УДК 629.3.083.8 DOI: 10.18324/2077-5415-2026-3-25-32

Совершенствование технологии кузовного ремонта автомобилей на основе клее-заклёпочного метода соединения высокопрочных сталей

Д.С. Тосенко[a], П.В. Архипов[b], В.Ю. Попов[c]

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия
[a] darja.tosenko@rambler.ru, [b] pavded@yandex.ru, [c] academic146@yandex.ru.
[a] https://orcid.org/0009-0001-1891-5378, [b] https://orcid.org/0000-0003-0390-8367,
[c] https://orcid.org/0000-0001-6299-9161.
Статья поступила 28.08.2026, принята 21.09.2026.

Представлены результаты экспериментальных исследований прочности клее-заклёпочных соединений, применяемых при ремонте силовых элементов кузовов автомобилей из высокопрочных сталей. Показана актуальность проблемы, связанная с массовым переходом автопроизводителей на использование сталей HSS, UHSS и борсодержащих сталей, которые теряют свои прочностные свойства при традиционной сварке, что приводит к снижению надёжности и долговечности отремонтированных конструкций. В связи с этим возникает необходимость обоснованной замены сварных соединений на альтернативные способы соединения при ремонте. В работе выполнено экспериментальное обоснование замены сварных соединений на клее-заклёпочные. Проведены испытания на срез и отрыв образцов, соединённых методами MIG/MAG сварки, клеевого и клее-заклёпочного соединения. Установлено, что клее-заклёпочное соединение на структурном двухкомпонентном эпоксидном клее с использованием вытяжных стальных заклёпок обеспечивает прочность на срез, превышающую прочность сварного соединения на 12…15 %, при полном сохранении микроструктуры и защитных покрытий основного металла. Предложено использовать полученные результаты при разработке технологических процессов кузовного ремонта автомобилей нового поколения. Полученные данные свидетельствуют о том, что применение клее-заклёпочных соединений позволяет не только компенсировать снижение несущей способности, характерное для сварных соединений высокопрочных сталей, но и обеспечить дополнительный запас прочности за счёт рационального распределения нагрузок между клеевым слоем и механическим крепежом. Особое внимание уделено анализу характера разрушения образцов, который подтверждает синергетический эффект совместной работы клеевого шва и заклёпок, выражающийся в торможении развития трещин и перераспределении напряжений в зоне соединения. Отмечено, что отсутствие термического воздействия при клее-заклёпочном методе исключает образование зон термического влияния, характерных для MIG/MAG сварки, и предотвращает деградацию механических свойств основного металла. Экспериментально подтверждена стабильность прочностных характеристик соединений при варьировании толщины соединяемых элементов и схемы расположения заклёпок. Результаты работы создают научно обоснованную базу для совершенствования нормативной документации и разработки практических рекомендаций по ремонту силовых элементов кузовов автомобилей из высокопрочных и борсодержащих сталей, обеспечивая тем самым повышение надёжности, долговечности и безопасности отремонтированных конструкций в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: кузовной ремонт; высокопрочные стали; клее-заклёпочное соединение; структурный клей; усталостная прочность; безопасность автомобиля.

Improving the technology of car body repair based on the adhesive-riveting method of joining high-strength steels

D.S. Tosenko[a], P.V. Arkhipov[b], V.Yu. Popov[c]

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia
[a] darja.tosenko@rambler.ru, [b] pavded@yandex.ru, [c] academic146@yandex.ru.
[a] https://orcid.org/0009-0001-1891-5378, [b] https://orcid.org/0000-0003-0390-8367,
[c] https://orcid.org/0000-0001-6299-9161.
Received 28.08.2026, accepted 21.09.2026.

The article presents the results of experimental studies of the strength of adhesive-riveted joints used in the repair of load-bearing elements of car bodies made of high-strength steels. The relevance of the problem associated with the mass transition of automakers to the use of HSS, UHSS and boron-containing steels, which lose their strength properties during traditional welding, leading to a decrease in the reliability and durability of repaired structures, is demonstrated. In this regard, there is a need for a justified replacement of welded joints with alternative connection methods during repairs. The work presents an experimental justification for replacing welded joints with glue and riveted ones. Shear and tear tests are carried out on samples joined using MIG/MAG welding, adhesive and adhesive-riveted joints. It has been established that an adhesive-riveted joint based on a structural two-component epoxy adhesive using pull-out steel rivets provides a shear strength that exceeds the strength of a welded joint by 12...15 %, while fully preserving the microstructure and protective coatings of the base metal. It is proposed to use the obtained results in the development of technological processes for body repair of new generation vehicles. The obtained data indicate that the use of adhesive-riveted joints makes it possible not only to compensate for the reduction in load-bearing capacity characteristic of welded joints of high-strength steels, but also to provide an additional

margin of strength through the rational distribution of loads between the adhesive layer and the mechanical fasteners. Particular attention is paid to the analysis of the nature of fracture of the samples, which confirms the synergistic effect of the joint operation of the adhesive seam and rivets, manifested in the inhibition of crack propagation and redistribution of stresses in the joint zone. It is noted that the absence of thermal influence in the adhesive-riveted method eliminates the formation of heat-affected zones characteristic of MIG/MAG welding and prevents the degradation of the mechanical properties of the base metal. The stability of the strength characteristics of the joints under variation of the thickness of the joined elements and the arrangement pattern of the rivets has been experimentally confirmed. The results of the work create a scientifically substantiated basis for improving regulatory documentation and developing practical recommendations for the repair of load-bearing elements of car bodies made of high-strength and boron-containing steels, thereby ensuring an increase in the reliability, durability and safety of repaired structures under operating conditions.

