Научная статья
УДК 625.76.084

Применение полимерных композиционных материалов при изготовлении рамы кабины дорожного катка массой 17 тонн

Евгений Андреевич Кудин[1], Алексей Петрович Павлов[2]

[1,2]Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

[1]kudin.ea@gmail.com
[2]89037628407@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-4557-4681

Аннотация. В представленной статье приведены результаты анализа возможности применения полимерных композиционных материалов для замены на них металлической части силовой конструкции кабины и подрамника 17-тонного дорожного катка. В настоящее время полимерные композиционные материалы нашли широкое применение как в машиностроении, так и при производстве дорожно-строительных машин, в основном эти материалы применяются для изготовления деталей оперения и облицовки кабин, как внутренней, так и внешней, в предлагаемой работе рассматривается возможность замены металлической конструкции полностью на конструкцию кабины из полимерного композиционного материала с использованием определенных наполнителей, которые обеспечивают требуемые при установленных нагрузках физико-механические свойства. При применении полимерных композиционных материалов обеспечиваются определенные преимущества как технологического характера, так и эксплуатационного. Полимерные материалы обеспечат более долгий срок службы подобных конструкций за счёт их высоких прочностных характеристик и химических свойств. Так, например, полимерные композиционные материалы значительно меньше подвержены коррозионному износу и имеют более широкий эксплуатационный температурный диапазон. Для обеспечения этих свойств был произведён подбор связующего и наполнителя, вычислены их оптимальные пропорции для получения требуемых свойств, создана 3D-модель силовой конструкции рамы кабины. На втором этапе были проведены компьютерные симуляции нагрузок на “fops” и “rops” в среде 3D-проектирования с применением значений нагрузок, представленных в техническом регламенте таможенного союза. Полученные результаты подтверждают рациональность применения полимерных композиционных материалов в подобного рода силовых конструкциях, которые надежно обеспечивают сохранение без критических повреждений зоны расположения машиниста при возникновении рассматриваемых нагрузок.

Ключевые слова: прочность, нагрузка, наполнитель, связующее, аддитивный метод, полимерные композиционные материалы, компьютерное моделирование, симуляция, деформация, надежность, эффективность.

Для цитирования: Кудин Е.А., Павлов А.П. Применение полимерных композиционных материалов при изготовлении рамы кабины дорожного катка массой 17 тонн // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 2 (44).

Original article

Application of polymer composite materials in the manufacture of the frame of the cab of a road roller weighing 17 tons

Evgeny A. Kudin[1], Alexey P. Pavlov[2]

[1,2]Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

[1]kudin.ea@gmail.com

[2]89037628407@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-4557-4681

Abstract. The presented article presents the results of the analysis of the possibility of using polymer composite materials to replace the metal part of the power structure of the cabin and subframe of a 17-ton road roller. Currently, polymer composite materials are widely used both in mechanical engineering and in the production of road construction machines, these materials are mainly used to manufacture parts of the plumage and lining of cabins, both internal and external, the proposed work considers the possibility of replacing the metal structure completely with a cabin structure made of polymer composite material using certain fillers that provide the required physical and mechanical properties under the established loads. When using polymer composite materials, certain advantages are provided, both technological and operational. Polymer materials will ensure a longer service life of such structures due to their high strength characteristics and chemical properties. For example, polymer composite materials are much less susceptible to corrosion wear and have a wider operating temperature range. To ensure these properties, a binder and filler were selected, their optimal proportions were calculated to obtain the required properties, and a 3D model of the cabin frame load structure was created. At the second stage, computer simulations of loads on “fops” and “rops” were carried out in a 3D design environment using the load values provided in the technical regulations of the customs union. The results obtained confirm the rationality of using polymer composite materials in such load structures, which reliably ensure the preservation of the driver’s area without critical damage when the loads in question occur.

Keywords: strength, load, filler, binder, additive method, polymer composite materials, computer modeling, simulation, deformation, reliability, efficiency.

For citation: Kudin E.A., Pavlov A.P. Application of polymer composite materials in the manufacture of the frame of the cab of a road roller weighing 17 tons. Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. 2025. № 2 (44).

Введение

Полимерные композитные материалы (ПКМ) – одно из величайших открытий человечества. Они представляют собой соединение из двух или более компонентов с чередующимся между ними жидким наполнителем, обозначающим чёткую границу. Благодаря ним стало возможным создавать лёгкие и в то же время высокопрочные конструкции.

В машиностроении их применяют в качестве облицовочного материала для корпусов машин и механизмов благодаря их лёгкости, а также – высоких прочности, вибрационной и коррозионной устойчивости. Благодаря своим свойствам ПКМ получили большое распространение и в авиастроении: крылья, элероны, хвостовые элементы, корпуса современных самолётов – сегодня это почти всё производится из них [15].

