КОНСТРУКТИВНОЕ И ПРОЧНОСТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО КРЫТОГО ГРУЗОВОГО ВАГОНА С АЛЮМИНИЕВЫМ КУЗОВОМ

Зайнитдинов О.И.
доцент,
Ташкентский государственный
транспортный университет, г. Ташкент

Комилжонова З.З.
выпускник магистратуры,
Ташкентский государственный
транспортный университет, г. Ташкент
DOI:https://doi.org/10.5281/zenodo.22975703

Аннотация: В работе рассмотрены вопросы совершенствования конструкции универсального крытого грузового вагона за счёт применения алюминиевого кузова, изготовленного из прессованных панелей. Основной целью исследования является разработка и научное обоснование конструктивных решений, направленных на повышение грузоподъёмности вагона при обеспечении требуемой прочности и надёжности его несущих элементов. На основе сравнительного анализа механических свойств алюминиевых сплавов выбран сплав 01570 системы Al–Mg–Sc. Для формирования несущих стен, пола и крыши кузова разработаны четыре варианта прессованных алюминиевых панелей, отличающихся геометрией внутренних элементов. Их прочностная оценка выполнена методом конечных элементов в программном комплексе SolidWorks Simulation 2023. Проведено исследование напряжённо-деформированного состояния кузова, рамы и сборки «кузов–рама». Полученные результаты сопоставлены с параметрами существующего крытого грузового вагона модели 11-6874.

Ключевые слова: грузовой вагон, алюминиевый кузов, прессованные панели, алюминиевый сплав, прочность, метод конечных элементов, SolidWorks Simulation, кузов–рама, грузоподъёмность, масса тары.

Актуальность и постановка задачи

Одним из основных направлений совершенствования грузового вагонного парка является повышение эффективности перевозочного процесса за счёт увеличения полезной нагрузки при сохранении требуемых показателей прочности, надёжности и безопасности конструкции. Одним из технических решений данной задачи является снижение собственной массы кузова посредством применения лёгких конструкционных материалов с достаточными прочностными характеристиками. В настоящее время алюминиевые сплавы применяются в различных конструкциях грузовых вагонов, поскольку их использование позволяет уменьшить массу кузова, повысить коррозионную стойкость и создать предпосылки для увеличения объёма перевозимого груза. При этом эффективность применения алюминия непосредственно зависит не только от механических свойств выбранного сплава, но и от рациональности конструктивной схемы несущих элементов.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

В связи с этим в исследовании поставлена задача разработки универсального крытого грузового вагона с кузовом из прессованных алюминиевых панелей и проверки его несущей способности при расчётных эксплуатационных нагрузках.

Цель исследования — разработка и научное обоснование конструктивных решений универсального крытого грузового вагона с алюминиевым кузовом, обеспечивающих требуемую прочность несущих элементов при увеличении полезного объёма и грузоподъёмности.

Выбор конструкционного материала

На первом этапе проведён сравнительный анализ механических свойств алюминиевых сплавов, применяемых или рассматриваемых для изготовления конструкций грузовых вагонов. Основными критериями выбора являлись предел прочности, предел текучести и относительное удлинение. В результате анализа для дальнейшего проектирования выбран алюминиевый сплав 01570 системы Al–Mg–Sc, имеющий предел прочности 410 МПа, предел текучести 290 МПа и относительное удлинение 16 %. Сочетание прочностных и пластических характеристик данного сплава позволило использовать его в качестве основного материала прессованных элементов кузова.

Таблица 1 — Механические свойства алюминиевых сплавов

Сплав	Система	Предел прочности σ_u,	Предел текучести σ_γ,	Относительное удлинение δ, %
		МПа		
6005	Al-Mg-Si	220	180	9
6061		310	275	8
6085		330	290	7
1581		345	205	12
1915	Al-Zn-Mg	343	216	10
1980	Al-Zn-Mg-Cu	365	295	12
1941T1		460	395	10
01570	Al-Mg-Sc	410	290	16
1570C		398	280	17
1545K		382	294	15

Разработка и выбор конструкции прессованной панели

Для изготовления несущих стен, пола и крыши кузова разработаны четыре варианта прессованных алюминиевых панелей. Варианты отличаются конфигурацией внутренних отверстий и рёбер жёсткости:

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Для определения рационального варианта проведён конечно-элементный расчёт панелей

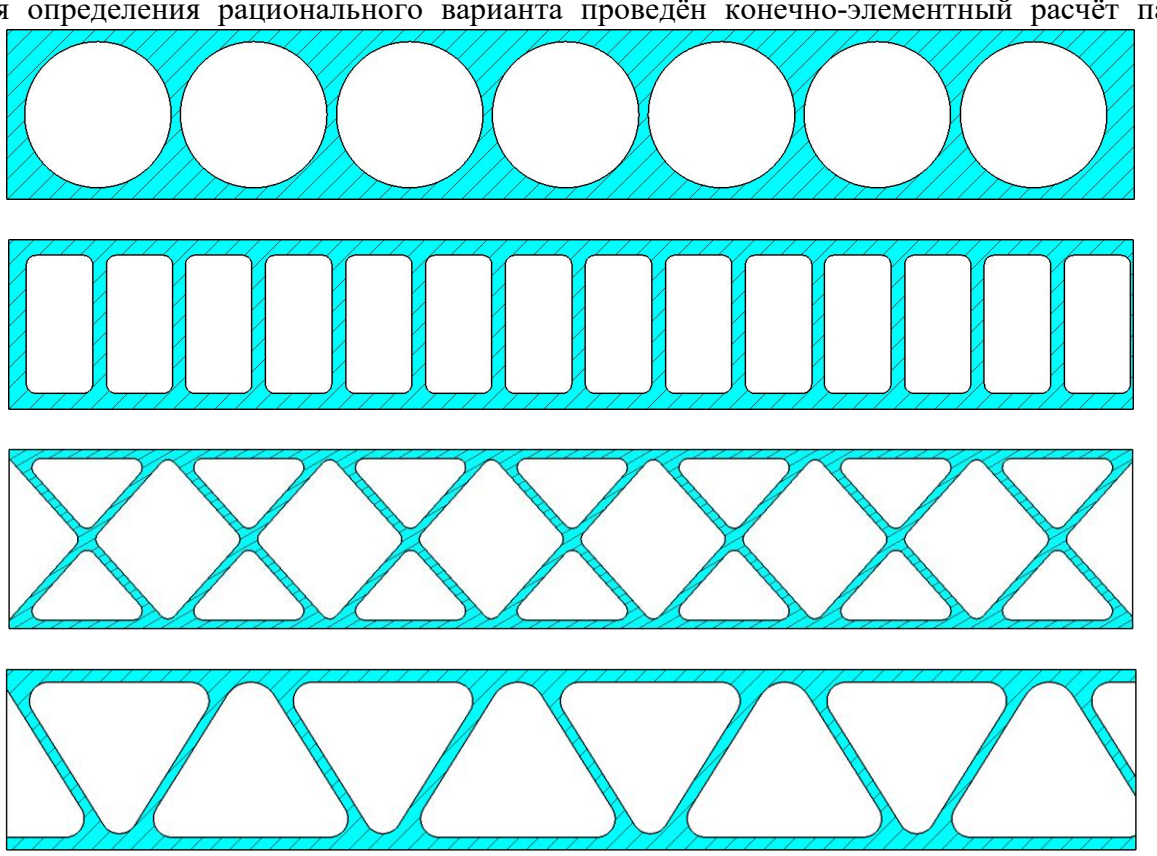


Рисунок 1 – Различные конструкции экструдированных алюминиевых панелей с конструктивными элементами для кузова крытого грузового вагона:
1 – панель с круглым отверстием; 2 – панель с прямоугольным отверстием; 3 – панель с Х-образными рёбрами; 4 – панель с треугольным отверстием со скруглёнными углами.

размером 2000×1000×30 мм. Расчёты выполнены в программном комплексе SolidWorks Simulation 2023. При моделировании учитывалась вертикальная нагрузка 100 кН и ускорение свободного падения 9,81 м/с².

