

УДК 629.5.081.4 + 621.91.05

ПРОМЫШЛЕННЫЕ МАНИПУЛЯТОРЫ И НОВЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ГОРИЗОНТЫ АВТОМАТИЗАЦИИ СУДОСТРОЕНИЯ И СУДОРЕМОНТА

Щеголева Ольга Анатольевна¹, методист учебно-методического сектора
e-mail: shh151@mail.ru

¹ Самарский филиал Волжский государственный университет водного транспорта, Самара, Россия

Аннотация. В работе исследуется роль промышленных манипуляторов и новых конструкционных материалов в автоматизации судостроения и судоремонта. Показано, что ручные сборочно-сварочные процессы становятся узким местом развития водного транспорта, а замещение их роботизированными комплексами сдерживается не столько техническими возможностями роботов, сколько сложностью адаптации к разным материалам (высокопрочным сталям, алюминиевым сплавам). Предложены три инженерных решения, повышающих эффективность автоматической сварки. Обосновано, что горизонты автоматизации в отрасли определяются не закупкой роботов, а разработкой интеллектуальных алгоритмов управления под конкретный материал и геометрию узла.

Ключевые слова: промышленные манипуляторы, судостроение, судоремонт, сборочно-сварочное производство, роботизация сварки, конструкционные материалы, высокопрочные стали, адаптивные алгоритмы.

INDUSTRIAL MANIPULATORS AND NEW STRUCTURAL MATERIALS: HORIZONS OF AUTOMATION OF SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR

Olga A. Shchegoleva¹, Methodologist of the educational and methodical sector
e-mail: shh151@mail.ru

¹ Samara Branch of the Volga State University of Water Transport, Samara, Russia

Abstract. The paper examines the role of industrial manipulators and new structural materials in the automation of shipbuilding and ship repair. It is shown that manual assembly and welding processes are becoming a bottleneck in the development of water transport, and their replacement by robotic complexes is hindered not so much by the technical capabilities of robots as by the difficulty of adapting to different materials (high-strength steels, aluminum alloys). Three engineering solutions have been proposed to increase the efficiency of automatic welding. It is proved that the horizons of automation in the industry are determined not by the purchase of robots, but by the development of intelligent control algorithms for specific materials and node geometry.

Keywords: industrial manipulators, shipbuilding, ship repair, assembly and welding production, welding robotics, structural materials, high-strength steels, adaptive algorithms.

Любой, кто хоть раз был на крупной судостроительной верфи, знает: сборочно-сварочные цеха — это отдельный мир. Там пахнет окалиной, флюсом и усталостью металла. И десятилетиями считалось, что автоматизация в таких условиях — это удел авиастроения, но не судостроения. Слишком большие секции. Слишком сложная геометрия. Слишком много ручных доводок.

Но последние пять лет показывают другое. Горизонты развития водного транспорта напрямую упираются в то, насколько быстро мы сможем перевести сборочно-сварочные процессы с ручного труда на промышленные манипуляторы. И здесь есть неожиданный поворот: самым сложным оказались не сами роботы, а их дружба с новыми конструкционными материалами [4].

Для количественной оценки эффекта от внедрения манипуляторов мы сравнили ключевые параметры ручной и автоматической сварки (таблица 1).

Таблица 1 — Сравнение характеристик ручной и роботизированной сварки при сборке судовых секций (усреднённые данные по открытым источникам и производственному опыту)

Параметр	Ручная дуговая сварка (электрод/полуавтомат)	Промышленный манипулятор с ЧПУ
Стабильность геометрии шва, мм	$\pm 2,0 \dots 3,5$	$\pm 0,5 \dots 0,8$
Доля дефектов (поры, непровары), %	5...12 (сильно от квалификации)	1,5...3,0
Рабочее время за смену (чистая сварка), часов	2,5...3,0 (усталость, перерывы)	6,5...7,0
Возможность работы в труднодоступных местах (узкие отсеки, межреберье)	частично (только при наличии допуска)	высокая (при правильном проектировании траектории)
Чувствительность к зазору в стыке, мм	до 4...5 мм (с опытом)	до 2...3 мм (без адаптации), до 5...6 мм (с техническим зрением)
Стоимость владения (оборудование + обучение + брак), у.е. на 100 м шва	низкая на входе, высокая на браке	высокая на входе, низкая при серийности

Как видно из таблицы, основной выигрыш манипулятор даёт не в максимальной скорости, а в стабильности и чистом времени работы.

Один из реальных кейсов внедрения роботизированной сварки на российской верфи средней полосы показал следующие результаты. На линии изготовления плоских секций при переходе с ручной дуговой сварки на манипулятора KUKA (Онежский судостроительный завод (ОССЗ) с системой адаптивного управления доля дефектных швов (поры, непровары, подрезы) снизилась с 8,2 % до 2,7 % уже через три месяца после наладки. При этом чистое время горения дуги за смену выросло с 2,8 часов (у сварщика 6-го разряда) до 6,5 часов у робота. Экономия на переварке и исправлении брака за первый год эксплуатации составила порядка 1,8 млн рублей на одну сварочную ячейку.