К тому же, данные материалы более технологичны при изготовлении и ремонте. Примеры применения ПКМ для изготовления различных типов деталей и изделий представлены на рисунках 1 и 2 [1, 2].

Рис. 1. Крыло ГАЗ-3302

Рис. 2. Композитное крыло самолёта МС-21

Поэтому возникло предложение по оценке возможности использования ПКМ в дорожном машиностроении, например, при изготовлении силовых каркасов кабин дорожных катков, к которым применяются серьезные требования по обеспечению безопасности машинистов в случае падения груза или опрокидывания.

В статье представлены результаты моделирования воздействий на кабину катка указанных выше нагрузок на примере спроектированной и испытанной в среде КОМПАС 3D v22 рамы кабины 17-тонного катка.

Основная часть

Обзор конструкции и стандартно используемого материала

Рама представляет из себя коробчатую конструкцию из прямоугольного профиля. Традиционно такую конструкцию изготавливают при помощи резки и последующей сварки профилей из металла.

Её общая высота – 1546 мм, длина – 1465 мм и ширина – 1490 мм.

Два вертикальных боковых элемента соединяются между собой при помощи горизонтальных элементов, длиной 1400 мм. Форма отличается в зависимости от месторасположения горизонтального элемента.

В создании такой конструкции применяют следующие методы: сварка, гибка, порошковая покраска. Для создания прямоугольных каркасов

применяют гибкую заготовки в виде квадратных профилей. Между собой они свариваются вставками, которые в последствии являются ребрами жесткости.

Сборка:

- элементы конструкции соединяются согласно проекту на сборочном стенде с использованием прихваток сваркой. Это позволяет проверить геометрию каркаса перед окончательной сваркой;
- сварка осуществляется методами MIG/MAG (полуавтоматическая сварка или ручной дуговой сваркой в среде защитного газа. Особое внимание уделяется швам, находящимся в местах максимальных нагрузок;
- после сварки швы зачищаются и проверяются на наличие дефектов (визуальный осмотр, ультразвуковая дефектоскопия).

Обработка и финишная отделка:

- каркас подвергается пескоструйной обработке для удаления окалины и заусенцев;
- наносится антикоррозийное покрытие: грунтовка и порошковая краска;
- основным материалом в данной конструкции служит углеродистая конструкционная сталь (например, 20 или 30). Они обладают отличной свариваемостью и прочностью, являются основным материалом для тонкостенных квадратных профилей для рамы.

Свойства [13]:

- плотность – 7,85 г/см^3
- прочность на разрыв – 410 Мпа
- модуль упругости – $2{,}3 \times 10^{-5}$ Мпа
- относительное удлинение – 25%

Определение свойств ПКМ. Выбор связующего

При создании конструктивных силовых элементов машин из полимерных композитных материалов выбор связующего является ключевым аспектом, так как оно определяет механические, термические и химические свойства конечного продукта. Кроме того, связующее позволит обеспечить монолитность материала и передачу (распределение) напряжений

Требуемые характеристики связующего после отверждения:

- высокая прочность на сжатие, растяжение и изгиб;
- устойчивость к воздействию вибрационных и динамических нагрузок;
- стабильность размеров при перепадах температуры;
- устойчивость к агрессивным химическим средам (влага, масла, щёлочи);
- долговечность и устойчивость к старению.

Выбор связующего осуществляется на основе анализа условий эксплуатации конструкции, требуемых величин числовых характеристик изделия и оценки экономической целесообразности. Для силового каркаса кабины катка наиболее важны: прочность на разрыв, вибрационная стойкость и долговечность, при таких требованиях наиболее часто целесообразно использовать эпоксидные или полиэфирные смолы. Эти материалы обеспечивают высокую надёжность и соответствуют международным стандартам экологической безопасности.

Также основным факторами при выборе наполнителя являются:

- предполагаемая технология формования;
- назначение детали и ее эксплуатационные свойства;
- геометрические особенности и масса детали;
- экономические факторы.

В таблице 1 представлены для сравнения физико-механические свойства выбранных материалов.

Таблица 1

Характеристики физико-механических свойств выбранных материалов

Параметр	Эпоксидные смолы	Ненасыщенные полиэфирные смолы
Прочность (Мпа)	70-120	90-110
Термостойкость (°С)	120-200	120-150
Химическая стойкость	Отличная	Отличная (устойчивы к химическим веществам)
Гибкость	Низкая	Высокая
Устойчивость к влаге	Умеренная	Высокая
Стоимость	Средняя	Обычно выше, чем у эпоксидных смол
Применение	Авиация, автомобилестроение, электроника	Создание туристического снаряжения и спортивных снарядов, авиастроение, судостроение, автомобилестроение.
Время отверждения	Долгое (можно ускорить) 24-48ч	Несколько часов

Рассмотрим более подробно свойства выбранных связующих.

