

УДК 621.789
DOI: 10.12737/18708

В.В. Овчинников, д.т.н.
(Московский государственный машиностроительный университет "МАМИ"
Москва, Автозаводская ул., д. 16)
E-mail: vikov1956@mail.ru

Научноёмкие технологии сварки в производстве объектов транспорта из алюминиевых сплавов

Показана эффективность использования алюминиевых сплавов для изготовления цистерн автомобилей бензовозов, цементовозов и кузовов грузовых вагонов железнодорожного транспорта. Для изготовления этих объектов эффективно использование алюминиевых сплавов 1565 и В1341, сварные соединения которых выполняются с использованием научноёмких технологий плазменной сварки и сварки трением с перемешиванием.

Ключевые слова: массовая отдача; алюминиевые сплавы; удельная прочность; цистерны; грузовые вагоны; плазменная сварка; сварка трением с перемешиванием; механические свойства.

V.V. Ovchinnikov, D.Eng.
(Moscow State University of Mechanical Engineering "MSUME"
16, Autozavodskaya Str., Moscow)

Science intensive technologies of welding in aluminum alloy vehicle manufacturing

The effectiveness of aluminum alloy use for manufacturing gears of tank trucks, cement trucks and freight car bodies of railway transport is shown. For these objects manufacturing it is efficiently to use aluminum alloys 1565 and В 1341 the welded joints of which are made with the use of science intensive techniques of plasma-arc welding and friction welding with an agitation.

Keywords: additive mass output; aluminum alloys; strength-to-weight ratio; tank trucks; freight cars; plasma-arc welding; friction welding with agitation; stress-strain properties.

Создание оптимальной конструкции является сложной многофакторной задачей. Под оптимизацией конструкции подразумевается достижение лучшего сочетания эффективности и стоимости.

К основным показателям эффективности транспортного средства можно отнести, прежде всего, массовую отдачу конструкции, которая определяется как отношение перевозимой массы к массе самого транспортного средства. Другими важными показателями являются энергозатраты и ресурс транспортного средства, оцениваемый числом пройденных километров до капитального ремонта или утилизации.

Другими показателями надежности являются эксплуатационная надежность, определяемая числом отказов на число пройденных километров, и ремонтпригодность, которые в меньшей степени поддаются численной оценке.

Как правило, выпадают из поля зрения конструктора такие показатели, как рециклизация (т.е. переработка отходов), утилизация транспортного средства и его экологичность.

Доминантной характеристикой эффективности конструкции транспортного средства является ее массовая отдача. Реализация задачи повышения массовой отдачи невозможна без прогресса в области создания и исполь-

зования новых материалов.

Снижение массы конструкции при сохранении ее работоспособности возможно за счет использования материала с большей статической прочностью, которая определяется пределом текучести σ_T и временным сопротивлением σ_B , или за счет материала с более низкой плотностью γ . Интегральной характеристикой в этом случае будет удельная прочность.

Необходимо отметить, что если повышение временного сопротивления σ_B на несколько процентов приводит к непропорционально меньшему снижению массы, то при уменьшении плотности на эту же величину снижается масса конструкции. Сравнительные свойства материалов разного класса приведены в табл. 1.

Высокий уровень удельной прочности алюминиевых сплавов объясняет тот факт, что

планер современных аэробусов состоит на 80 % из алюминиевых сплавов.

1. Сравнительные свойства материалов разного класса

Материал	Временное сопротивление σ_B , МПа	Плотность γ , г/см ³	Удельная прочность σ_B/γ , км
Сталь	1619	7,9	20,9
Титановые сплавы	932	4,5	21,1
Алюминиевые сплавы	588	2,8	21,4

Механические характеристики листовых сталей, используемых при изготовлении автомобилей, грузовых железнодорожных вагонов для холодной штамповки, и алюминиевых высокотехнологичных сплавов представлены в табл. 2.