Keywords: body repair; high-strength steels; adhesive-riveted joints; structural adhesives; fatigue strength; vehicle safety.

Ведение. Современные требования к пассивной безопасности и снижению массы автомобиля привели к кардинальному изменению материалов, применяемых в кузовостроении [1–4]. В условиях ужесточения норм безопасности и экологических ограничений автопроизводители вынуждены одновременно повышать прочность силовых элементов и уменьшать общую массу конструкции. Доля высокопрочных сталей в кузовах ведущих автопроизводителей достигает 60…80 %. Особую группу составляют термоформованные борсодержащие стали, применяемые для стоек, порогов и лонжеронов. Эти материалы получают свои уникальные свойства в процессе сложной термической обработки на заводе-изготовителе [5, 6, 7]. Такая обработка обеспечивает сочетание высокой статической прочности, ударной вязкости и способности поглощать энергию при столкновении, что является определяющим для обеспечения пассивной безопасности кузова.

Критической проблемой является то, что традиционные методы кузовного ремонта, основанные на MIG/MAG сварке, неприменимы к высокопрочным сталям [8, 9]. Температура плавления внутри сварочной ванны превышает 1100…1500 °C, что приводит к выгоранию легирующих добавок (марганца, хрома, бора) и необратимому изменению кристаллической решетки металла в зоне термического влияния [10, 11, 12]. В результате в зоне сварного соединения формируются участки с изменённой микроструктурой, снижается пластичность, возрастает склонность к хрупкому разрушению и образованию трещин. Как следствие, отремонтированный силовой элемент теряет до 40…60 % своей исходной прочности и не обеспечивает заданную производителем способность поглощать энергию удара при повторном ДТП [13, 14]. Дополнительно снижаются усталостная долговечность и коррозионная стойкость отремонтированной зоны, что особенно критично для элементов, работающих в условиях переменных нагрузок и воздействия внешней среды.

Альтернативой сварке выступает клее-заклёпочный метод соединения, широко применяемый на автозаводах для сборки кузовов из разнородных материалов [15, 16, 17]. Данная технология исключает высокотемпературное воздействие и позволяет сохранить прочностные характеристики материалов [18, 19, 20]. В гибридном клее-заклёпочном соединении клеевой слой обеспечивает равномерное распределение напряжений по площади контакта, герметичность, коррозионную защиту и снижение вибраций, а заклёпки воспринимают сдвигающие и отрывные нагрузки, препятствуя преждевременному отслаиванию клеевого шва. Совместная работа клея и механического крепежа создаёт синергетический эффект, проявляющийся в повышении несущей способности и трещиностойкости соединения. Однако для внедрения этого метода в практику кузовного ремонта требуется экспериментальное обоснование прочностных характеристик клее-заклёпочных соединений применительно к типовым ремонтным ситуациям. Необходимо исследовать влияние толщины соединяемых элементов, схемы расположения заклёпок, типа клеевого состава, подготовки поверхности, температурно-временных условий отверждения и характера нагружения. Это позволит разработать научно обоснованные рекомендации и технологические процессы ремонта силовых элементов кузовов автомобилей нового поколения, обеспечивающие сохранение их прочности, надёжности и безопасности в условиях эксплуатации.

Методика проведения исследования. В качестве объектов исследования выбраны образцы из следующих материалов, наиболее распространённых в современных кузовах автомобилей. Выбор данных материалов обусловлен необходимостью оценки работоспособности ремонтных соединений в условиях, характерных для силовых элементов кузова, изготовленных из сталей различных классов прочности, а также необходимостью учёта их различной чувствительности к тепловому воздействию при ремонте.

1. Высокопрочная сталь HSS (High Strength Steel) – сталь 08Ю с пределом прочности 450…600 МПа, толщина 1,2 мм. Данный материал характеризуется повышенными прочностными свойствами по сравнению с обычными низкоуглеродистыми сталями и применяется для изготовления менее нагруженных элементов кузова. Вместе с тем при ремонте таких элементов требуется ограничение теплового воздействия, поскольку традиционная сварка может приводить к локальному изменению структуры металла и снижению его эксплуатационных характеристик.

2. Сверхвысокопрочная сталь UHSS (Ultra High Strength Steel) – сталь DP600 с пределом прочности 600…800 МПа, толщина 1,5 мм. Двухфазная структура данной стали обеспечивает сочетание достаточно высокой прочности и пластичности, что позволяет эффективно поглощать энергию при деформации. Однако такие материалы обладают повышенной чувствительностью к термическим циклам сварки, что делает актуальным поиск альтернативных методов соединения при кузовном ремонте.

3. Борсодержащая сталь – 22MnB5 с пределом прочности 1300…1500 МПа после термообработки, толщина 1,8 мм. Образцы вырезаны из стоек кузова автомобиля Volkswagen Tiguan 2020 г.в. Данный материал относится к группе термоформованных борсодержащих сталей и

обладает максимальной прочностью среди рассматриваемых материалов. Именно такие стали наиболее критичны к нагреву, поскольку при сварке в зоне термического влияния происходит необратимое изменение микроструктуры, сопровождающееся существенной потерей прочности и снижением способности поглощать энергию удара.