Эпоксидные смолы:

- обладают высокой адгезией к армирующим волокнам (стеклянным, углеродным, арамидным);
- отличаются высокой прочностью и жёсткостью после отверждения;
- обеспечивают устойчивость к воздействию влаги, химических веществ и перепадов температуры;
- применимы в конструкциях, работающих при высоких механических нагрузках.

Ненасыщенные полиэфирные смолы [9, 14]:

- экономически выгодный вариант, обладающий достаточной прочностью, высокой гибкостью и химической стойкостью для многих применений;
- хорошо подходят для массового производства из-за низкой стоимости и короткого времени отверждения;
- кроме того, у них отсутствуют опасные для вдыхания испарения, и они абсолютно безвредны для окружающей среды;
- из минусов можно отметить то, что этот состав – однокомпонентный, так что после начала химической реакции он становится непригодным к продолжению манипуляций, а также – он огнеопасен.

Вывод. На основании проведенного анализа выбираем ненасыщенные полиэфирные смолы из-за их высокой прочности и гибкости. Они имеют хороший баланс между стоимостью и функциональностью, что делает их наиболее подходящими для широкой области применения, включая производство деталей машиностроительного назначения.

Конкретно для решения поставленной задачи предлагается ненасыщенная полиэфирная смола RADOPOL ПН-1, которая обладает следующими свойствами:

- благодаря высокой реакционной способности обеспечивает легкость отверждения в системах горячего формования, а низкая усадка делает смолу идеальным материалом для формования и соединения деталей;
- прочность – обеспечивает хорошую механическую прочность, что делает ее подходящей для создания прочных и долговечных изделий;
- термостойкость – способна выдерживать высокие температуры, что делает ее идеальной для применения в условиях, где требуется термостойкость;

- скорость отверждения – обладает хорошей скоростью отверждения, что позволяет ускорить производственные процессы;
- совместимость – хорошо сочетается с различными наполнителями и армирующими материалами, что позволяет создавать композиты с улучшенными свойствами;
- легкость в обработке – простой процесс формования и возможность использования в различных технологиях.

При отверждении ненасыщенной полиэфирной смолы, такой как RADOPOL ПН-1, важно использовать автоклав, который обеспечивает стабильный и равномерный нагрев.

Выбор наполнителя

Основными критериями при выборе наполнителя являются:

- механические свойства – которые должны обеспечивать прочность и жесткость композита.
- плотность – низкая плотность материала способствует снижению массы конструкции.
- теплопроводность – для конструкций с термическими нагрузками.
- устойчивость к химическим и атмосферным воздействиям – важна при длительной эксплуатации.
- экономическая доступность – стоимость материала и его обработки.

Стекловолокно – наиболее доступный по цене материал с хорошими механическими и эксплуатационными характеристиками. Подходит для массового производства конструкций, где требуется прочность и умеренная стоимость.

Углеродное волокно – материал премиум-класса с выдающимися характеристиками по прочности и жёсткости. Рекомендуется для конструкций, где критически важны низкая масса и высокая прочность, например, в аэрокосмической и автоспортивной индустрии.

В таблице 2 представлены основные технические характеристики этих материалов.

Таблица 2

Волокнистые наполнители: механические свойства

Наполнитель	Плотность (г/см³)	Предел прочности на разрыв (МПа)	Модуль Юнга (ГПа)	Удлинение при разрыве (%)
Стекловолокно	2,6	4320-4510	90-95	4,9
Углеродное волокно	1,46	1760-2280	350-420	7

1. Стекловолокно (Т-13/21)

Это уникальный материал, который не бьется и не растрескивается, но при этом может гнуться [5].

Преимущества:

- высокая прочность при растяжении и сжатии;
- малой гигроскопичность;
- стойкостью к химическому и биологическому воздействию.

Применение: гражданское строительство, коммерческие и жилые изделия, самолеты, кровля и спортивное оборудование.

2. Углеродные волокна (УКН 40)

Это легкие и прочные волокна, изготовленные из углерода, обладающие высокой жесткостью и прочностью [8, 10].

Преимущества:

- высокая прочность при низком весе, что делает их идеальными для защиты без добавления лишнего веса;
- устойчивость к химическим воздействиям и коррозии;
- хорошие характеристики при сжатии и растяжении.

Применение: авиация, автомобилестроение, а также в производство защитных панелей и конструкций.

При работе на растяжение, вертикальных и вибрационных нагрузках, композит из углеродного волокна сможет обеспечить достаточные вибрационную устойчивость и прочность на растяжение, но использовать только его будет дорого, а придавать конструкции форму прямоугольного профиля – технически трудно. Поэтому, для удешевления и упрощения процесса нужно использовать альтернативные материалы для замены или дополнения углеродного волокна.

Внешний слой углеродного волокна оставим без изменений для сохранения прочностных характеристик

Внутреннюю часть уложим формами из пенопласта АКРИМИД Т. Он предназначен для использования в качестве вспененного заполнителя при изготовлении многослойных деталей и элементов техники, в которой используются композиционные материалы [7].