2. Механические характеристики сталей и алюминиевых сплавов

Материал	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_{10} , %	Удельная прочность σ_B/γ , км
08Ю	Не менее 195	250...350	36	4,5
10ХНДП	–	480	–	6,12
09Г2С	–	450	–	5,77
В1341	170	310	25	12,0
1565ч	190	335	18,6	12,64

На основе анализа данных табл. 2, можно заключить, что алюминиевые сплавы превосходят стали по удельной прочности в 2–2,5 раза. Широкому применению алюминиевых сплавов в конструкциях транспортных средств до недавнего времени препятствовали два обстоятельства: более высокая стоимость алюминиевых сплавов и технологические трудности по формообразованию и сварке деталей из алюминиевых сплавов в условиях серийного производства.

В последнее время производители специальной автотехники – бензовозов и цементовозов большое внимание уделяют применению алюминиевых сплавов в сварных конструкциях указанных изделий для снижения их массы.

В России наиболее широкое применение для изготовления бензовозов и цементовозов получил свариваемый алюминиевый сплав АМг5М. Для изготовления цистерны используются листы сплава АМг5М толщиной 6...7 мм, сварка которых в конструкции осуществляется с применением плазменной сварки неплавящимся электродом и полуавтомата

тической сварки плавящимся электродом в инертном газе (аргон).

Плазменная сварка применяется для сварки продольных швов заготовок при сборке полотнощита, из которого затем осуществляется формование обечайки цистерны гибкой на трехвалковых гибочных станах (рис. 1). При сварке кольцевых швов, а также при монтаже люков и другого навесного оборудования применяется аргодуговая сварка плавящимся электродом.

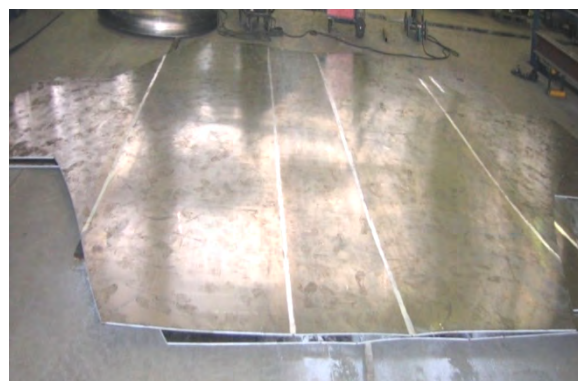


Рис. 1. Сварное полотнище цементовоза

Для решения задачи снижения массы цистерны перспективным направлением является применение для ее изготовления алюминиевого сплава, обладающего более высокой прочностью при сохранении высокого значения относительного удлинения по сравнению с применяемым сплавом АМг5М.

Перспективным материалом для изготовления автоцистерн, обладающим более высокими механическими свойствами по сравнению со сплавом АМг5М, является сплав 1565чМ, поставляемый компанией «Алькоа» Россия.

Для сварки протяженных швов листов алюминиевых сплавов толщиной более 4 мм в настоящее время применяют плазменную сварку на обратной полярности вольфрамовым электродом с подачей присадочной проволоки.

В то же время применение плазменной сварки вольфрамовым электродом на обратной полярности протяженных швов полотнищ связано с частым образованием дефектов в швах в виде включений вольфрама. Образование включений определяется потерей стойкости материала электрода из-за длительного нагрева при сварке на обратной полярности и эрозии под воздействием паров в зоне горения плазменной дуги.

Для реализации этой задачи было решено снизить тепловую нагрузку на вольфрамовый электрод путем перенесения основной сварочной дуги на плазмообразующее сопло, которое в процессе сварки охлаждается водой. Был разработан способ плазменной сварки протяженных швов алюминиевых сплавов [1], сущность которого поясняется на рис. 2.

Установив необходимые значения параметров режима сварки, выполняют сварку деталей 1, для чего возбуждают вспомогательную дугу между катодом 3 и соплом-анодом 2 от

источника питания 5 с помощью осциллятора 6. Основная дуга при этом возникает между соплом-анодом 2 и свариваемыми деталями 1. Основная дуга возбуждается самопроизвольно при включении источника питания 7, поскольку промежуток между соплом-анодом 2 и деталями 1 ионизирован за счет столба вспомогательной дуги. В зависимости от требований конструкции сварку можно выполнять без присадочного металла и с присадочной проволокой, которую подают в переднюю часть сварочной ванны.

Результаты механических испытаний сварных соединений сплава 1565чМ, выполненных плазменной сваркой, представлены в табл. 3.

