

УДК 629.4.023.1

Современные технологические процессы сварки и их эффективность при изготовлении кузовов высокоскоростного транспорта

Д. П. Кононов, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Кононов Д. П., Будюкин А. М., Кондратенко В. Г. Современные технологические процессы сварки и их эффективность при изготовлении кузовов высокоскоростного транспорта // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 51–63. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-51-63

Аннотация:

Цель: Установить, какие материалы наиболее перспективны для создания кузовов поездов ВСТ, и выбрать оптимальные способы сварки для выполнения их сборки. **Методы:** Анализ свойств применяемых и перспективных металлов, используемых при производстве кузовов скоростных поездов ведущими производителями подвижного состава в Европе, Японии и Китае. **Результаты:** Для создания кузовов ВСТ наиболее широко применяются конструкции из нержавеющей стали и алюминиевых сплавов, соединяемые различными методами сварки. Сделан вывод, что в настоящее время лазерная сварка является наиболее технологичным методом благодаря высокой степени автоматизации и превосходному качеству получаемых сварных соединений. **Практическая значимость:** Рекомендации могут быть использованы конструкторами и вагоностроителями для создания и постройки первого российского высокоскоростного поезда «Белый кречет».

Ключевые слова: Изготовление кузова ВСТ, материал для кузова, технология сварки, автоматизация сварки, применение сварочных роботов, дефект сварного шва, анализ деформации и напряжения в соединении.

Изготовление кузова — один из самых сложных процессов при производстве высокоскоростных транспортных средств (ВТС). С одной стороны, кузов должен быть как можно легче и обладать отличными аэродинамическими свойствами; с другой стороны, факторы пассивной безопасности, обеспечиваемые жесткостью кузова, имеют большое значение для безопасности пассажиров [1]. Для удовлетворения этих требований постоянно совершенствуются технологии сборки кузовов вагонов [2].

В основном для производства кузова применяют нержавеющие стали и различные сплавы алюминия [3–5]. Конструкция кузова из нержавеющей стали позволяет снизить вес на 10–20 % по сравнению с обычной конструкцией стального кузова. Благодаря хорошей коррозионной стойкости кузов не нуждается в покраске, что значительно сокращает трудозатраты на производство. В настоящее время в кузовостроении в основном используются нержавеющие стали марки SUS304 и SUS301L (обозначение по японскому стандарту JIS), эта же сталь обозначается по американскому стандарту — AISI304 и AISI301L. Обе эти марки стали имеют

высокую коррозионную стойкость, однако сталь марки 301 несколько более склонна к ржавлению и коррозии в сложных условиях эксплуатации, чем сталь 304 (табл. 1). Это все аналоги широко применяемой отечественной стали А2.

ТАБЛИЦА 1. Химический состав нержавеющей стали марок SUS304 и SUS301L

Химический элемент и его содержание, %	Марка нержавеющей стали	
	SUS301	SUS304
Хром	16–18	18–20
Никель	6–8	8–10,5
Углерод, не более	0,15	0,08

Букву L в конце обозначения стали следует понимать как «низкоуглеродистая». Этот сплав содержит всего 0,02 % углерода вместо 0,05 %, что не оказывает влияние на качество стали, но зато увеличивает ее стойкость при горячей сварке в среде TIG или MIG.

Сталь марки SUS304 (AISI 304) пользуется самым высоким спросом из класса нержавеющей. Высокая востребованность и широкое применение связаны в первую очередь с универсальностью ее свойств. Существует множество методов сварки нержавеющей стали, таких как контактная точечная сварка, плазменная сварка, водородная дуговая сварка и т. д. [6].

Промышленные алюминиевые сплавы подразделяются на две группы: деформируемые (конструкционные) и литейные. Деформируемые сплавы служат для изготовления полуфабрикатов прокаткой, прессованием, ковкой, а литейные сплавы применяются для получения отливок.

Алюминиевые деформируемые сплавы серий 5000, 6000 и 7000 (обозначение по системе **Aluminum Association** — США и Канада) широко применяются при производстве корпусов ВСТ с применением сварочных работ, где необходимы высокие технические характеристики материалов.

Сплавы серии 5000 представляют собой сплавы Al-Mg. Так, например, алюминиевый сплав 5005, обычно содержащий 0,8 % Mg, обладает высокой прочностью, хорошей свариваемостью и коррозионной стойкостью. Этот сплав является нетермообработываемым, его можно укрепить методом холодной обработки.