Исследовались три типа соединений (рис. 1):

1. Тип А: MIG/MAG сварка проволокой ER70S–6 в среде CO_2 (традиционный метод). Данный тип соединения принят в качестве базового для сравнения, поскольку он широко применяется в практике кузовного ремонта, но не учитывает особенности высокопрочных и сверхвысокопрочных сталей.

2. Тип Б: чистое клеевое соединение без механической фиксации. Такое соединение исключает термическое воздействие на основной металл, обеспечивает равномерное распределение напряжений по площади контакта, однако может быть чувствительно к отрывающим нагрузкам и преждевременному отслаиванию клеевого шва.

3. Тип В: клее-заклёпочное соединение (структурный клей + стальные заклёпки). Данный тип представляет собой гибридное соединение, в котором клеевой слой обеспечивает герметичность, коррозионную защиту и перераспределение напряжений, а механический крепёж воспринимает сдвигающие и отрывные нагрузки, препятствуя развитию отслаивания.

Выбор указанных типов соединений позволяет провести сравнительную оценку влияния теплового воздействия, роли клеевого слоя и механического крепежа на прочность, характер разрушения, сохранение микроструктуры и защитных покрытий основного металла.

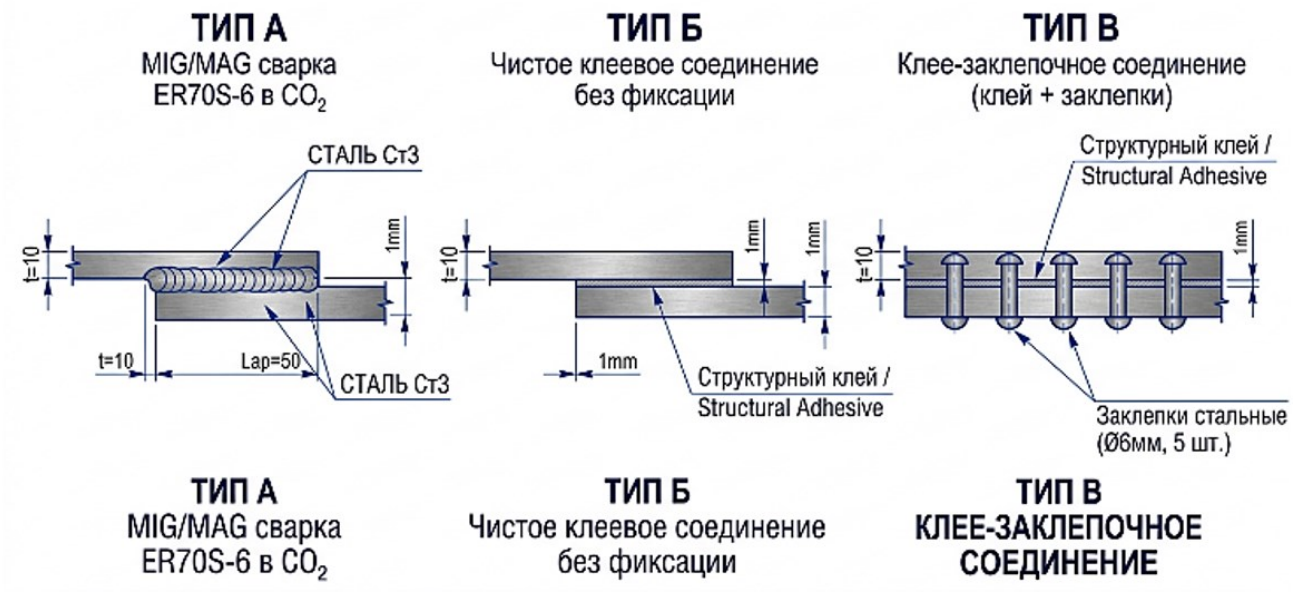

Рис. 1. Типы соединений металлоконструкций

Для создания клеевых соединений использовался двухкомпонентный эпоксидный структурный клей TEROSON EP 5055 (Henkel), рекомендованный автопроизводителями для ремонта силовых элементов. Выбор данного клеевого состава обусловлен комплексом требований, предъявляемых к ремонтным соединениям силовых элементов кузова: необходимостью обеспечения высокой прочности при сдвиге и отрыве, достаточной эластичности, теплостойкости, устойчивости к вибрационным и коррозионным воздействиям, а также способностью сохранять работоспособность в широком диапазоне эксплуатационных температур. Клей обладает следующими характеристиками:

– прочность на сдвиг: 25…30 МПа;
– модуль упругости: 1800…2200 МПа;
– время полимеризации при 20 °C – 24 часа;
– температура эксплуатации: от –40 °C до +120 °C.

Указанные параметры позволяют рассматривать данный клеевой состав в качестве перспективного для формирования гибридных соединений, работающих в условиях знакопеременных и ударных нагрузок, характерных для силовых элементов кузова автомобиля.