Данный пенопласт обладает высокой вибрационной и термической устойчивостью.

На рисунке 3 представлен общий вид сечения детали из углепластика с наполнителем.

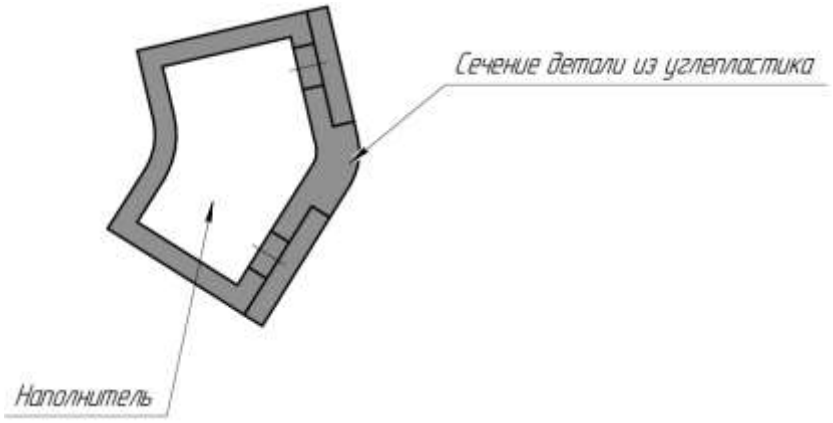

Рис. 3. Профильное сечения конструкции из углепластика с внутренним наполнителем

Определение свойств ПКМ

Необходимо определить оптимальные пропорции наполнителя и связующего, при которых характеристики изготавливаемого материла получаются наиболее подходящими [4].

Закон аддитивности (правило смесей) – наиболее простой метод определения некоторых характеристик ПКМ. Правило смесей записывается в виде формулы:

$$X_k = X_C \times V_C + X_H \times V_H$$

где

- X_C, X_H – характеристика связующего и наполнителя;
- X_k – характеристика готового ПКМ;
- V_c, V_H – объемная доля связующего и наполнителя соответственно.

Сведем исходные данные для расчета в таблицу 3.

Таблица 3

Данные для расчета пропорции наполнителя и связующего

Стекловолокно (M-S)	Относительное удлинение, %	4,9
	Прочность на разрыв, ГПа	4,51
	Модуль упругости, ГПа	95
	Плотность, г/см3	2,6
Углеволокно УКН40	Относительное удлинение, %	7
	Прочность на разрыв, ГПа	4,41
	Модуль упругости, ГПа	377
	Плотность, г/см3	1,46

По формуле (1) найдем оптимальное соотношение компонентов, обеспечивающих наилучшие качества покрытия, для нитрида бора и углеродного порошка. Рассчитанные значения занесем соответственно в таблицы 4 и 5.

Определение оптимальных пропорций наполнителя (Стекловолокна Т-13/21) и связующего (Ненасыщенная полиэфирная смола RADOPOL ПН-1)

Таблица 4

Доля стекловолокна	0,5	0,55	0,6	0,65	0,68	0,7	0,72	0,74	0,76	0,8
Доля полиэфирной смолы	0,5	0,45	0,4	0,35	0,32	0,3	0,28	0,26	0,24	0,2
Плотность, г/см3	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4
Прочность на разрыв, ГПа	2,3	2,5	2,7	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6
Относительное удлинение, %	17,5	16,2	14,9	13,7	12,9	12,4	11,9	1,4	10,9	9,9
Модуль упругости, ГПа	79,8	81,3	82,8	84,3	85,2	85,9	86,5	7,1	87,7	88,9

Определение оптимальных пропорций наполнителя (углеродных волокон УКН 40) и связующего (ненасыщенная полиэфирная смола RADOPOL ПН-1)

Таблица 5

Доля углеволокна	0,5	0,55	0,6	0,65	0,68	0,7	0,72	0,74	0,76	0,8
Доля полиэфирной смолы	0,5	0,45	0,4	0,35	0,32	0,3	0,28	0,26	0,24	0,2
Плотность, г/см3	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Прочность на разрыв, ГПа	2,3	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5
Относительное удлинение, %	18,5	17,4	16,2	15,1	14,4	13,9	13,4	13,0	12,5	11,6
Модуль упругости, ГПа	220,8	236,4	252	267,6	277,0	283,3	289,5	295,8	302,0	314,5

Анализируя полученные значения, можно сделать вывод, что при выборе пропорций, составляющих материал, для создания защитных элементов машин из полимерных композитных материалов соотношение 50% (наполнителя) на 50% (связующего) будет наиболее оптимальным при использовании углеволокна ввиду его большего относительного удлинения и модуля упругости в сочетании с ненасыщенной полиэфирной смолой.