Сплавы серии 6000 представляют собой сплавы Al-Mg-Si. Они обладают хорошей прочностью и коррозионной стойкостью и являются хорошим конструкционным материалом. Однако сварные соединения имеют низкое качество, поэтому большинство конструкций собирается с помощью небольших винтов, заклепок и болтов.

Сплавы серии 7000 представляют собой сплавы Al-Zn-Mg. В целом алюминиевые сплавы имеют множество достоинств, таких как хорошая коррозионная устойчивость, оптимальное соотношение массы и прочности. Облегченная

конструкция с использованием специальных алюминиевых сплавов и специально разработанных профилей значительно снижает нагрузку на полотно пути. В то же время они так же прочны и безопасны, как и их более тяжелые стальные аналоги.

В России недавно был создан отечественный сплав 1343 (алюминий-кремний-магний) для создания конструкций кузовов высокоскоростных поездов, являющийся аналогом зарубежного сплава 6005. Благодаря оптимизации химического состава российский сплав имеет более высокие характеристики по сравнению с зарубежными аналогами. Удалось повысить его усталостную долговечность на 12–15 %, а прочность увеличить на 5 %.

Алюминий лучше поглощает и гасит вибрации, чем сталь. Даже при сильных ударах алюминиевые компоненты поглощают не менее 50 % энергии удара, не давая ей распространяться дальше. Алюминиевые кузова более жесткие на скручивание, что обеспечивает их повышенную устойчивость.

При сварке алюминиевых сплавов, учитывая их особенности (высокую скорость окисления, неизменность цвета при нагревании и значительную усадку), могут возникать различные дефекты. Механические и физико-химические свойства алюминия определяют сложность его сварки. При сварке алюминиевого кузова правильный выбор метода сварки существенно влияет на предотвращение дефектов. Алюминий и его сплавы при плавлении и повторном затвердевании претерпевают объемные изменения (до 4 %), что приводит к значительным искажениям швов и образованию трещин.

Существует множество методов сварки кузовов из нержавеющей стали и алюминиевых сплавов. Рассмотрим наиболее распространенные из них.

Контактная сварка выполняется при низком напряжении и высоком токе для обеспечения достаточного количества энергии, необходимой для нагрева материала и устранения потенциальных источников опасности.

Существуют различные виды контактной сварки:

– *Точечная сварка* — важнейший метод в автомобильном производстве. Современные системы электронного управления сделали возможной сварку высокопрочных сталей и сталей с покрытием. При соединении деталей возможно использование клеев для повышения прочности, твердости и устойчивости к вибрации.

– *Стыковая сварка* применяется исключительно для сборки не несущих соединений.

Преимущества сварки сопротивлением:

- высокое качество получаемых соединений;
- высокая производительность;
- отсутствие необходимости в расходных материалах;
- низкие требования к качеству сопрягаемых соединений;

– отсутствие потребности в дорогостоящем оборудовании для контроля сварного шва.

Недостатки контактной точечной сварки:

- значительная сложность используемого оборудования;
- относительно высокое энергопотребление;
- возможные утечки в местах соединений;
- необходимость изготовления большого количества перекрывающихся деталей, что ведет к повышенному расходу материала.

MIG/MAG (MetallInert/ActiveGas) — полуавтоматическая дуговая сварка плавящимся электродом. Сварка в среде инертного/нейтрального защитного газа широко распространена и является универсальным методом сварки стали для промышленного применения и иногда называется GMA (gas metal arc). Сварка MIG/MAG подходит как для автоматизированной, так и для роботизированной сварки. Можно применять смеси газов, содержащих углекислый газ, аргон, кислород, гелий и азот. Сварка MIG в основном используется для сварки деталей толщиной более 3 мм.

Сварку кузова ВСТ из нержавеющей стали лучше всего проводить по технологии TIG (аргонодуговая сварка неплавящимся электродом), ее целесообразно применять для листов толщиной 0,5–8 мм. Для тонких листов (до 2,5 мм) требуется особая аккуратность и точная настройка оборудования. Данная технология обеспечивает высокое качество сварного шва, однако для толстых листов (например, 8 мм) необходима разделка кромок и выполнение нескольких проходов.