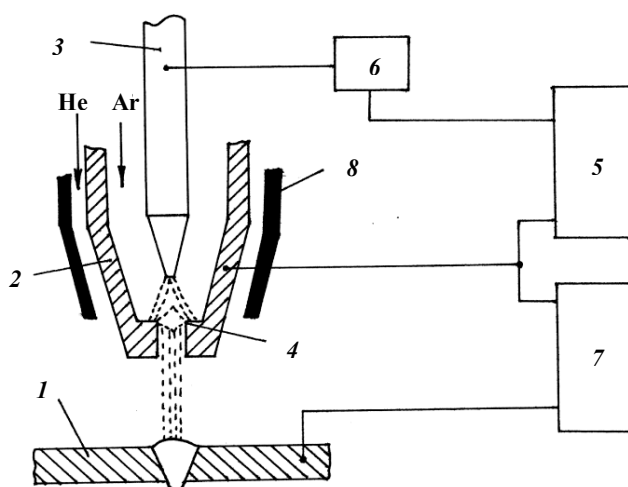


Рис. 2. Схема процесса плазменной сварки протяженных швов полотнищ из алюминиевых сплавов:

- 1 – свариваемые детали; 2 – сопло-анод;
- 3 – вольфрамовый катод; 4 – канал с острой кромкой в аноде; 5 – источник питания вспомогательной дуги;
- 6 – осциллятор; 7 – источник питания сварочной дуги;
- 8 – сопло для подачи защитного газа (аргона)

3. Механические свойства листов сплава 1565чМ и их сварных соединений, выполненных плазменной сваркой

Состояние образца	Прочность сварного соединения σ_B , МПа	Прочность металла шва $\sigma_{B ш}$, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Угол изгиба α , °	Ударная вязкость КСУ, кДж/м ²	
						по шву	по зоне сплавления
Сварное соединение листов толщиной 5 мм	355	325	164	16,2	180	206,2	208,4
Сварное соединение листов толщиной 7 мм	345	321	175	13,7	165	201,5	204,2

Примечание: Приведены средние данные по результатам испытаний 5 образцов. Угол загиба определялся по ГОСТ 6696–66 на оправке диаметром равным 3 толщины листа.

Автоматическая плазменная сварка проникающей дугой с одновременной подачей присадочной проволоки листов сплава 1565чМ обеспечивает высокое качество сварных швов. Сварные швы имеют хороший товарный внешний вид лицевой стороны и корня с плавным переходом к основному металлу. Внутренние дефекты отсутствуют.

Полученные результаты свидетельствуют, что при сварке листов сплава 1565чМ плазменной струей обеспечивается коэффициент прочности сварных соединений на уровне 0,96...0,98. Разрушение всех образцов (с усилением и проплавом) при испытаниях на прочность произошло по зоне сплавления.

С применением листов сплава 1565чМ были изготовлены сварные цистерны цементовоза и бензовоза (рис. 3). За счет применения более прочного сплава 1565чМ вместо листов сплава АМг5М была уменьшена толщина листов с 6 до 5 мм, что позволило снизить массу цистерн на 350...520 кг.



а)



б)

Рис. 3. Сварные цистерны бензовоза (а) и цементовоза (б) из листов сплава 1565чМ

Большие перспективы для применения алюминиевых сплавов имеются в области изготовления грузовых железнодорожных вагонов. Применение алюминиевого сплава взамен стали позволяет на 45...50 % (с 7,5 до 4,1 т) снизить массу кузова. При этом коррозионная стойкость алюминиевого сплава в контакте с

минеральными удобрениями и во влажной среде в 25 – 30 раз выше, чем у сталей марок 10ХНДП и 09Г2С.

В России было несколько «волн» интереса к производству грузовых вагонов с кузовами из алюминиевых сплавов.

Первая «волна» относится к 1960-м гг., когда на «Уралвагонзаводе» были изготовлены и направлены в эксплуатацию шесть опытных полувагонов с кузовами и рамами из алюминиевого сплава АМг6. Конструкция алюминиевых полувагонов повторяла конструкцию стальных полувагонов и не учитывала особенности алюминиевых сплавов. Опытные полувагоны прослужили пять лет и были отставлены от эксплуатации из-за усталостных трещин в зоне сопряжения хребтовой и шкворневых балок.