Таблица 2—Результаты прочностного расчёта прессованных алюминиевых панелей

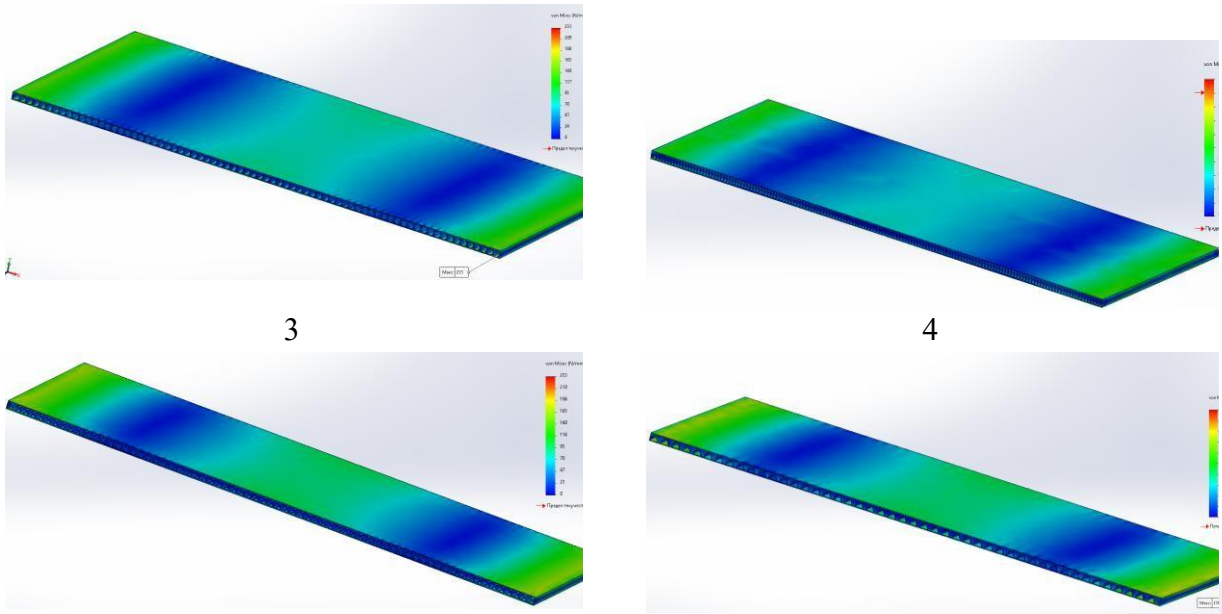
Параметры	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
Материал	Алюминий			
Масса, кг	74	65	80	57
Расчётная нагрузка, кН	100			
Ускорение свободного падения, м/с²	9,81			

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Предел текучести материала, МПа	290			
Максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу, МПа	233	320	233	239
Коэффициент запаса прочности	1,2	0,9	1,2	1,2
Конечные элементы: узлы	328269 599347	1280854 2111898	3033379 5363575	328583 610698
Габаритные размеры (габарит погрузки), ГОСТ 9238-2022	Т			

Анализ результатов показывает, что второй вариант панели при принятой нагрузке характеризуется коэффициентом запаса 0,9, что ниже единицы. Поэтому данный вариант не может рассматриваться как расчётно приемлемый при заданных условиях. Варианты 1, 3 и 4 имеют коэффициент запаса 1,2. При этом масса четвёртого варианта составляет 57 кг, что на 17 кг меньше массы первого варианта при сопоставимом уровне максимальных эквивалентных напряжений. Поэтому для дальнейшего проектирования кузова принят вариант 4 — панель с треугольным отверстием со скруглёнными углами.

1 2



3 4

Рисунок 2 – Результаты прочностного анализа экструдированных алюминиевых панелей:
1 – панель с круглым отверстием; 2 – панель с прямоугольным отверстием; 3 – панель с X-образными рёбрами; 4 – панель с треугольным отверстием со скруглёнными углами.