Наиболее характерным дефектом при этом виде сварки является появление трещин в сварном шве. При автоматической и полуавтоматической дуговой сварке, а также при сварке в инертном газе плавящимися и неплавящимися электродами могут возникать термические трещины и трещины напряжения. Так, алюминиевый сплав серии 6000 более подвержен образованию трещин, чем другие (рис. 1) [7].

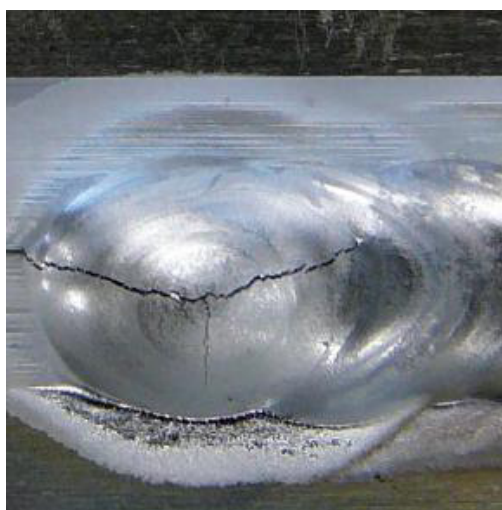


Рис. 1. Растрескивание сварочного шва после сварки алюминиевого сплава [7]

В некоторых случаях проблема термического растрескивания при сварке алюминия может быть решена путем подбора присадочного металла, химические свойства которого менее склонны к образованию трещин в процессе сварки.

Данный метод сварки получил широкое распространение в Европе, США и Японии благодаря простоте автоматизации и высокой производительности. Сварка полуавтоматическим дуговым плавящимся электродом активно применяется и отечественными производителями, например, при проведении сварочных работ по производству кузова российского электропоезда «Финист» (рис. 2) [8].

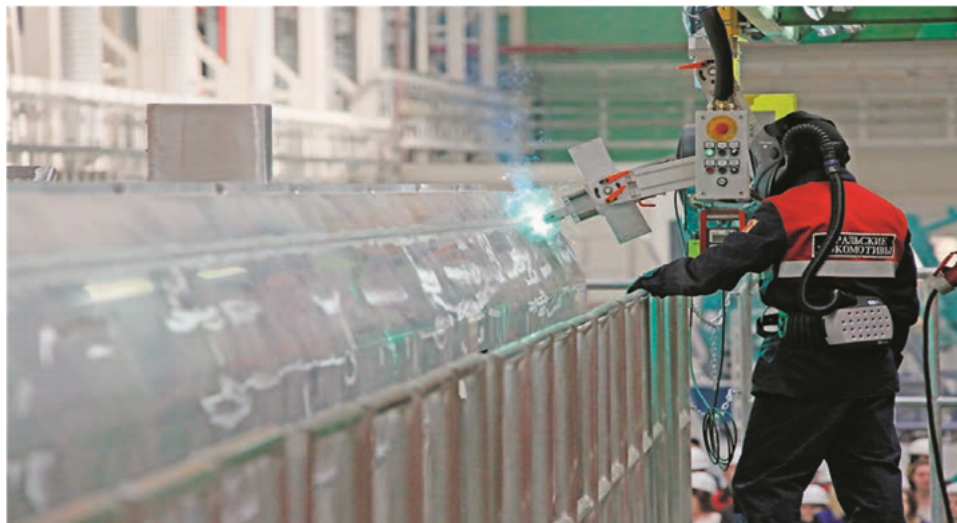


Рис. 2. Роботизированная сварка алюминиевого корпуса в среде защитного газа на предприятии «Уральские локомотивы» [8]

Сварка трением с перемешиванием (СТР) — это процесс преобразования механической энергии, возникающей при движении одного из компонентов, в тепловую энергию. В результате трения вращающегося инструмента между двумя соединенными торцами деталей возникает нагрев, и за счет пластического деформирования между соединяемыми частями устанавливаются межзатомные связи. Швы, получаемые этим методом сварки, образуются без расплавления металла. Металл разогревается до пластичного состояния и перемешивается рабочим инструментом.

Фрикционная сварка является прогрессивным способом сварки. Благодаря небольшому объему нагреваемого слоя металла, сварочный цикл может быть выполнен за короткое время, зависящее от свойств материала. Сварка трением имеет высокую производительность, сравнимую с контактной стыковой сваркой. Данная технология сварки позволяет избежать серьезных деформаций и растрескивания сварного шва.