В те же годы на Заводе тяжелого машиностроения (г. Мариуполь) освоено серийное производство вагонов-цистерн для перевозки крепкой азотной кислоты с котлами из алюминия марки АД0 толщиной 25 мм (мод. 15-1596, 15-1406), а также для перевозки молока с трехсекционными котлами из алюминия марки АД0 толщиной 16 мм и типовой стальной рамой (мод. 15-886).

Следующая «волна» относится к 1990-м гг., когда ОАО «ЗМК» г. Энгельс начал (в 1996 г.) серийно выпускать цистерну мод. 15-1024 для крепкой азотной кислоты с котлом из алюминия АД0 и АД1.

В эти годы уже стало очевидно, что для основных типов грузовых вагонов применение кузовов из алюминиевых сплавов позволяет уменьшить массу кузова на 40...50 % и на 10...15 % массу тары, а также повысить грузоподъемность на 3...6 т, уменьшить требуемый для перевозок парк вагонов, снизить расход энергии на транспортировку груза на 8...10 %, сократить длину пути, занимаемого поездом, увеличить срок службы вагонов, увеличить объем перевозок.

Эти преимущества грузовых вагонов с кузовами из алюминиевых сплавов широко используются на железных дорогах развитых зарубежных стран, начиная с начала 1960-х гг. Значительное увеличение количества грузовых вагонов с кузовами из алюминиевых сплавов началось в 1980-х гг. в США и Канаде. Специализированный завод компании Johnstown America (США) освоил серийное изготовление полувагонов для перевозки угля и хопперов в количестве 5000 вагонов в год.

В настоящее время в США около 70 % гру-

зоперевозок осуществляется в вагонах из алюминиевых сплавов. Только компания Freight Car ежегодно производит более 11 тыс. грузовых вагонов с кузовами из алюминиевых сплавов, в объеме производства грузовых вагонов в США вагоны с алюминиевым кузовом составляют около 30 %.

В начале 21 века Китай начал быстро наращивать производство грузовых вагонов с кузовами из алюминиевых сплавов. Сегодня в Китае парк полувагонов и вагонов-хопперов с кузовами из алюминиевых сплавов превышает 50 тыс. шт.

На фоне зарубежных достижений с начала 2000-х гг. в России наблюдается новая «волна» интереса к грузовым вагонам с кузовами из алюминиевых сплавов.

На «Уралвагонзаводе» совместно с «СУАЛ холдинг» изготовлен полувагон с кузовом из алюминиевого сплава АМгб, рис. 4, а. Однако опытный вагон не был предоставлен для сертификационных испытаний. Конструкция кузова повторяла конструкцию стального вагона и не учитывала особенности алюминиевых сплавов.



а)



б)

Рис. 4. Опытные полувагоны для перевозки угля с кузовом из алюминиевых сплавов:

а – производство УВЗ (2003 г.); б – производство ВАСО (2005 г.)

Принципиально новая конструкция кузова предложена конструкторами Воронежского самолетостроительного объединения (ВАСО) совместно с ОАО «ВНИИЖТ», рис. 4, б. Особенность конструкции кузова состоит в том, что боковые и торцевые стены изготовлены из крупногабаритных полых панелей из алюминиевого сплава 6005. Прессованные полые алюминиевые панели изготовлены на Каменск-Уральском металлургическом заводе (КУМЗ).

Полувагон, изготовленный с рамой из алюминиевого сплава 1915, показал положительные результаты практически при всех видах испытаний, в том числе на вагоноопрокидывателе, однако, полувагон не прошел сертификационные испытания из-за появления усталостных трещин в раме при ходовых испытаниях.

Исследования по оценке комплекса свойств нового свариваемого алюминиевого сплава 1565ч, а также соединений, выполненных различными способами сварки и холодной клепки с использованием штифтов с обжимной головкой, представленные в работах [2 – 4], показали высокую эффективность его использования в вагоностроении.