Формирование конструкции

За основу была взята кабина дорожного катка DM-13-VD (рис. 4.)

Рис. 4. Дорожный каток DM-13-VD [11]

В результате проектирования в среде Компас-3D v22 была создана следующая модель силовой рамы кабины, представленная на рис. 5.

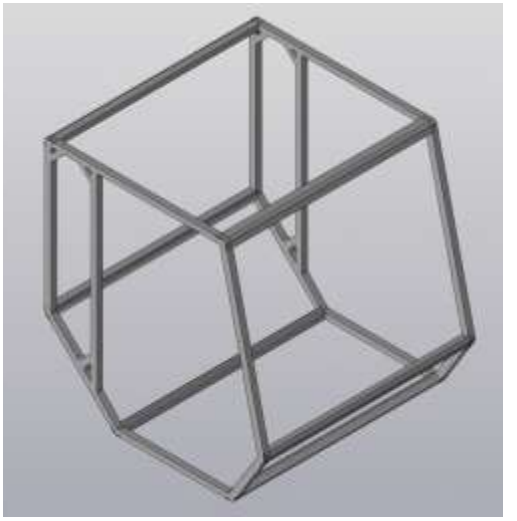

Рис. 5. Модель силовой рамы кабины

Используя данные, представленные в ГОСТ Р ИСО 3471-2009 “Машины землеройные. Устройства защиты при опрокидывании. Технические требования и лабораторные испытания” в котором указаны нагрузки, которые должна выдерживать данная рама при воздействии вертикальных и горизонтальных нагрузок, была проведена серия виртуальных симуляций воздействий данных нагрузок на раму [6].

Согласно таблице 1, указанного ГОСТа прикладываемые нагрузки должны иметь следующие значения:

Масса машины m, кг	Усилие при боковом нагружении F, Н	Энергия при боковом нагружении U, Дж	Усилие при вертикальном нагружении F, Н	Усилие при продольном нагружении F, Н
5) Катки[a)]				
$700 < m \leq 10000$ $10000 < m \leq 53780$ $m > 53780$	$5m$ $50000(m/10000)^{1,2}$ $7m$	$9500(m/10000)^{1,25}$ $9500(m/10000)^{1,25}$ $1,45m$	$19,61m$	$4m$ $40000(m/10000)^{1,2}$ $5,6m$

Учитывая, что масса катка, для которого данная рама проектируется равна 17 тоннам или 17000 килограммам, получаем следующие значения:

- горизонтальная нагрузка: $50000 \times (17000 \div 10000)^{1,2} = 94516,73$ Н ≈ 94517 Н;
- вертикальная нагрузка: $19,61 \times 17000 = 333200$ Н

Используя приложение “Прочность, гидрогазодинамика” был создан файл оптимизации IOSO-K, в свойствах которого был выбран прочностной анализ APM FEM. После задания плоскостей закрепления и приложения сил, а также – процесса создания КЭ-клетки, был произведён программный расчёт итогового результата поочерёдного воздействия нагрузок на модель, результаты которых представлены соответственно на рисунках 6 и 7 [3].