Для клее-заклёпочных соединений применялись вытяжные стальные заклёпки GESIPA N5 (диаметр 5 мм) из оцинкованной стали с пределом прочности на срез 8кН. Применение оцинкованного покрытия обеспечивает дополнительную коррозионную защиту зоны соединения, что особенно важно при ремонте кузовных элементов, подверженных воздействию влаги, солей и других эксплуатационных факторов. Установка заклёпок производилась пневмогидравлическим заклёпочником GESIPA PowerBird с усилием 18кН. Выбор данного оборудования обусловлен необходимостью обеспечения стабильного и контролируемого усилия расклёпывания, что позволяет получать соединения с воспроизводимыми прочностными характеристиками и минимизировать риск повреждения соединяемых листовых материалов.

Сварные образцы изготавливались с использованием сварочного полуавтомата KEMPPI MinarcMig Evo 200 в режиме MIG/MAG с проволокой ER70S–6 диаметром 0,8 мм в среде CO_2. Режимы сварки подбирались согласно технологическим картам для каждого типа стали. При этом учитывались толщина соединяемых элементов, тип материала, пространственное положение шва и

требования к формированию качественного сварного соединения. Сварка выполнялась в контролируемых условиях, обеспечивающих сопоставимость образцов по геометрии, степени проплавления и характеру термического воздействия.

Испытания проводились на универсальной испытательной машине ZwickRoell Z100 с максимальным усилием 100кН. Определялись следующие параметры:

1. Предельная нагрузка на срез (F shear, кН) – согласно стандарту DIN EN 1465;

2. Предельная нагрузка на отрыв (F_peel, кН) – согласно стандарту DIN EN 1464;

3. Характер разрушения соединения – визуальный и металлографический анализ зоны разрушения;

4. Микроструктура металла в зоне соединения – на оптическом микроскопе Olympus BX51.

Испытания проводились по 5 повторений для каждого типа соединения и материала. Такая схема эксперимента позволила обеспечить необходимую степень достоверности результатов, оценить стабильность прочностных характеристик и выявить особенности поведения клеевых, клее-заклёпочных и сварных соединений при различных видах нагружения. Совокупность выбранных методов исследования обеспечивает комплексную оценку не только предельных нагрузок, но и характера разрушения, состояния микроструктуры и сохранности защитных покрытий основного металла, что является принципиально важным при обосновании возможности замены сварных соединений на клее-заклёпочные при ремонте силовых элементов кузовов автомобилей из высокопрочных сталей.

Результаты исследования и обсуждение. Результаты проведённых экспериментальных исследований прочности соединений на срез систематизированы и представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты испытаний на срез

Материал образца	Тип соединения	Средняя нагрузка разрушения, кН	Относительная прочность, %	Характер разрушения
Сталь HSS 1,2 мм	Сварка MIG/MAG	12,4 ± 1,2	100 (база)	По зоне термического влияния
Сталь HSS 1,2 мм	Клеевое (без заклёпок)	8,7 ± 0,9	70	Когезионное разрушение клея
Сталь HSS 1,2 мм	Клее-заклёпочное	14,2 ± 1,1	115	Срез заклёпок + когезия клея
Сталь UHSS 1,5 мм	Сварка MIG/MAG	13,8 ± 1,3	100 (база)	По зоне термического влияния
Сталь UHSS 1,5 мм	Клеевое (без заклёпок	9,5 ± 0,8	69	Когезионное разрушение клея
Сталь UHSS 1,5 мм	Клее-заклёпочное	15,9 ± 1,2	115	Срез заклёпок + когезия клея
Борсодержащая сталь 1,8 мм	Сварка MIG/MAG	14,1 ± 1,8	100 (база)	Хрупкое разрушение в зоне термического влияния
Борсодержащая сталь 1,8 мм	Клеевое (без заклёпок)	10,2 ± 1,1	72	Когезионное разрушение клея
Борсодержащая сталь 1,8 мм	Клее-заклёпочное	16,5 ± 1,3	117	Срез заклёпок + когезия клея

Анализ полученных данных позволяет установить ряд закономерностей, отражающих сравнительную эффективность клее-заклёпочного, сварного и чисто клеевого методов формирования неразъёмных соединений.

1. Клее-заклёпочное соединение превосходит сварное по прочности на срез на 15…17 % для всех исследованных типов стали. Указанное превышение носит устойчивый характер и сохраняется независимо от типа стали, что свидетельствует о принципиальном преимуществе комбинированного клее-заклёпочного метода по сравнению с традиционной точечной сваркой при работе соединения на срез. Данный эффект обусловлен совместным действием клеевого шва и механических фиксаторов: клеевой слой обеспечивает равномерное распределение касательных напряжений по площади контакта, а заклёпки воспринимают часть нагрузки и препятствуют преждевременному раскрытию стыка.

2. Для борсодержащей стали разница наиболее значительна. Это объясняется тем, что при сварке происходит локальный нагрев материала до высоких температур, сопровождающийся выгоранием легирующих добавок, в том числе бора, и изменением структуры металла в зоне термического влияния. В результате прочность сварного соединения снижается, тогда как клее–заклёпочное соединение не подвергает сталь аналогичному термическому воздействию и не вызывает выгорания легирующих элементов. Именно поэтому для борсодержащей стали преимущество клее-заклёпочного метода проявляется в наибольшей степени.