Из последних разработок, выполненных из алюминиевого сплава 1565ч, следует отметить хоппер-зерновоз мод. 19-9944-01 (ЗАО «Промтрактор-Вагон») (рис. 5, а), хоппер-минераловоз мод. 19-1244 (RM RAIL) (рис. 5, б), хоппер-зерновоз с крышей из алюминиевого сплава 1565ч мод. 19-9549-02 (ОВК/Тихвинский вагоностроительный завод) (рис. 5, в).

Технические характеристики грузовых вагонов с применением в конструкции кузовов алюминиевых сплавов приведены в табл. 4.

Для изготовления конструкций вагонов использовали листы, плиты, профили, прутки из сплава 1565ч, изготовленные на Самарском металлургическом заводе (ЗАО «Алкоа СМЗ»).

Использование этих вагонов для перевозки зерна и минеральных удобрений позволяет на 8 – 14 % повысить объем перевозимых грузов в одном вагоне по сравнению со стальным вагоном, а также снизить затраты на перевозку одной тонны груза примерно на 10 %.

Вагон мод. 19-9944-01 выполнен с использованием механических соединений, одним из преимуществ которых является простота установки [5].

Вагон мод. 19-1244 полностью сварной, при его изготовлении использованы разные

виды сварки, включая сварку трением с перемешиванием и дуговую сварку в среде защитных газов (MIG и TIG). Сварка обеспечивает надежную герметичность кузова вагона, а при использовании сплава 1565ч одинаковую прочность основного металла и сварного соединения.



а)



б)



в)

Рис. 5. Грузовые вагоны-хопперы с применением в конструкции кузова из алюминиевого сплава 1565ч:
а – мод. 19-9944-01; б – мод. 19-1244;
в – мод. 19-9549-02

В вагоне-хоппере ОВК/ТВЗ мод. 19-9549-02 сама крыша вагона выполнена сварной, а ее соединение со стальной частью вагона осуществлено с помощью ШтОГ соединений с использованием специального защитного покрытия между алюминием и сталью для защиты от контактной коррозии.

Использование алюминия (сплав 1565ч) приводит к увеличению цены вагона примерно на 25...30 %, дисконтированный срок окупаемости (DPP) таких вагонов примерно 5 – 6 лет.

Несмотря на одинаковое с западными странами повышение цены за счет применения алюминия, дисконтированный срок окупаемости в России выше за счет более высокой «стоимости денег», а отсутствие показателя коэффициента тары в определении инновационного вагона не дает возможность получить необходимые преференции и сделать вагон выгодным для собственника и производителя таких вагонов.

При изготовлении грузовых вагонов из алюминиевых сплавов возникает та же задача, что и при изготовлении сварных цистерн – сборка сварных полотнищ из листов стандартных размеров. Для этой цели перспективен способ сварки трением с перемешиванием, который на листах сплава 1565чМ был реализован в трех вариантах: сваркой с одной стороны, двухсторонней сваркой и сваркой по схеме БОББИН ТУЛ.

Механические испытания сварных соединений листов сплава 1565чМ толщиной 10 мм, выполненных различными вариантами сварки трением с перемешиванием, показали, что нет существенных различий в значениях механических свойств между вариантами выполнения сварки. При этом прочность соединений составила 0,98...0,99 от прочности основного металла.

Оборудование и технологии, используемые на вагоностроительных заводах для сборки стальных вагонов, не пригодны для изготов-

4. Технические характеристики грузовых вагонов

Технические характеристики	Показатели для моделей вагонов		
	19-9944-01	19-1244	19-9549-02
	Изготовитель		
	ЗАО «Промтрактор-Вагон»	RM RAIL	ОВК/ТВЗ
Грузоподъемность, т	79	79	77
Масса тары вагона, т	21	21	22,5
Осевая нагрузка, тс	25	25	25
Объем кузова, м ³	114	109	120
Коэффициент тары	0,26	0,26	0,29

ления вагонов из алюминиевых сплавов. Поэтому требуются значительные инвестиции в основное производство для организации изготовления кузовов из алюминиевых сплавов, а также в дополнительное обучение производственного персонала.

Из-за высоких рисков при реализации проекта в серийном производстве вагоностроительные заводы не вкладывают средства в разработку новых технологий сборки и приобретение соответствующего оборудования.