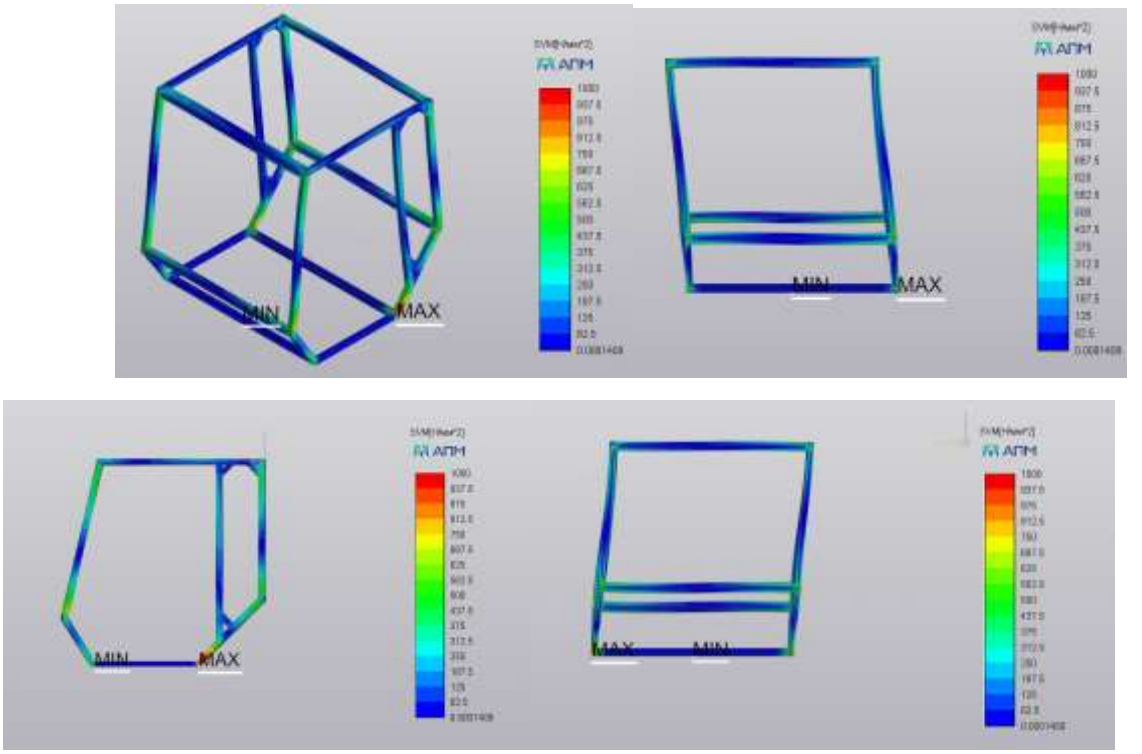

Рис. 6. Результаты моделирования горизонтальных нагрузок

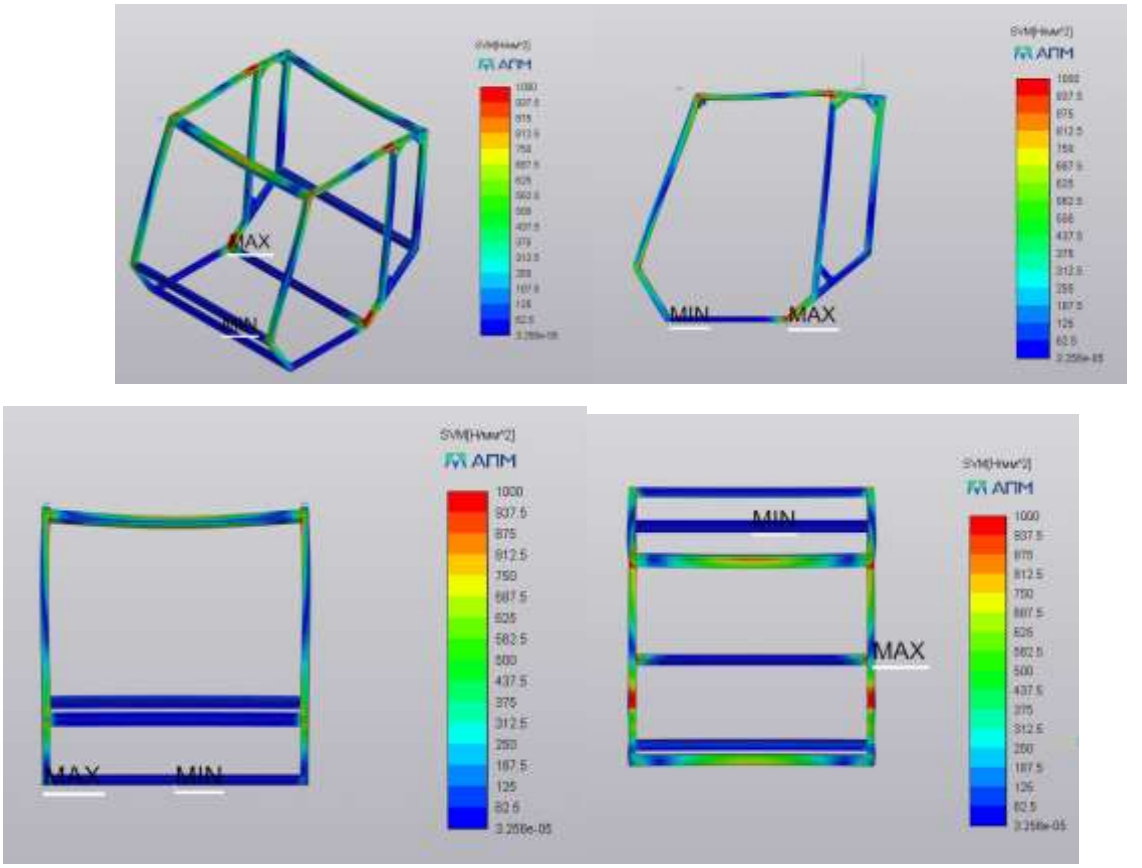

Рис. 7. Результаты моделирования вертикальных нагрузок

Для оптимального распределения нагрузок и увеличения структурной прочности рамы, в конструкцию были внесены изменения, представленные на рисунке 8 [12].