3. Чисто клеевое соединение без механической фиксации уступает сварному по прочности на срез на 28…31 %. Это указывает на то, что клеевой шов сам по себе не обеспечивает в полной мере той несущей способности, которая достигается при комбинировании адгезионного соединения с заклёпками. Механическая фиксация выполняет важную функцию: она ограничивает взаимное смещение соединяемых элементов, снижает концентрацию напряжений на краях клеевого шва и повышает стабильность работы соединения под нагрузкой. Следовательно, именно сочетание клеевого шва и заклёпок обеспечивает синергетический эффект,

недостижимый при использовании только клея или только сварки.

Результаты испытаний на отрыв представлены в табл. 2.

Клее-заклёпочное соединение демонстрирует более чем двукратное преимущество по прочности на отрыв по сравнению со сварным соединением. Это объясняется различием в характере распределения напряжений при отрыве. Сварное соединение в условиях отрыва работает как концентратор напряжений: нагрузка локализуется в ограниченной зоне сварной точки, что приводит к формированию высоких локальных напряжений, раннему зарождению трещин и последующему разрушению. В отличие от этого, клеевой шов распределяет нагрузку по всей площади соединения, снижая пиковые напряжения и обеспечивая более равномерное напряжённо-деформированное состояние. Дополнительный вклад вносит механическая фиксация заклёпками, которая препятствует отрыву панелей и повышает устойчивость соединения к нормальным растягивающим усилиям.

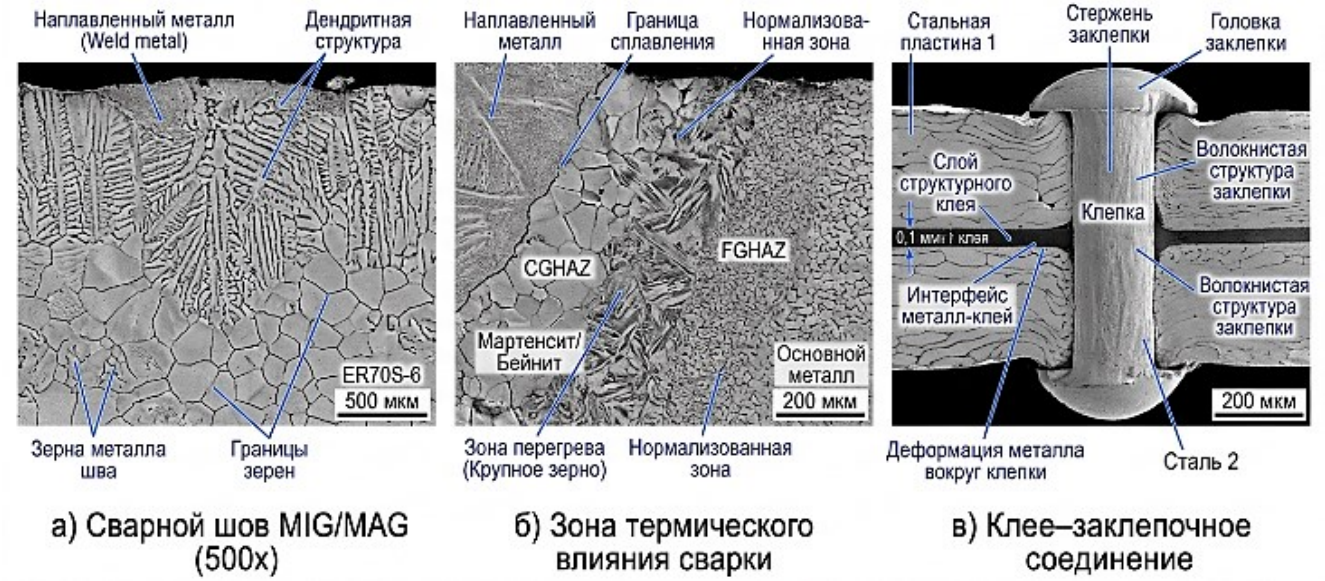

Рис. 2. Микроструктура зоны соединения: а – сварной шов MIG/MAG; б – зона термического влияния сварки; в – клее-заклёпочное соединение

Таблица 2. Результаты испытаний на отрыв

Материал образца	**Тип соединения**	**Средняя нагрузка разрушения, кН**
Сталь HSS	Сварка MIG/MAG	3,2 ± 0,4
Сталь HSS	Клее-заклёпочное	5,8 ± 0,5
Сталь UHSS	Сварка MIG/MAG	3,5 ± 0,4
Сталь UHSS	Клее-заклёпочное	6,1 ± 0,6
Борсодержащая сталь	Сварка MIG/MAG	3,0 ± 0,5
Борсодержащая сталь	Клее-заклёпочное	5,9 ± 0,5

На рис. 2 представлены микроструктуры зон соединения для борсодержащей стали, полученные методом оптической микроскопии.

Анализ микроструктуры показал:

– в сварном соединении наблюдается зона термического влияния шириной 1,5…2,5 мм с явно выраженным изменением структуры – укрупнением зерна и образованием мартенситных структур, что снижает пластичность и ударную вязкость металла;

– в клее-заклёпочном соединении микроструктура основного металла не претерпевает изменений, сохраняется исходное состояние с равномерным распределением легирующих элементов;

– на границе соединения клеевой шов равномерно заполняет микронеровности, обеспечивая 100 % контакт поверхностей.

Дополнительно проведены ускоренные коррозионные испытания в солевом тумане (ASTM B117) в течение 500 часов.