Эффективность и энергоэффективность этого вида сварки в 5–10 раз выше, чем у стыковой сварки. Сварка трением с перемешиванием является относительно автоматизированной и может выполняться без вмешательства человека. Кроме

того, этот метод сварки требует вдвое меньше энергопотребления по сравнению со сваркой плавлением. Обычная сварка корпуса увеличивает его вес за счет сварных швов из присадочного металла. Сварка трением с перемешиванием не изменяет его веса, что особенно важно при высоких скоростях движения современных скоростных поездов.

Такая сварка может выполняться только на стационарных машинах значительных размеров, поэтому при использовании переносного оборудования по данной технологии очень трудно приварить мелкие детали к крупной конструкции.

При сварке трением алюминия и его сплавов в некоторых случаях могут возникать дефекты, связанные с образованием пор, трещин, непроваров, а также с изменением структуры металла в околошовной зоне. Качество сварного шва может ухудшиться неправильный выбор параметров сварки, загрязнение свариваемых поверхностей и недостаточная пластичность металла.

Наиболее часто встречающимся дефектом является непровар корня шва, который характеризуется отсутствием металлических связей по сечению свариваемых кромок деталей. Дефект возникает из-за невозможности расплавленного металла достичь корня шва. В конце сварного шва на выходе рабочего инструмента образуется отверстие. На поверхности неизбежно появляются дефекты в виде лунок, в которых могут оставаться твердые включения, такие как остатки поврежденного рабочего инструмента, пыль и остатки смазочного материала.

Для выявления дефектов в сваренных по технологии STP алюминиевых пластинах толщиной 3,5 мм следует применять метод неразрушающего контроля — ультразвуковую дефектоскопию. Например, современный дефектоскоп модели A1550 Intro Visor, который необходимо настроить на выявление вертикальных трещин в сварном шве. Проведение контроля позволило обнаружить дефекты в зонах 1–5, представленные на рис. 3 [9].

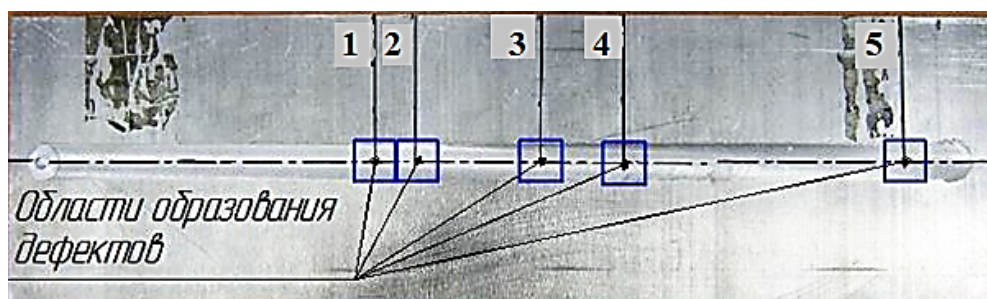


Рис. 3. Образование дефектов при сварке трением с перемешиванием [9]

Лазерная сварка — современный и технологичный метод соединения материалов. В производстве кузовов этот процесс преимущественно используется для соединения перекрывающихся деталей, то есть лист к листу, лист к отливке и отливка к экструдированному профилю [10]. Данный метод является альтернативой точечной сварке, клепке и сварке в инертном газе. По сравнению с другими

сварочными процессами лазерная сварка требует минимального объема отделочных работ.

Бесшовная сварка может быть достигнута исключительно при использовании лазерного метода. Лазерный луч расплавляет материал свариваемой панели, при необходимости добавляется сварочная проволока. Применение защитных газов предотвращает химическую реакцию металла с компонентами окружающего воздуха [11, 12].

Процесс характеризуется высокой степенью автоматизации с использованием различных систем, одной из которых является роботизированный модуль КУКА (рис. 4), широко применяемый при производстве железнодорожного подвижного состава. Благодаря роботизированной руке сварочная камера КУКА способна выполнять сложные и уникальные сварочные задачи, включая объемную сварку. Лазер обеспечивает обработку швов в труднодоступных местах с высоким качеством сварки.