Опыт последних лет убедительно показывает, что с использованием алюминиевых сплавов и оптимизации конструкции вагонов можно получить массу тары 18 т для вагонов с нагрузкой на ось 25 т, что позволит получить коэффициент тары равным 0,22 и приблизиться по этому показателю к лучшим мировым достижениям.

Однако отсутствие в России тележки для полувагонов и вагонов-хопперов с низкой массой тары (порядка 18 т) и ограничение массы тары (не менее 21 т) по ГОСТ 9246-2013 делают наше вагоностроение неконкурентоспособным на мировом рынке. Таких ограничений нет в США, Европе и Китае, что позволяет им в полной мере реализовывать преимущества от применения алюминиевых сплавов, осваивать рынок грузовых вагонов.

Заключение

Сплав 1565чМ может быть рекомендован для использования в сварных конструкциях для транспортного машиностроения взамен сплава АМг5М.

При плазменной сварке листов сплава 1565чМ обеспечивается коэффициент прочности сварных соединений на уровне 0,96...0,98.

Применение листов сплава 1565чМ толщиной 5 мм взамен листов сплава АМг5М толщиной 6 мм позволяет снизить массу сварной цистерны бензовозов и цементовозов на 350...520 кг.

Опыт зарубежных стран показывает эффективность использования алюминиевых сплавов для изготовления кузовов грузовых вагонов. Парк таких вагонов в США, Китае и Европе насчитывает сотни тысяч и ежегодно увеличивается, подтверждая свою эффективность.

В России компаниями ЗАО «Промтрактор-Вагон», RM RAIL, ОБК созданы вагоны с кузовами из алюминиевых сплавов, не уступающие лучшим зарубежным образцам. Пока-

зана возможность снижения массы тары до 18 т. Для серийного производства таких вагонов необходимы стимулирующие экономические преференции.

Создание тележки для массы тары 18–20 т при осевой нагрузке 25–30 т является первоочередной задачей отечественного вагоностроения. Это позволит выйти на передовые позиции в вагоностроении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. РФ №2336981. Способ плазменной сварки алюминиевых сплавов / Овчинников В.В., Алексеев В.В. и др. Опубл. 12.05.2008, Бюл. №24.

2. Колюхов А.Д., Дриц А.М., Овчинников В.В., Нуждин В.Н. Исследование усталостной долговечности основного металла и сварных соединений листов из сплава 1565ч // Цветные металлы. 2015. № 12. С. 88–93.

3. Колюхов А.Д., Дриц А.М., Шуртаков А.К. Свойства сварных соединений листов из сплава 1565чМ применительно к кузовам грузовых вагонов // Цветные металлы. 2014. № 5. С. 75–79.

4. Колюхов А.Д., Дриц А.М., Шуртаков А.К., Воробьева Т.Н. Свойства и применение механических соединений типа штифт с обжимной головкой для грузовых вагонов из алюминиевого сплава // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 3. С. 9–16.

5. Овчинников В.В., Дриц А.М., Малов Д.В. Двухпроходная сварка трением с перемешиванием листов из сплава 1565чМ // Научные технологии в машиностроении. 2014. № 6(36). С. 36–42.

REFERENCES

1. Pat. RF №2336981. Aluminum Alloys Plasma-Arc Welding / Ovchinnikov V.V., Alexeyev V.V. et al. Published 12.05.2008, Bull. №24.

2. Konyukhov A.D., Drits A.M., Ovchinnikov V.V., Nuzhdin V.N. Investigations of fatigue life in basic metal and sheet welds of alloy 1565ch // *Non-Ferrous Metals*. 2015. № 12. pp. 88–93.

3. Konyukhov A.D., Drits A.M., Shurtakov A.K. Properties of sheet welds of alloy 1565chM as applied to freight car bodies // *Non-Ferrous Metals*. 2014. № 5. pp. 75–79.

4. Konyukhov A.D., Drits A.M., Shurtakov A.K., Vorobiyova T.N. Properties and application of mechanical joints of pin with crimp head type for aluminum alloy // *Bulletin of ARIRT*. 2014. № 3. pp. 9–16.

5. Ovchinnikov V.V., Drits A.M., Malov D.V. Two-pass friction welding with alloy 1565chM sheet agitation // *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2014. № 6(36). pp. 36–42.

Рецензент д.т.н. С.И. Феклистов