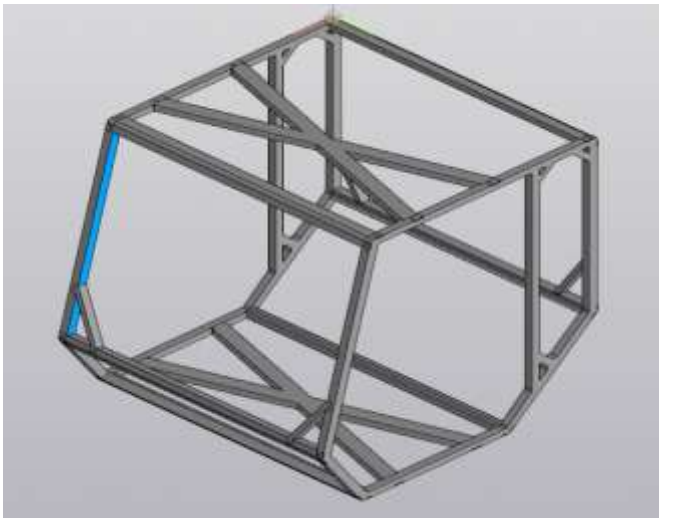

Рис. 8. Результаты модернизации силой схемы конструкции кабины

После чего были вновь смоделированы воздействия горизонтальных и вертикальных нагрузок, которые соответственно представлены на рис. 9 и 10.