Недостатки метода связаны с тем, что лазерная сварка — это чисто производственный процесс, который требует дорогостоящего оборудования, строгого соблюдения требований к сборке и тщательной подгонки компонентов перед сваркой.

Теоретически возможно расширить область применения лазерной сварки путем приобретения и установки более дорогостоящего оборудования, однако это экономически нецелесообразно. Кроме того, лазерное оборудование демонстрирует низкую устойчивость к экстремальным температурам, в то время как другое сварочное оборудование функционирует без сбоев в аналогичных условиях. Формирование сварного шва может сопровождаться квазипериодической неустойчивостью поверхности, известной как хампинг-эффект (рис. 5) [13].



Рис. 4. Роботизированные комплексы КУКА для лазерной сварки [11]

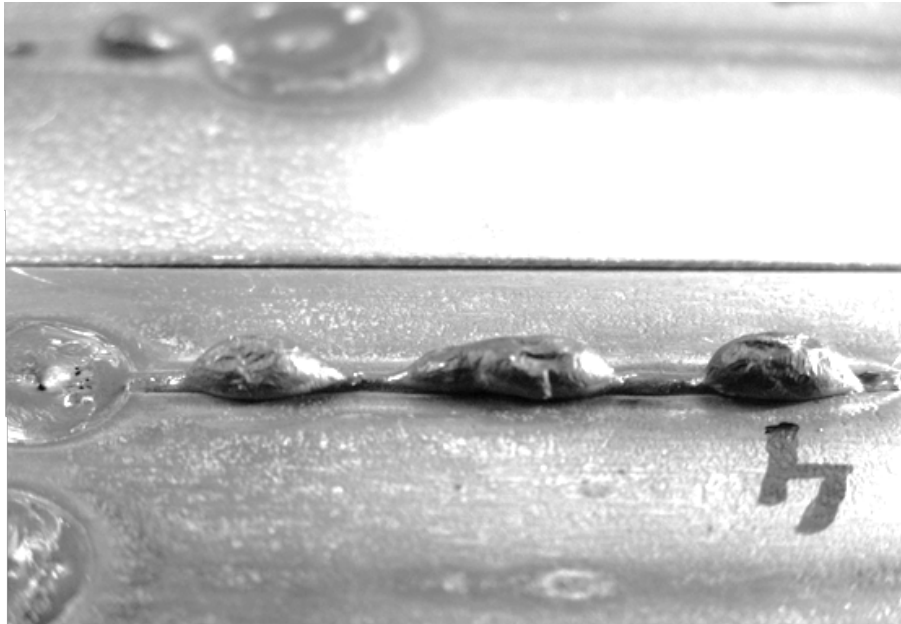


Рис. 5. Квазипериодические волны расплава на поверхности шва (хампинг-эффект) [13]

Эффект хампинга при лазерной сварке возникает при работе с присадочной проволокой, которую погружают в жидкую сварочную ванну. Если проволока погружается слишком глубоко в расплав, это может привести к выбросу металла и образованию дефектов в виде отверстий или неровностей на поверхности шва. Данный эффект считается нежелательным дефектом, который возникает под влиянием различных факторов.

Устранить этот дефект позволяют:

- правильный подбор параметров сварки
- контроль глубины погружения проволоки
- применение защитных газов
- создание стабильной сварочной среды

Применение лазера оправдано как с экономической, так и с производственной точки зрения. Преимущественно лазерная сварка используется для выполнения внутренних соединений.

При проведении любых сварочных работ необходим анализ деформаций и напряжений в соединении. В конструкции различают:

- **Временные напряжения и деформации**, которые возникают из-за изменения температуры в процессе сварки
- **Постоянные напряжения и деформации**, которые формируются после завершения сварки и остывания конструкции. Они появляются в локальной области сжатой конструкции, когда напряжение в этой области превышает предел текучести конструкционного материала

Растягивающие остаточные напряжения считаются крайне нежелательными (рис. 6).