Конструктивная схема алюминиевого кузова

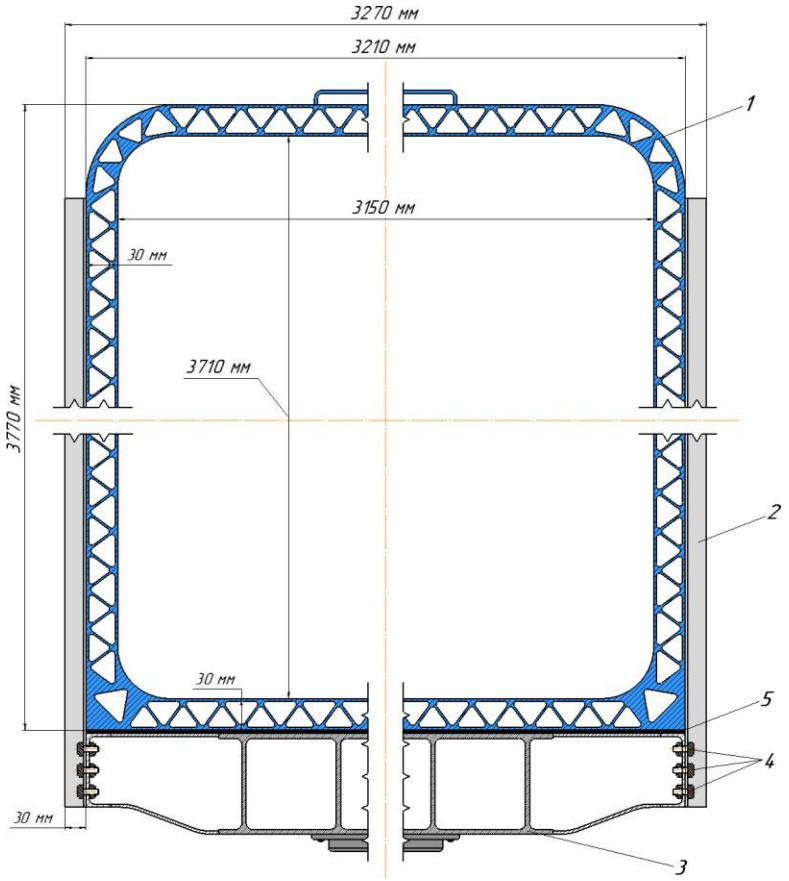
На основе выбранной панели разработана конструкция универсального крытого грузового вагона. Кузов выполнен из прессованных алюминиевых панелей и соединён со стальной рамой посредством вертикальных стоек и болтовых соединений.

Для усиления кузова по боковым и торцевым поверхностям предусмотрены вертикальные алюминиевые стойки из профиля сечением 100×35×4 мм. Соединение алюминиевого кузова со стальной рамой осуществляется болтовыми соединениями из нержавеющей стали. Между

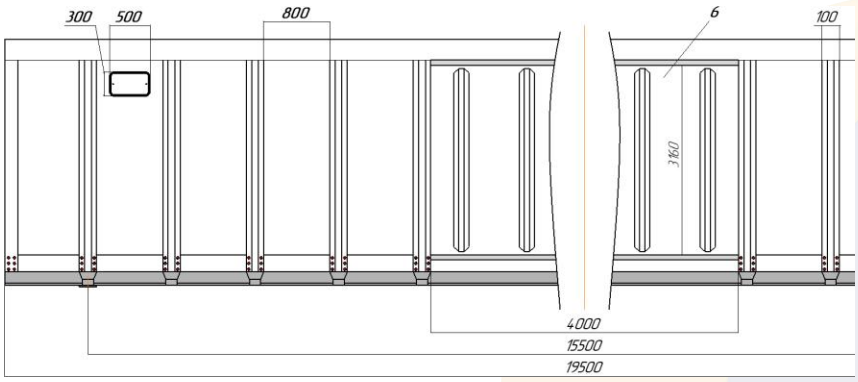
© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

алюминиевым кузовом и стальной рамой предусмотрена резиновая прокладка толщиной до 4 мм. Для обеспечения технологичности погрузочно-разгрузочных операций предусмотрены раздвижные боковые двери размером 4000×3160 мм, а также четыре боковых вентиляционных люка.

a



b



© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Рисунок 3 – Конструктивные схемы разработанного универсального крытого грузового вагона с алюминиевым кузовом, выполненным из экструдированных алюминиевых панелей:

а – поперечный вид кузова вагона; б – продольный вид кузова вагона;

1 – кузов из экструдированных алюминиевых панелей;

2 – вертикальные стойки; 3 – резиновая прокладка;

4 – болтовое соединение; 5 – рама вагона; 6 – сдвижные двери кузова;

7 – вентиляционные люки кузова.