Результаты испытаний позволили установить:

– сварные соединения имеют коррозионные поражения в зоне шва и прилегающей зоне термического влияния (выгорание цинкового покрытия);

– клее-заклёпочные соединения сохранили антикоррозионные свойства, клеевой шов выполняет функцию диэлектрического барьера и исключает контактную коррозию.

Заключение. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы о преимуществах клее-заклёпочного метода:

1. Сохранение прочностных свойств материала. Отсутствие высокотемпературного воздействия гарантирует, что высокопрочная сталь сохраняет заводские характеристики. Это особенно важно для борсодержащих сталей, потеря прочности которых при сварке может достигать 50 %.

2. Повышенная коррозионная стойкость. Клеевой шов герметизирует соединение, предотвращая проникновение влаги. Кроме того, отсутствие выгорания цинкового покрытия (температура плавления цинка – 420 °С) обеспечивает сохранение антикоррозионной защиты.

3. Соединение разнородных материалов. Клее-заклёпочный метод позволяет надёжно соединять сталь с алюминием без риска гальванической коррозии, что невозможно при сварке.

4. Снижение требований к квалификации персонала. Качество клее-заклёпочного соединения менее зависит от человеческого фактора по сравнению со сваркой, что повышает стабильность результатов ремонта.

В табл. 3 приведён сравнительный анализ трудоёмкости операций.

Таблица 3. Сравнение трудоёмкости ремонта порога (замена наружной панели)

Операция	Традиционный метод (сварка)	Клее-заклёпочный метод
Демонтаж поврежденной панели	45 мин	45 мин
Подготовка поверхностей	30 мин	40 мин (включая обезжиривание и активацию)
Установка новой панели	60 мин (сварка + рихтовка)	25 мин (нанесение клея + установка заклёпок)
Антикоррозионная обработка	40 мин	10 мин
ИТОГО:	175 мин	120 мин

Сокращение времени на 31 % достигается за счёт:

– Отсутствия необходимости в последующей рихтовке после сварки (исключены сварочные деформации). Данный фактор обусловлен тем, что клее-заклёпочное соединение не сопровождается локальным термическим воздействием, характерным для сварки, вследствие чего не формируются остаточные сварочные деформации и не требуется дополнительная правка геометрии панели. Это позволяет исключить отдельную технологическую операцию, снизить трудоёмкость и сократить общий цикл сборки.

– Упрощения антикоррозионной обработки (клеевой шов уже герметичен); Клеевой шов выполняет функцию герметизирующего барьера, препятствующего проникновению влаги и агрессивных сред в зону соединения. В результате необходимость в дополнительной герметизации и сложной антикоррозионной подготовке сокращается, что уменьшает число переходов и продолжительность операций.

– Возможности одномоментной фиксации всей панели (заклёпки устанавливаются быстрее сварных точек). Применение заклёпок позволяет одновременно фиксировать панель по всей площади или контуру, тогда как точечная сварка требует последовательного выполнения множества точек. Это снижает время позиционирования, стабилизации и закрепления конструкции.

Необходимо отметить, что клее-заклёпочный метод имеет ряд ограничений:

1. Необходимость строгого соблюдения температурного режима при нанесении клея (не ниже +10 °С и не выше +35 °С). Отклонение от указанного диапазона может ухудшить адгезионные свойства, изменить вязкость клеевого состава и привести к неполной полимеризации, поэтому температурные параметры должны контролироваться с высокой точностью.

2. Обеспечение времени полимеризации перед эксплуатацией (24 часа при 20 °С). До завершения полимеризации соединение не приобретает проектной прочности, поэтому преждевременное приложение нагрузки недопустимо. Выдержка обеспечивает формирование стабильного адгезионного контакта и равномерное распределение напряжений.

3. Обязательное использование оригинальных материалов, рекомендованных производителем. Применение несертифицированных или аналоговых составов может нарушить совместимость компонентов, снизить прочность и долговечность соединения, поэтому материалы должны соответствовать регламенту изготовителя.

4. Соблюдение точных параметров сверления отверстий (диаметр, глубина). Геометрическая точность отверстий определяет качество установки заклёпок, распределение напряжений и плотность соединения; отклонения по диаметру или глубине могут вызвать ослабление пакета, перекос или повреждение элементов.

В результате проведённых экспериментальных исследований установлено:

1. Клее-заклёпочное соединение на структурном двухкомпонентном эпоксидном клее TEROSON EP 5055 с использованием стальных вытяжных заклёпок обеспечивает прочность на срез на 15…17 % выше, чем традиционное сварное соединение MIG/MAG, и более чем двукратное преимущество по прочности на отрыв. Данный эффект достигается за счёт синергетического взаимодействия клеевого слоя, равномерно распределяющего нагрузку по всей площади контакта, и механического крепежа, воспринимающего сдвигающие и отрывающие усилия. Сварное соединение, напротив, работает как концентратор напряжений, что особенно проявляется при отрыве и приводит к преждевременному разрушению.