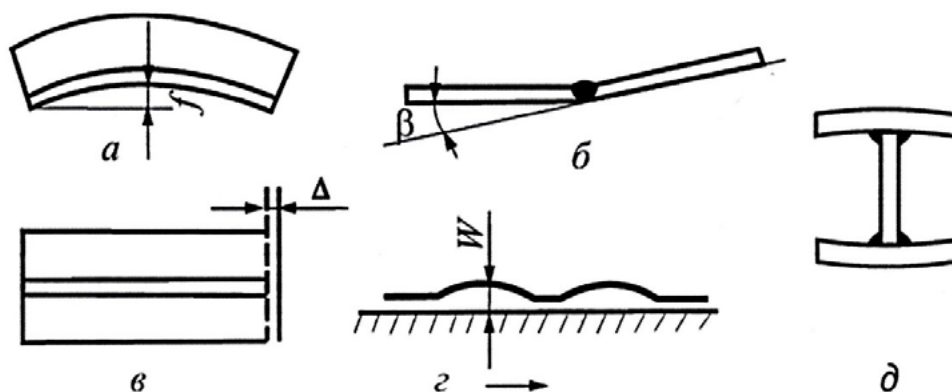


Рис. 6. Основные виды деформации сварных конструкций:
 а — прогиб; б — угол поворота; в — укорочение; г — выход из плоскости равновесия; д — грибовидность полок [14]

Для предотвращения деформации швов и напряжений в сборочных чертежах сварных конструкций должны учитываться меры, которые позволяют снизить напряжения и деформации сварного шва. К этим мероприятиям относятся: применение минимального количества сварных швов наименьшего размера, уменьшение поперечных швов и швов разной толщины, не слишком быстрое изменение поперечного сечения сварных элементов и минимизация количества наплавленного металла.

Например, использовать двусторонние сварные швы с Х- и К-образными разделками кромок, если толщина металла превышает 12 мм и односторонняя сварка невозможна, не располагать сварные швы в зонах наибольшего напряжения при эксплуатации изделия и добавлять припуски на изменение размеров к номинальным размерам конструкции.

Таким образом, результаты анализа, выполненного отечественными и зарубежными учеными, свидетельствуют о том, что на данный момент именно лазерная сварка является наиболее технологичным методом сборки кузовов ВСТ благодаря высокой степени автоматизации и отличным показателям качества сварных соединений.

Для производства кузова российского высокоскоростного поезда (начало сварочных работ запланировано на осень 2025 г.) целесообразно использовать комплекс современных сварочных технологий, включающих автоматическую аргонодуговую сварку, лазерную сварку, сварку трением с перемешиванием

Список источников

1. Киселев И. П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт: общий курс: учебное пособие в 2 томах / И. П. Киселев, Л. С. Блажко, Н. С. Бушуев, А. П. Ледяев и др. — М., 2014. — Т. 1.

2. Кондратенко В. Г. Совершенствование технологии сборки кузовов железнодорожных вагонов / В. Г. Кондратенко, А. М. Будюкин, Е. Р. Жуков // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2017. — С. 98–101.
3. Жуков Е. Р. Современные материалы и конструкции, применяемые для отечественных железнодорожных вагонов / Е. Р. Жуков, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2017. — С. 95–98.
4. Костюкович Е. А. Анализ требований к материалам деталей подвижного состава, эксплуатируемых в условиях низких температур, с целью снижения хрупкого разрушения / Е. А. Костюкович, А. М. Будюкин // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2018. — С. 96–98.
5. Стефанишина А. Н. Применение современных инновационных материалов в конструкции подвижного состава / А. Н. Стефанишина, П. Е. Федорчук, А. М. Будюкин, С. В. Урушев // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2018. — С. 111–117.
6. Василенко П. Г. Оценка результатов внедрения современных методов сварки кузовов локомотивов / П. Г. Василенко, А. М. Будюкин // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2017. — С. 37–38.
7. Как предотвратить проблемы при сварке алюминия? // URL: <https://blog.svarcom.net/news/222problemy-pri-svarke-alyuminiya.html> (дата обращения: 16.08.2025).
8. «Уральские локомотивы» начали подготовку к производству высокоскоростных поездов // URL: <https://rollingstockworld.ru/passazhirskij-ps/uralskie-lokomotivy-nachali-podgotovku-k-proizvodstvu-vysokoskorostnyh-poezdov/> (дата обращения: 16.08.2025).
9. Кривонос Е. В. Анализ дефектов, возникающих при сварке трением с перемешиванием / Е. В. Кривонос, И. К. Черных, Е. Н. Матузко, Е. В. Васильев // Машиностроение и машиноведение. Омский научный вестник. — 2017. — № 2(152). — С. 24–27.
10. Sibillano T. Spectroscopic monitoring of penetration depth in CO2 Nd: YAG and fiber laser welding processes / T. Sibillano, D. Rizzi, A. Ancona, S. Saludes-Rodil et al. // Journal of Materials Processing Technology. — 2015. — Pp. 910–915.
11. Автоматическая сварка изделий из алюминиевых сплавов: особенности технологии, реализация в виде комплексной автоматизированной системы и роботизированного комплекса. — URL: https://www.aluminas.ru/upload/iblock/8d8/_-_._.__.pdf (дата обращения: 16.08.2025).
12. Универсальный сварочный робототехнический комплекс KUKA. — URL: <https://automachin.com/projects/svarka/universalnyy-svarochnyy-robototekhnicheskiiy-kompleks-avv/> (дата обращения: 16.08.2025).