Таким образом, предложенная конструктивная схема предусматривает разделение функций между алюминиевым кузовом и стальной рамой: алюминиевые панели формируют лёгкую несущую оболочку кузова, а стальная рама воспринимает основные продольные и вертикальные эксплуатационные воздействия.

Конечно-элементный анализ кузова

Для оценки прочности разработан конечно-элементный расчётный комплекс кузова. Моделирование выполнено в SolidWorks Simulation 2023. Масса кузова учитывалась посредством распределённого воздействия ускорения свободного падения g = 9,81 м/с².

При расчёте на внутренние поверхности боковых стен и пола прикладывались вертикальные и боковые эксплуатационные нагрузки, соответствующие принятой расчётной схеме.

Таблица 3 — Основные результаты прочностного анализа кузова

Параметр	Значение
Вертикальная нагрузка, кН	100
Боковая нагрузка, кН	40
Ускорение свободного падения, м/с²	9,8
Предел текучести материала, МПа	290
Допускаемое напряжение, МПа	110
Максимальное эквивалентное напряжение, МПа	98,7
Расчётная усталостная долговечность	1 млн циклов
Коэффициент запаса	3,0
Число узлов КЭ-модели	6 333 586
Число элементов	11 717 285

Максимальное эквивалентное напряжение в элементах кузова составило 98,7 МПа, что ниже принятого допускаемого значения 110 МПа. Коэффициент запаса по результатам расчёта составил 3,0. Полученные значения свидетельствуют о выполнении заданных расчётных условий прочности кузова.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

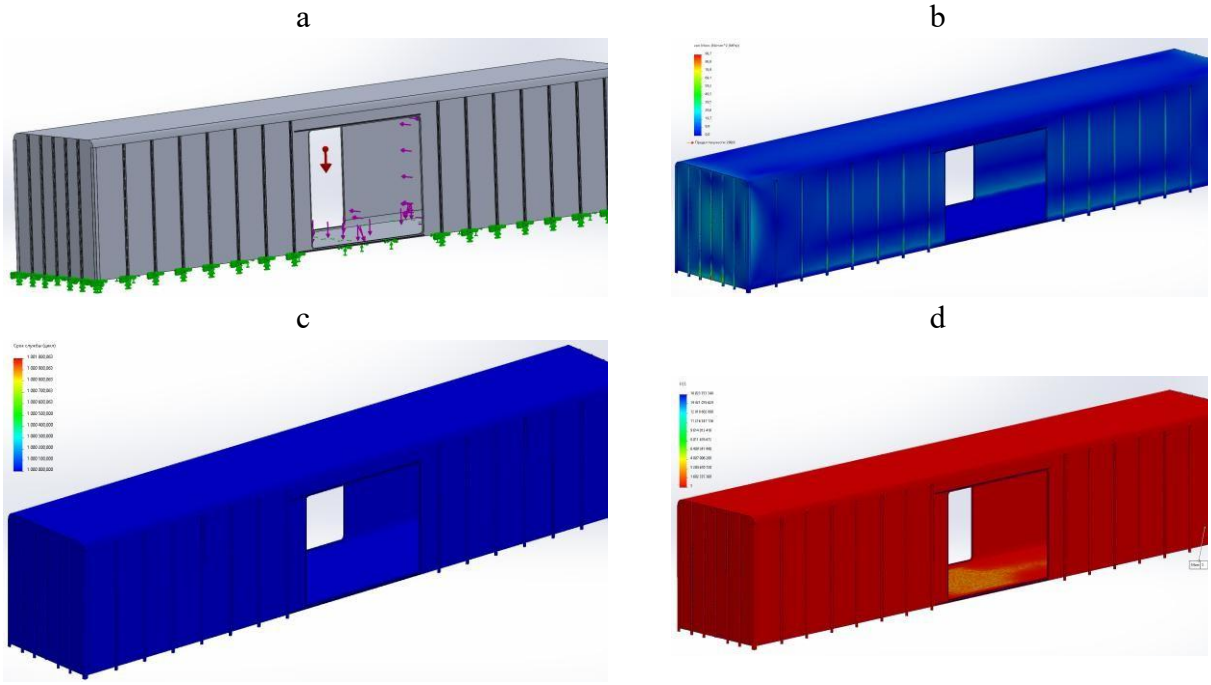


Рисунок 4 – Результаты прочностного анализа кузова универсального крытого грузового вагона, выполненного из экструдированных алюминиевых панелей:

а – схема нагружения и граничные условия кузова;

б – напряжённо-деформированное состояние кузова; в – усталостная прочность кузова; г – коэффициент запаса прочности кузова.