Недостатки традиционного сборочно-сварочного производства

Если посмотреть на типичный процесс сборки секции корпуса, то до недавнего времени это выглядело так. Сначала резка листа (часто ручная или полуавтоматическая). Потом подгонка кромок — опять человек с шлифмашиной. Потом прихватка. И только потом сварка. Причём длинные швы до сих пор варят полуавтоматом, а короткие, стыковые и в замкнутых объёмах — вообще электродом.

Роботизация ломает эту цепочку. Но не так, как её обычно представляют. Не «взяли робота, запрограммировали, и он варит». На судостроительных размерах это не работает [7].

Преимущества манипуляторов перед ручной сваркой

Многокоординатный роботизированный комплекс на верфи выигрывает не в скорости — человек с электродом порой даже быстрее. Он выигрывает в трёх вещах:

1. **Повторяемость** — каждый сантиметр шва одинаковый.
2. **Доступ** — манипулятор может залезть в межреберное пространство, куда сварщик физически не пролезет.
3. **Контроль в реальном времени** — датчики тока, напряжения и скорости подачи проволоки дают картинку процесса, которую человек просто не видит.

Влияние конструкционных материалов на режимы роботизированной сварки

Казалось бы, новые конструкционные материалы — это хорошо. Высокопрочные стали с пределом текучести выше 700 МПа. Алюминиево-скандиевые сплавы для лёгких корпусов. Полимерные композиты для надстроек. Но для сварочного манипулятора каждый такой материал — это отдельная головная боль.

Ошибка начинающих проектов автоматизации в том, что под каждый новый материал нужно менять не оснастку, а алгоритм. Таблица 2 показывает эту зависимость.

Таблица 2 — Особенности роботизированной сварки различных конструкционных материалов в судостроении

Материал	Где применяется в судне	Главная проблема для манипулятора	Требуемое дополнение к системе управления
Низкоуглеродистая сталь (обычная)	Набор корпуса, палубы	минимальная	базовый алгоритм стабилизации дуги
Высокопрочная сталь (690...960 МПа)	Особо нагруженные секции (ледовый пояс)	риск холодных трещин, узкий температурный коридор	контроль предварительного подогрева + замедленное охлаждение по программе
Алюминиевый сплав (5xxx, 6xxx серии)	Надстройки, лёгкие корпуса (быстроходные суда)	высокая теплопроводность → быстрый отвод тепла, деформации	повышенная скорость подачи проволоки, уменьшенный шаг перемещения
Дуплексная нержавеющая сталь	Трубопроводы, химические танки	чувствительность к перегреву, выпадение вредных фаз	точная регистрация температуры каждого прохода
Полимерный композит (сварка не применима — механическое крепление)	Надстройки, ограждения	— (сварка не используется)	— (роботизация другого типа — сверловка и клёпка)

Почему? Потому что у всех них разная теплопроводность, разная усадка, разная склонность к горячим трещинам. То, что человек-сварщик чувствует руками и слышит по звуку дуги, робот должен получать в виде цифровых сигналов. И если мы не научим манипулятор «чувствовать» материал, то никакой автоматизации не получится [3].



Прежде чем перечислять конкретные решения, важно отметить, что сам сварочный манипулятор как единица оборудования должен удовлетворять требованиям **ГОСТ 30275-96 «Манипуляторы для дуговой сварки. Общие технические условия»**. Этот стандарт регламентирует грузоподъёмность, точность позиционирования (обычно не хуже $\pm 0,5$ мм) и требования безопасности. Без выполнения этих базовых условий любые «умные» алгоритмы не имеют смысла. Итак, три рабочих решения, которые работают именно в рамках требований этого ГОСТа.

Первое. Адаптивный алгоритм ведения дуги, который каждые 50 миллисекунд пересчитывает скорость сварки в зависимости от теплового потока. На входе — данные с термопары на облицовочном слое. На выходе — стабильный проплав даже при уходе зазора до 3 мм.

Второе. Техническое зрение не для ориентации в пространстве (это уже есть), а для распознавания типа кромки и состояния поверхности. Робот видит, что пошло окисление, — даёт команду на локальную зачистку щёткой.

Третье. Прецизионная подача присадочной проволоки с обратной связью по расплавлению. Когда варишь разнородные стали — а в судоремонте это сплошь и рядом, — манипулятор сам подбирает скорость подачи под текущий тепловой баланс.

На рисунке 1 показан контур адаптивного управления, который принципиально отличает современную роботизированную сварку от жёстко запрограммированной. В отличие от классической П- или ПИД-регуляции, здесь на вход подаётся не одна обратная связь, а четыре разнородных сигнала. Задача алгоритма — свести их к единому управляющему воздействию. Инженерная сложность в том, что эти сигналы имеют разную частоту обновления: ток и напряжение приходят каждые 1-2 миллисекунды, геометрия кромки — раз в 50-100 мс, а температура меняется на масштабе секунд [6].