13. Хаскин В. Ю. Возникновение хампинг-эффекта при лазер-МIG сварке высокопрочной стали АН-32 / В. Ю. Хаскин, В. Н. Коржик, И. Н. Ключков, Д. Цай и др. // TECHNICAL SCIENCE. Colloquium-journal. — 2019. — № 13(37). — С. 19–24.

14. Юхин Н. А. Дефекты сварных швов и соединений / Н. А. Юхин. — М.: СОУЭЛО, 2007. — 56 с.

Дата поступления: 05.06.2025

Решение о публикации: 31.08.2025

Контактная информация:

КОНОНОВ Дмитрий Павлович — д-р техн. наук, доц.; d_kononov@mail.ru

БУДЮКИН Алексей Митрофанович — канд. техн. наук, доц.; remont_ps21@mail.ru

КОНДРАТЕНКО Владимир Григорьевич — канд. техн. наук, доц.; tehmet_pgups@mail.ru

Contemporary Welding Processes and Their Efficiency in the Manufacturing of High-Speed Railway Car Bodies

D. P. Kononov, A. M. Budyukin, V. G. Kondratenko

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kononov D. P., Budyukin A. M., Kondratenko V. G. Contemporary Welding Processes and Their Efficiency in the Manufacturing of High-Speed Railway Car Bodies. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 51–63. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-51-63

Summary

Purpose: To determine the most promising materials for creating the HSR car bodies. To select the optimal welding methods for their assembly. **Methods:** An analysis of the properties of current and prospective metals used in the manufacture of high-speed railway car bodies by leading rolling stock manufacturers in Europe, Japan and China. **Results:** In the fabrication of HST car bodies, the most prevalent structures are composed of stainless steel and aluminum alloys, which are joined by various welding methods. At present, laser welding has been found the most technologically advanced method, due to its high degree of automation and the high quality of the resulting welded joints. **Practical significance:** The recommendations stated in the paper are intended for designers and railway car body builders to create and build the first Russian high-speed train, the “White Gyrfalcon”.

Keywords: HST body manufacturing, car body material, welding technology, welding automation, use of welding robots, welded joint defect, analysis of deformation and stress in the joint.

References

1. Kiselev I. P., Blazhko L. S., Bushuev N. S., Ledyayev A. P. et al. *Vysokoskorostnoy zheleznodorozhnyy transport: obshchiy kurs: uchebnoe posobie v 2-kh tomakh* [High-speed railway transport: general course: textbook in 2 volumes]. Moscow, 2014, vol. 1. (In Russian)

2. Kondratenko V. G., Budyukin A. M., Zhukov E. R. *Sovershenstvovanie tekhnologii sborki kuzovov zheleznodorozhnykh vagonov* [Improving the technology of assembling railway car bodies].

Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Advanced technologies applied in the repair of railway rolling stock: collection of conference proceedings of students, postgraduates and young scientists]. 2017, pp. 98–101. (In Russian)

3. Zhukov E. R., Budyukin A. M., Kondratenko V. G. Sovremennye materialy i konstruktsii, primenyaemye dlya otechestvennykh zheleznodorozhnykh vagonov [Modern materials and designs used for domestic railway cars]. *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Advanced technologies applied in the repair of railway rolling stock: collection of conference proceedings of students, postgraduates and young scientists]. 2017, pp. 95–98. (In Russian)