Расчёт прочности рамы и сборки «кузов–рама»

Следующим этапом проведена оценка несущей способности рамы вагона. Для расчёта использована конечно-элементная модель с объёмными конечными элементами. Расчёты выполнены для статического и динамического нагружения.

Таблица 4 — Результаты прочностного анализа рамы

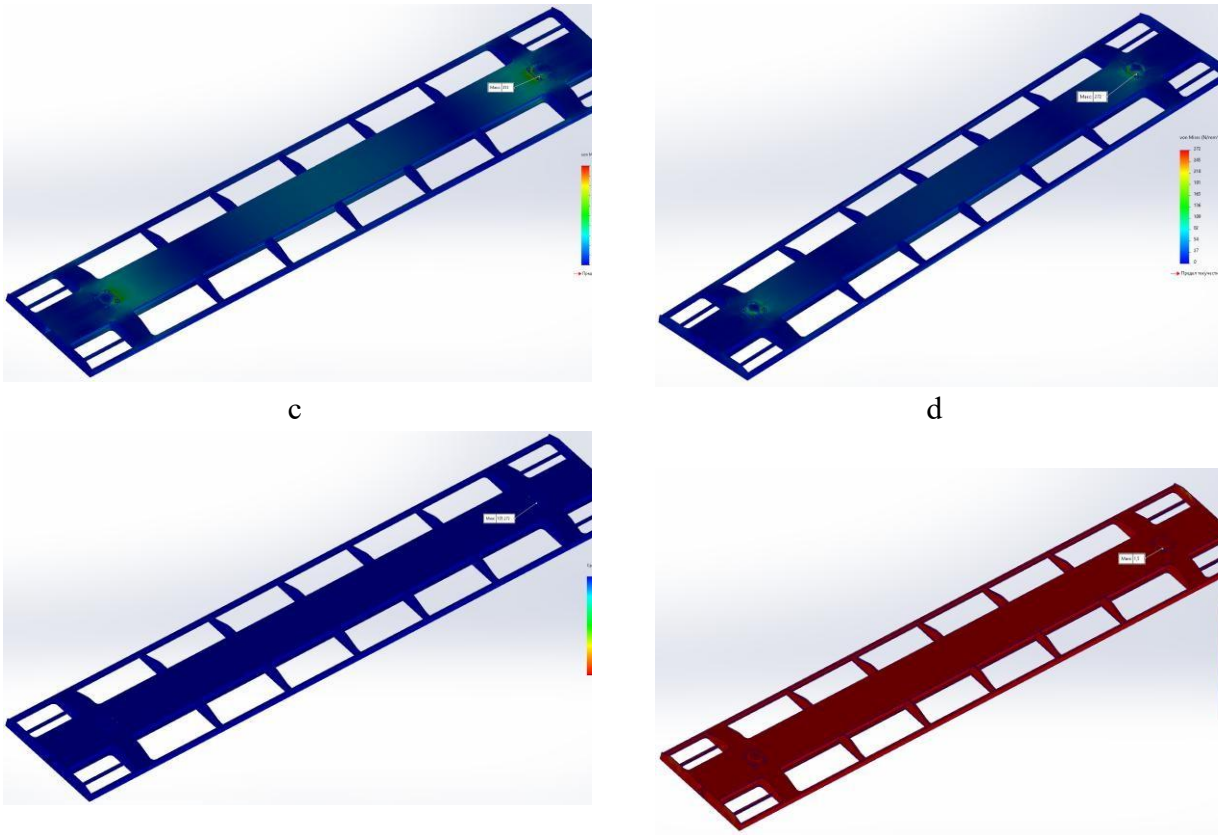
Параметр	Значение
Вертикальная нагрузка, кН	900
Предел текучести материала, МПа	390
Допускаемое напряжение, МПа	280
Максимальное эквивалентное напряжение, МПа	253
Максимальное напряжение при сжатии 100 кН и вертикальной нагрузке 50 кН, МПа	272
Расчётная усталостная долговечность, циклов	193 272
Коэффициент запаса	1,5