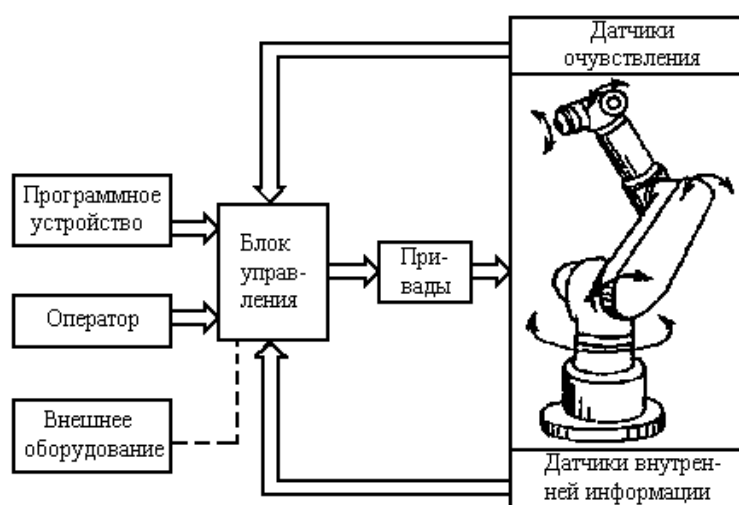


Рисунок 1 — Упрощённая структура адаптивного управления промышленным манипулятором при сварке судовых конструкций: обратная связь по четырём параметрам

В судостроении ещё можно выстроить идеальную линию со свежими листами и чистым металлом. А вот в судоремонте — никогда. Там всё начинается с обрезки корродированного металла, с разделки старых швов, с наплавки на изношенные детали. И здесь промышленный манипулятор с правильной системой управления становится незаменим.

Пример из практики (условный, но жизненный). При ремонте винто-рулевой группы одного речного судна требовалось наплавить изношенный участок гребного вала. Толщина

наплавки — от 3 до 12 мм неравномерно. Человек с полуавтоматом сделал бы за два дня с последующей мехобработкой «на конус». Манипулятор с адаптивным слоевым сканированием сделал за смену, причём неравномерность наплавки оказалась в два раза меньше.

Ограничения существующих алгоритмов управления

Если говорить откровенно, то главное узкое место сейчас — не роботы и не материалы. А математика. Точнее, отсутствие простых и надёжных моделей теплового поведения свариваемого узла для разных сочетаний сталей. Большинство существующих моделей работают либо для лабораторных образцов, либо для однотипных соединений. А в судостроении — везде разное: толщины, пространственные положения, стеснённость.

Пока мы не решим эту математическую задачу, горизонты автоматизации останутся горизонтами, а не реальностью [1, 6].

Роботизация судостроения и судоремонта — это не модная тема для конференций. Это вопрос экономики перевозок. Чем быстрее и качественнее мы будем строить и ремонтировать флот, тем дешевле станет тонно-километр. А значит — тем конкурентоспособнее будет речной и морской транспорт.

Промышленные манипуляторы и новые конструкционные материалы действительно задают горизонты. Но горизонт — это не то, чего мы достигнем завтра [5]. Это направление, в котором мы должны двигаться с открытыми глазами, понимая и плюсы, и пока нерешённые проблемы.

Список литературы:

1. Бимберков П.А. Перспективы роботизации процесса при модернизации барж-площадок проекта Р-56. Научные проблемы водного транспорта. 2026. № 86. С. 13-21.
2. Бурмистрова, А.Е. Обоснование применения на судостроительных верфях многофункциональных сборочно-сварочных манипуляторов / А.Е. Бурмистрова, О.А. Щеголева, Е.Г. Бурмистров, Т.А. Михеева // Научные проблемы водного транспорта. – 2023. – № 74. – С. 27–36. – DOI: 10.37890/jwt.vi74.343.
3. Винокуров А.О. и др. Робототехнический комплекс для автоматизированной покраски поверхностей судов. Автоматизация в промышленности. 2024. № 10. С. 33-37.
4. Горькавый М.А. и др. Внедрение интеллектуальных роботизированных систем в производственные процессы судостроительного предприятия. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2. Ч. 2. С. 97-104.
5. Ермолов И.Л. и др. Перспективный мобильный робототехнический комплекс для очистки корпусов судов. Морские интеллектуальные технологии. 2023. Т. 1. № 2. С. 53-59.
6. Лёвкин А.Д., Кикоть Я.Р., Чумак Д.М. Внедрение инновационных технологий ремонта и модернизации корпусов судов. Human Progress. 2024. Т. 10. Вып. 11.
7. Садыков Р.Х., Стаценко В.Н., Сапич Р.В. Технология механизированной роботизированной сварки // Вестник Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского. 2025. № 98.