2. Отсутствие термического воздействия при клее–заклёпочном соединении позволяет полностью сохранить микроструктуру и легирующие добавки высокопрочных сталей, что критически важно для обеспечения заданной производителем пассивной безопасности автомобиля. В отличие от MIG/MAG сварки, где температура в сварочной ванне превышает 1100…1500 °С и вызывает выгорание марганца, хрома и бора, а также необратимое изменение кристаллической решётки в зоне термического влияния, клее-заклёпочная технология исключает фазовые превращения и рост зерна. Это обеспечивает сохранение исходной ударной вязкости и способности силового элемента поглощать энергию удара при повторном дорожно-транспортном происшествии.

3. Клее-заклёпочная технология обеспечивает более высокую коррозионную стойкость соединения за счёт сохранения цинкового покрытия и герметизации стыка. Ускоренные коррозионные испытания показали, что сварные соединения имеют коррозионные поражения в зоне шва и прилегающей зоне термического влияния вследствие выгорания цинка, тогда как клее-заклёпочные соединения сохраняют антикоррозионные свойства. Клеевой шов выполняет функцию диэлектрического барьера, исключающего контактную коррозию и доступ электролита к поверхности металла.

4. Внедрение клее-заклёпочного метода в практику кузовного ремонта позволяет сократить трудоёмкость

работ на 31 % при замене наружных панелей за счёт исключения сварочных деформаций и упрощения финишных операций. Отсутствие нагрева устраняет необходимость правки металла после сварки, снижает объём шлифовальных и подготовительных работ, а также уменьшает риск повреждения защитных покрытий. Это способствует повышению производительности труда и снижению себестоимости ремонтных работ без ущерба для качества и надёжности соединения.

5. Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологических карт ремонта автомобилей с кузовами из высокопрочных сталей, а также при обучении специалистов кузовного ремонта. Полученные данные создают научно обоснованную базу для совершенствования нормативной документации, внедрения современных методов соединения и повышения безопасности отремонтированных конструкций в условиях эксплуатации. Таким образом, совокупность установленных закономерностей подтверждает целесообразность широкого применения клее-заклёпочных соединений при ремонте силовых элементов кузовов автомобилей нового поколения.

Литература

1. Филин И.А., Орлов Л.Н., Капустин А.Г. Применение композитных материалов в элементах, обеспечивающих пассивную безопасность автомобиля // Транспортные системы. 2024. № 4 (34). С. 10–16.
2. Ивлев В.Ю., Горюшинский В.С., Фурлетов И.К. Современные комплексные мероприятия по повышению пассивной и активной безопасности автомобилей // Новое слово в науке: перспективы развития. 2015. № 2 (4). С. 210–212.
3. Козлюк Н.Ю., Володькин П.П. Влияние некачественного кузовного ремонта автомобиля на пассивную безопасность // Автомобильный транспорт Дальнего Востока. 2025. № 1. С. 105–108.
4. Жуков Л.А., Кузьминов А.Л. Исследование эффективности алюминиевых элементов пассивной безопасности в автомобиле на основе компьютерного моделирования // Безопасность техногенных и природных систем. 2022. № 2. С. 49–68.
5. Коваленко И.А., Ласкин Д.В., Трифонова А.Ю. Современные стали для автомобильной индустрии// Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 9–1. С. 37–39.
6. Сидоренко Т.И., Возная В.И., Радионов А.В. Выявление причин несоответствия механических свойств в деталях из борсодержащей стали // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 78–85.
7. Новиков В.Г. Аналитическое сравнение материалов для изготовления кузовных элементов автомобиля // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 12. С. 225–227.
8. Бабич А.А., Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Чунлин Д., Детао Ц., Шангуо Х., Зии Л. Исследование напряженно-деформированного состояния симметричных стыковых сварных соединений при автоматической гибридной сварке plasma-mig // Colloquium-Journal. 2020. № 17–2 (69). С. 33–40.
9. Фалалеев А.П. Исследование влияния технологии соединения закаленных кузовных сталей на их эксплуатационные свойства // Вісник СевНТУ. 2012. № 132. С. 39–45.
10. Солодский С.А., Луговцова Н.Ю., Борисов И.С. Технология mig-mag сварки с низкочастотной модуляцией тока дуги // Технологии и материалы. 2015. № 1. С. 11–14.
11. Калинин Е.Д., Иванов Д.В., Корчажкин М.Г., Архипов А.Н. Особенности испытаний автомобильных кузовных материалов на прочность сварных соединений // Вестник Национального политехнического университета Армении. Механика, машиноведение, машиностроение. 2023. № 2. С. 108–120.
12. Коржик В.Н., Квасницкий В.В., Хаскин В.Ю., Прохоренко Д.В., Перепичай А.А., Гринюк А.А., Бабич А.А. Влияние закрепления в жесткой оснастке на формирование остаточного напряженнодеформированного состояния стыковых соединений пластин из сплава 1561 при mig, paw и гибридной paw-mig сварке // American Scientific Journal. 2017. № 17–2. С. 14–29.
13. Нургалин В.Д., Валиева Л.М., Юсупов М.И. Оптимизация процессов кузовного ремонта на автомобильном сервисе в соответствии с современными требованиями // Вестник науки. 2024. Т. 4. № 6 (75). С. 1343–1350.
14. Болукова М.А., Сущев А.К. Применение системного подхода при организации кузовного ремонта автомобилей // Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 1 (1). С. 34–40.
15. Башкирцев В.И., Никишина О.С., Юдицкий Л.А. Обоснование использования технологий ремонта автомобилей основанных на применении клеевых основ // Сервис в России и за рубежом. 2012. № 3 (30). С. 206–216.
16. Ilić A., Miletić I., Nikolić R., et al. Analysis of influence of the welding procedure on impact toughness of welded joints of the high–strength low-alloyed steels // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. No. 7. P. 2205.
17. León-Henao H., Ramirez A.J. Investigating the effects of weld–bonding in ultra–high strength steel (UHSS) performance // Proceedings of the TMS Annual Meeting & Exhibition. 2024.
18. Баурова Н.И., Аноприенко А.К. Применение клеезаклёпочных соединений при производстве и ремонте машин // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2015. № 4 (6). С. 5.
19. Коноплин А.Ю. Технологические методы создания клеесварных соединений при ремонте машин // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2017. № 26. С. 84–87.
20. Синелюбов М.А. Анализ и сравнение методов крепления металлоконструкций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 5. С. 167–169.