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Число узлов	59 986
Число элементов	111 411

При статическом расчёте максимальное эквивалентное напряжение составило 253 МПа, а при совместном действии продольной сжимающей нагрузки 100 кН и вертикальной нагрузки 50 кН — 272 МПа. Оба значения не превышают допускаемое напряжение 280 МПа.

a b



c d

Рисунок 5 – Результаты прочностного анализа рамы кузова вагона:

а – напряжённо-деформированное состояние рамы при кручении по теории Мизеса; б – напряжённо-деформированное состояние рамы при сжатии по теории Мизеса; в – усталостная прочность; г – коэффициент запаса прочности рамы вагона.

Для оценки работы всей конструкции дополнительно сформирована конечно-элементная модель сборки «кузов–рама», содержащая 2 423 450 узлов и 1 303 897 элементов. Расчёт выполнен при вертикальной нагрузке 900 кН и боковой нагрузке 40 кН.

Максимальное эквивалентное напряжение в сборке составило 86 МПа, расчётная долговечность — 445 000 циклов, а коэффициент запаса — 2,8. Расчёт устойчивости показал амплитуду первой формы потери устойчивости 0,004.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

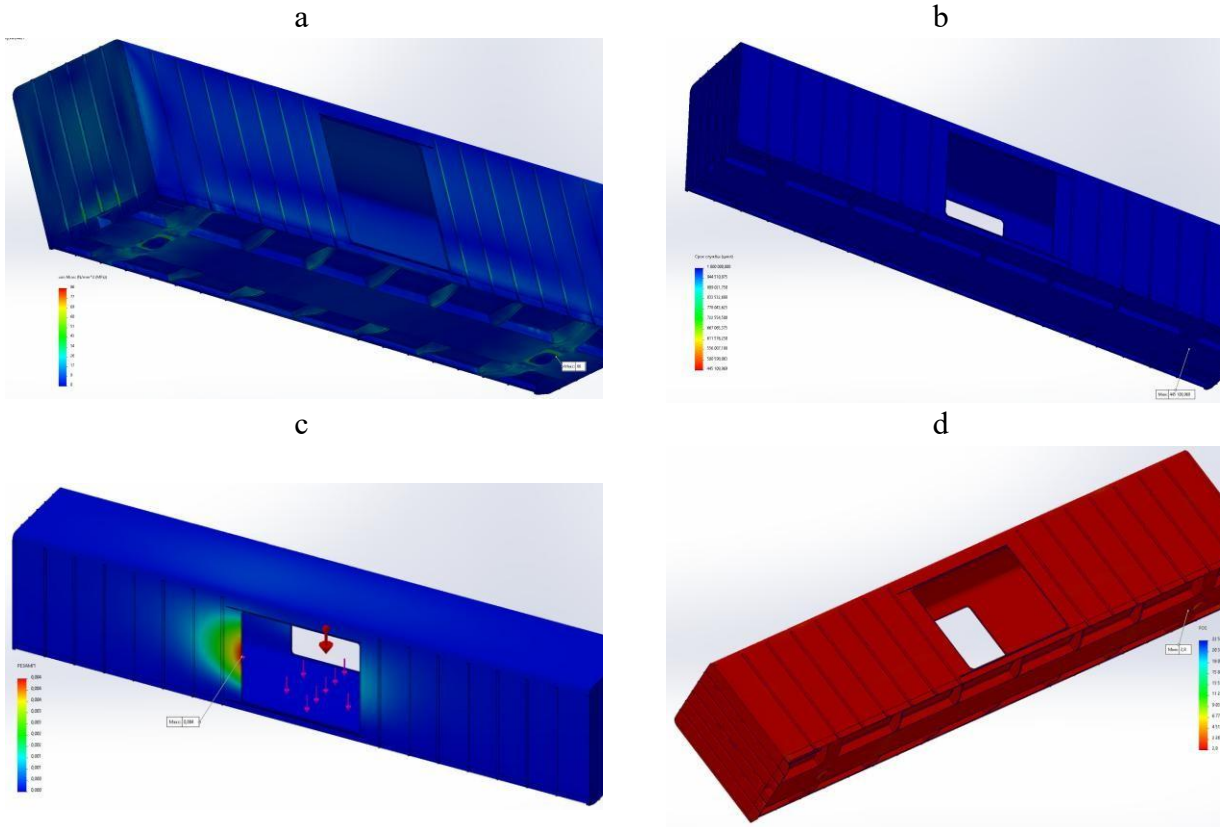


Рисунок 6 – Результаты прочностного анализа сборки «кузов–рама»:

а – напряжённо-деформированное состояние сборки «кузов–рама» по теории Мизеса; б – срок службы сборки «кузов–рама»; в – устойчивость сборки «кузов–рама» при потере устойчивости (первичная форма потери устойчивости); г – коэффициент запаса прочности сборки «кузов–рама».

Сравнительный анализ технических параметров

Для определения эксплуатационных характеристик разработанного вагона выполнено сравнение с существующим универсальным крытым грузовым вагоном модели 11-6874.

Таблица 5 — Сравнительные технические параметры вагонов

Показатель	Разработанный вагон	11-6874
Высота кузова, мм	3770	3400
Ширина кузова, мм	3270	3240
Длина кузова, мм	19500	17980
Внутренняя высота, мм	3710	2915
Внутренняя ширина, мм	3150	2865
Внутренняя длина, мм	19440	17970
Объём кузова, м³	222	175
Площадь пола, м²	60	51,5
Грузоподъёмность, т	83	73
Масса тары, т	30,7	26,5

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

База вагона, мм	15500	13930
Размер дверного проёма, мм	4000×3160	4020×2830
Конструкционная скорость, км/ч	120	120

Согласно данным исходной статьи, объём кузова разработанного вагона составляет 222 м³ против 175 м³ у вагона 11-6874, а грузоподъёмность — 83 т против 73 т. Таким образом, расчётное увеличение объёма составляет 47 м³, а грузоподъёмности — 10 т.

Заключение

В результате проведённого исследования разработана конструктивная схема универсального крытого грузового вагона с кузовом из прессованных алюминиевых панелей. На основании сравнительного анализа механических характеристик алюминиевых сплавов для дальнейшего проектирования выбран сплав 01570 системы Al–Mg–Sc с пределом текучести 290 МПа.

Проведённый конечно-элементный анализ четырёх вариантов прессованных панелей позволил определить рациональную конструкцию панели с треугольным отверстием и скруглёнными углами. При расчётной нагрузке 100 кН её масса составила 57 кг, максимальное эквивалентное напряжение — 239 МПа, а коэффициент запаса — 1,2.

Расчёт кузова показал максимальное эквивалентное напряжение 98,7 МПа при допускаемом значении 110 МПа и коэффициенте запаса 3,0. Для рамы максимальное напряжение при наиболее неблагоприятном рассмотренном сочетании нагрузок составило 272 МПа при допускаемом значении 280 МПа, коэффициент запаса — 1,5. Для сборки «кузов–рама» максимальное эквивалентное напряжение составило 86 МПа, расчётная долговечность — 445 000 циклов, коэффициент запаса — 2,8.

Сравнение технических параметров показало увеличение внутреннего объёма кузова до 222 м³ и расчётной грузоподъёмности до 83 т. Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенной конструктивной схемы в пределах рассмотренных расчётных нагрузок и создают основу для дальнейшего исследования конструкции универсального крытого грузового вагона с алюминиевым кузовом.

Литература

1. Рахимов Р.В. Выбор направлений развития вагонного парка Узбекистана // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 1 (74). С. 71–74.
2. Постановление Президента Республики Узбекистан от 10.10.2023 г. № ПП-329 «О мерах по коренному реформированию железнодорожного транспорта Республики Узбекистан».
3. Бороненко Ю.П. Вагоны с повышенными нагрузками от колеса на рельс — резерв повышения провозной и пропускной способности железных дорог // Транспорт Российской Федерации. 2008. № 5 (18). С. 52–55.
4. Pochitalov Yu.V., Kyakk K.V. Selection of parameters for an aluminum alloy gondola car // Wagons and Wagon Economy. 2010.
5. Материалы по механическим свойствам алюминиевых сплавов, приведённые в исходной статье.
6. Материалы по применению алюминиевых сплавов и прессованных профилей в конструкциях грузовых вагонов, приведённые в исходной статье.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.