4. Kostyukovich E. A., Budyukin A. M. Analiz trebovaniy k materialam detaley podvizhnogo sostava, ekspluatiruemykh v usloviyakh nizkikh temperatur, s tsel'yu snizheniya khрупkogo razrusheniya [Analysis of requirements for materials of rolling stock parts operated in low temperature conditions to reduce brittle fracture]. *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Advanced technologies applied in the repair of railway rolling stock: collection of conference proceedings of students, postgraduates and young scientists]. 2018, pp. 96–98. (In Russian)

5. Stefanishina A. N., Fedorchuk P. E., Budyukin A. M., Urushev S. V. Primenenie sovremennykh innovatsionnykh materialov v konstruktsii podvizhnogo sostava [Application of modern innovative materials in the design of rolling stock]. *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Advanced technologies applied in the repair of railway rolling stock: collection of conference proceedings of students, postgraduates and young scientists]. 2018, pp. 111–117. (In Russian)

6. Vasilenko P. G., Budyukin A. M. Otsenka rezul'tatov vnedreniya sovremennykh metodov svarki kuzovov lokomotivov [Evaluation of the results of implementation of modern methods of welding locomotive bodies]. *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Advanced technologies applied in the repair of railway rolling stock: collection of conference proceedings of students, postgraduates and young scientists]. 2017, pp. 37–38. (In Russian)

7. *Kak predotvratit' problemy pri svarke alyuminiya?* [How to prevent problems when welding aluminum]. Available at: <https://blog.svarcom.net/news/222problemy-pri-svarke-alyuminiya.html> (accessed: August 16, 2025). (In Russian)

8. *“Ural'skie lokomotivy” nachali podgotovku k proizvodstvu vysokoskorostnykh poezdov* [Ural locomotives began preparation for the production of high-speed trains]. Available at: <https://rollingstock-world.ru/passazhirskij-ps/uralskie-lokomotivy-nachali-podgotovku-k-proizvodstvu-vysokoskorostnykh-poezdov/> (accessed: August 16, 2025). (In Russian)

9. Krivonos E. V., Chernykh I. K., Matuzko E. N., Vasil'ev E. V. Analiz defektov, voznikayushchikh pri svarke treniem s peremeshivaniem [Analysis of defects arising during friction stir welding]. *Mashinostroenie i mashinovedenie. Omskiy nauchnyy vestnik* [Mechanical Engineering and Machine Science. Omsk Scientific Herald]. 2017, Iss. 2(152), pp. 24–27. (In Russian)

10. Sibillano T., Rizzi D., Ancona A., Saludes-Rodil S. et al. Spectroscopic monitoring of penetration depth in CO₂ Nd: YAG and fiber laser welding processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, pp. 910–915.

11. *Avtomaticheskaya svarka izdeliy iz alyuminiyevykh splavov: osobennosti tekhnologii, realizatsiya v vide kompleksnoy avtomatizirovannoy sistemy i robotizirovannogo kompleksa* [Automatic welding of aluminum alloy products: technology features, implementation as a complex automated system and robotic complex]. Available at: https://www.aluminas.ru/upload/iblock/8d8/_-_-_-_-_.pdf (accessed: August 16, 2025). (In Russian)

12. *Universal'nyy svarochnyy robototekhnicheskii kompleks KUKA* [Universal welding robotic complex KUKA]. Available at: <https://auto-machin.com/projects/svarka/universalnyy-svarochnyy-robototekhnicheskii-kompleks-avv/> (accessed: August 16, 2025). (In Russian)

13. Khaskin V. Yu., Korzhik V. N., Klochkov I. N., Tsay D. et al. *Vozniknovenie khamping-efekta pri lazer-MIG svarke vysokoprochnoy stali AN-32* [Occurrence of humping effect during laser-MIG welding of high-strength steel AN-32]. *TECHNICAL SCIENCE. Colloquium-journal*, 2019, Iss. 13(37), pp. 19–24. (In Russian)

14. Yukhin N. A. *Defekty svarnykh shvov i soedineniy* [Defects of welded seams and joints]. Moscow: SOUELO Publ., 2007, 56 p. (In Russian)

Received: June 05, 2025

Accepted: August 31, 2025

Author's information:

Dmitriy P. KONONOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; d_kononov@mail.ru

Aleksey M. BUDYUKIN — PhD in Engineering, Associate Professor; remont_ps21@mail.ru

Vladimir G. KONDRATENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; tehmet_pgups@mail.ru