity plate weld within a steel built-up box column in buildings // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2023. – Т. 24. – №. 9. – С. 1563-1576.

10. Yao S., Xue L., Huang J., Zhang R., Zhong P., Guo L. Mobile welding robots under special working conditions: a review // The International Journal of Advanced

Manufacturing Technology. – 2025. – T. 138. – №. 9. – C. 3907-3923.

References

1. Bajburin A. X., Mel`nik A. A., Lebed` A. R. Obshhie tendencii razvitiya stroitel`ny`x texnologij // Sovremenny`e tendencii v stroitel`stve, gradostroitel`stve i planirovke territorij. – 2026. – T. 5. – №. 1. – S. 68-78.

2. Dong Y., Wang P., Xie D., Wu Z., Xiao M., Feng Y. Computer-aided and intelligent steel construction in a high-rise complex: A case study // Structures. – Elsevier, 2025. – T. 82. – P. 110607.

3. Bulganbayev M. A., Suliyev R., Fonseca Ferreira N. M. Prototype for the application of production of heavy steel structures // Electronics. – 2024. – T. 13. – No. 2. – P. 387.

4. Zhang W., Li J. The application of intelligent welding robots and visual detection algorithms in building steel structures // Scalable Computing: Practice and Experience. – 2024. – T. 25. – No. 5. – P. 4265-4273.

5. Yu H., Peng Z., He Z., Huang C. Application maturity evaluation of building steel structure welding robotic technology based on multi-level gray theory // Engineering, Construction and Architectural Management. – 2024. – T. 31. – No. 11. – P. 4372-4397.

6. Xiao M., Wang P., Liu W., Wu H., Dong Y. Applications of advanced off-site manufacturing for steel modular buildings // Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering. – Emerald Publishing Limited, 2026. – P. 1-13.

7. Yu H., Peng Z., He Z., Huang C. Application maturity evaluation of building steel structure welding robotic technology based on combination weight and multi-level gray theory // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 2023. – T. 44. – No. 4. – P. 6435-6451.

8. Khosravani M. R., Haghighi A. Large-scale automated additive construction: overview, robotic solutions, sustainability, and future prospect // Sustainability. – 2022. – T. 14. – No. 15. – P. 9782.

9. Chou C. C., Yu G. J., Wang K. J., Chang W. T., Wu C. L., Zhao C. C. J., ... Chou M. T. Application of robotic welding technology to the continuity plate weld within a

steel built-up box column in buildings // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2023. – T. 24. – No. 9. – P. 1563-1576.
10. Yao S., Xue L., Huang J., Zhang R., Zhong P., Guo L. Mobile welding robots under special working conditions: a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – T. 138. – No. 9. – P. 3907-3923.

Статья поступила в редакцию 05.05.2026; одобрена после рецензирования 19.06.2026; принята к публикации 08.10.2026.

The article was submitted 05.05.2026; approved after peer review 19.06.2026; accepted for publication 08.10.2026.