References

1. Filin I.A., Orlov L.N., Kapustin A.G. Application of composite materials in elements ensuring passive safety of a vehicle // Transport systems. 2024. No. 4 (34). Pp. 10–16.
2. Ivlev V.Yu., Goryushinsky V.S., Furletov I.K. Modern comprehensive measures to improve passive and active safety of vehicles // New word in science: development prospects. 2015. No. 2 (4). Pp. 210–212.
3. Kozlyuk N.Yu., Volodkin P.P. Impact of substandard vehicle body repair on passive safety // Automotive Transport of the Far East. 2025. No. 1. P. 105–108.
4. Zhukov L.A., Kuzminov A.L. Study of the effectiveness of aluminum passive safety elements in a vehicle based on computer modeling // Safety of man-made and natural systems. 2022. No. 2. Pp. 49–68.
5. Kovalenko I.A., Laskin D.V., Trifonova A.Yu. Modern steels for the automotive industry// Modern trends in the development of science and technology. 2016. No. 9–1. Pp. 37–39.
6. Sidorenko T.I., Voznaya V.I., Radionov A.V. Identification of the causes of discrepancies in mechanical properties in parts made of boron-containing steel // Casting and metallurgy. 2021. No. 1. Pp. 78–85.

7. Novikov V.G. Analytical comparison of materials for manufacturing automotive body components // Bulletin of Tula State University. Technical Sciences. 2024. No. 12. Pp. 225–227.
8. Babich A.A., Korzhik V.N., Khaskin V.Yu., Chunlin D., Detao Q., Shangguo H., Zii L. Study of the stress-strain state of symmetrical butt welded joints in automatic plasma-mig hybrid welding // Colloquium-Journal. 2020. No. 17–2 (69). Pp. 33–40.
9. Falaleev A.P. Study of the Influence of Hardened Car Body Steel Joining Technology on Their Performance Properties // SevNTU Bulletin. 2012. No. 132. pp. 39–45.
10. S.A. Solodskiy, N.Yu. Lugovtsova, I.S. Borisov. Mig-mag Welding Technology with Low-Frequency Arc Current Modulation // Technologies and Materials. 2015. No. 1. pp. 11–14.
11. E.D. Kalinin, D.V. Ivanov, M.G. Korchazhkin, A.N. Arkhipov. Features of Welded Joint Strength Testing of Automotive Body Materials // Bulletin of the National Polytechnic University of Armenia. Mechanics, Mechanical Engineering, Mechanical Engineering. 2023. No. 2. pp. 108–120.
12. Korzhik V.N., Kvasnitsky V.V., Khaskin V.Yu., Prokhorenko D.V., Perepichay A.A., Grinyuk A.A., Babich A.A. Influence of fixing in rigid equipment on the formation of residual stress-strain state of butt joints of plates made of alloy 1561 during MIG, PAW and hybrid PAW-MIG welding // American Scientific Journal. 2017. No. 17–2. pp. 14–29.
13. Nurgalin V.D., Valieva L.M., Yusupov M.I. Optimization of body repair processes at an automobile service center in accordance with modern requirements // Science Bulletin. 2024. Vol. 4. No. 6 (75). P. 1343–1350.
14. Bolukova M.A., Sushchev A.K. Application of a systems approach in organizing car body repair // Modern materials, equipment and technologies. 2015. No. 1 (1). P. 34–40.
15. Bashkirtsev V.I., Nikishina O.S., Yuditsky L.A. Justification for the use of vehicle repair technologies based on adhesive materials // Service in Russia and Abroad. 2012. No. 3 (30). Pp. 206–216.
16. Ilić A., Miletić I., Nikolić R., et al. Analysis of influence of the welding procedure on impact toughness of welded joints of the high–strength low–alloyed steels // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. No. 7. P. 2205.
17. León-Henao H., Ramirez A.J. Investigating the effects of weld-bonding in ultra-high strength steel (UHSS) performance // Proceedings of the TMS Annual Meeting & Exhibition. 2024.
18. Baurova N.I., Anoprienko A.K. Application of adhesive-riveted joints in the production and repair of machines // Automobile. Road. Infrastructure. 2015. No. 4 (6). P. 5.
19. Konoplin A.Yu. Technological methods for creating adhesive-welded joints in the repair of machines // New materials and technologies in mechanical engineering. 2017. No. 26. P. 84–87.
20. Sinelyubov M.A. Analysis and comparison of fastening methods for metal structures // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. 2023. No. 5. P. 167–169.