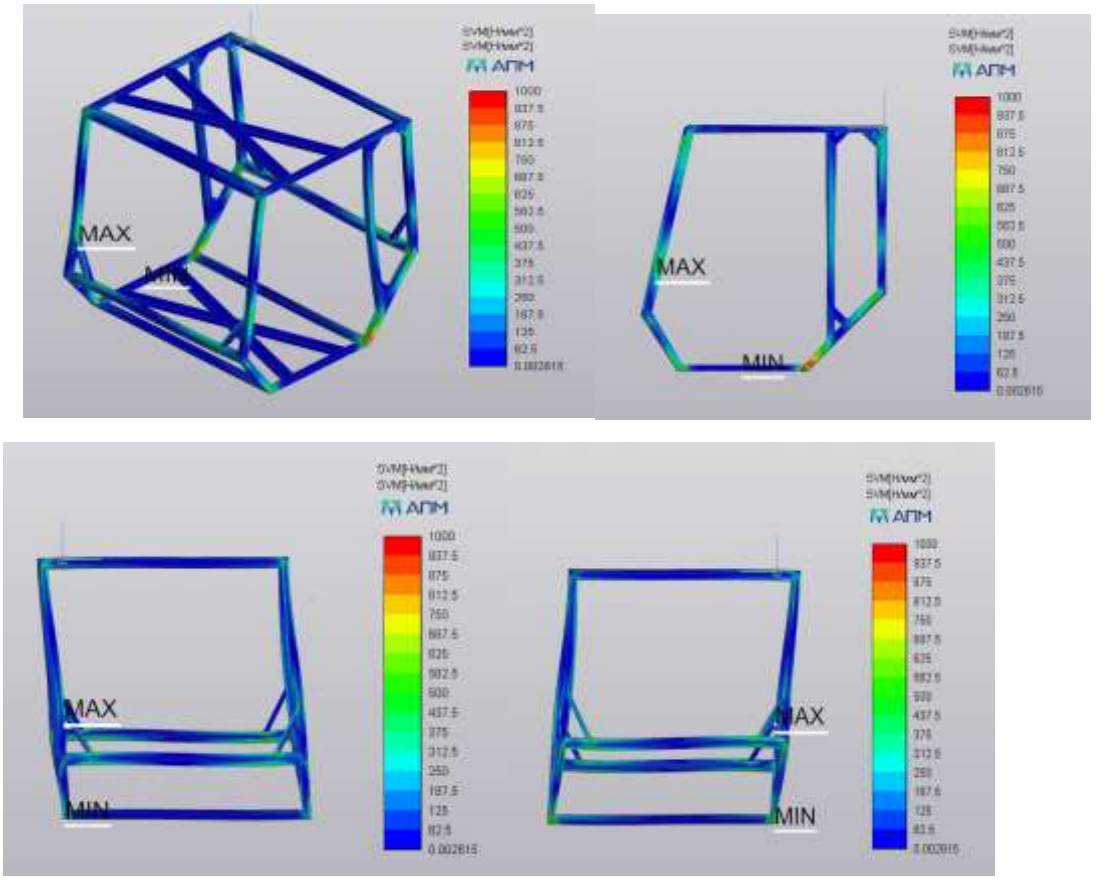

Рис. 9. Результаты моделирования горизонтальных нагрузок

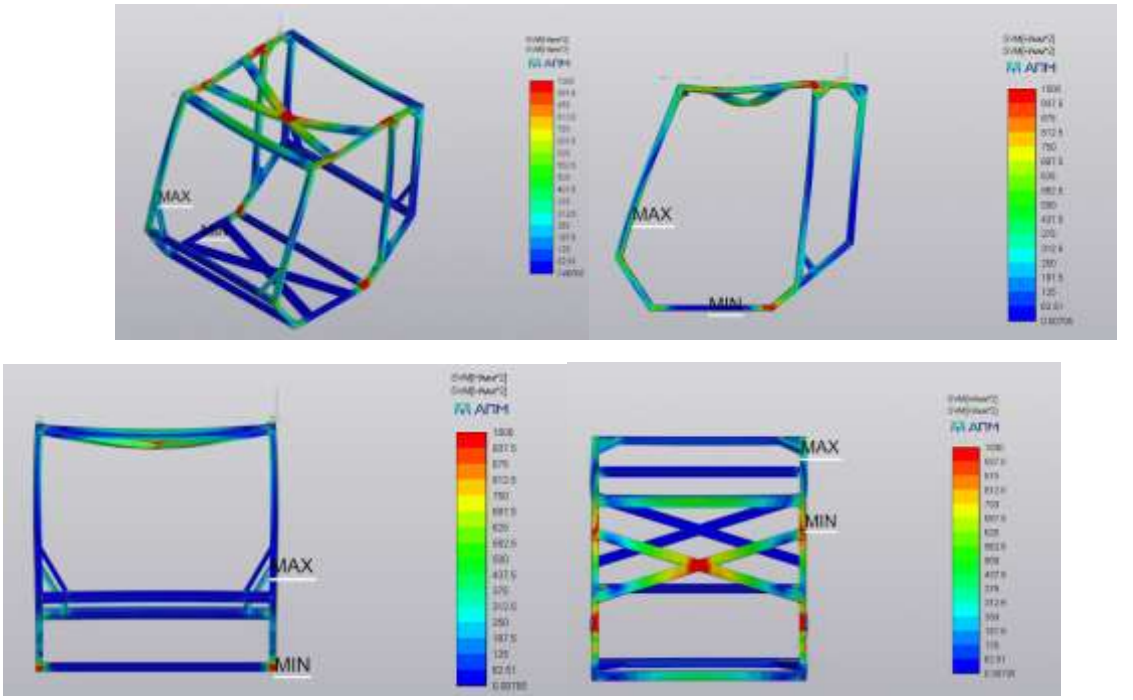

Рис. 10. Результаты моделирования вертикальных нагрузок

Внесённые конструктивные изменения позволили минимизировать вертикальное и горизонтальное отклонения конструкции, а также перераспределить нагрузки в зонах изгиба, что привело к снижению концентрации напряжений.

Вывод

Таким образом, с учетом вышесказанного можно сделать вывод, что с использованием методов графического моделирования влияния горизонтальных и вертикальных нагрузок на силовую конструкцию кабины уплотняющих катков, замена металла на полимерные композиционные материалы у силового каркаса кабин дорожных катков может быть успешно осуществлена не только с позиции технической возможности, но и с позиции экономической целесообразности предлагаемого конструкторско-технологического решения.

Список источников

1. Баурова, Н. И. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин : Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальностям "Наземные транспортно-технологические средства", "Транспортные средства специального назначения" / Н. И. Баурова, В. А. Зорин. – Москва : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2016. – 264 с. – EDN VZEGIZ.

2. Интеллектуальные и композиционные материалы в машиностроении: учебно-метод. пособие к курсовому проекту / Е.А. Косенко, В.А. Зорин, Н.И. Баурова, И.С. Нефёлов. – Москва : МАДИ, 2018. – 72 с.

3. APM FEM. Руководство пользователя, 2017. – URL: https://kompas.ru/source/info_materials/2018/APM_FEM_17.pdf.

4. Баурова, Н.И. Методы оценки эксплуатационных свойств деталей из полимерных композиционных материалов: метод. пособие / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. – Москва : МАДИ, 2017. – 84 с.

5. Касса, Ф. Стекловолокно: его свойства и применение / Ф. Касса // Молодой ученый. – 2019. – № 6(244). – С. 14-16. – EDN YWWTML.

6. ГОСТР ИСО 3471-2009 Машины землеройные УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ПРИ ОПРОКИДЫВАНИИ Технические требования и лабораторные испытания.

7. Пенопласты АКРИМИД. – URL: https://shopnewcomposite.ru/catalog/penoplasty-akrimid.

8. ГОСТ Р 57407-2017 ВОЛОКНА УГЛЕРОДНЫЕ. Общие технические требования и методы испытаний.

9. Полиэфирные смолы. – URL: https://shopnewcomposite.ru/blogs/poliefirnye-smoly.

10. Углеродные волокна. – URL: https://xumuk.ru/encyklopedia/2/4640.html.

11. Каток дорожный DM-13-VD двухвальцовый вибрационный. – URL: https://dormashina.ru/produkciya/dorozhnye-katki-dm/valcovye/dm-13-vd.html.

12. Алзайтуни, А. Б. Особенности усиления различных металлических конструкций / А. Б. Алзайтуни // Молодой ученый. – 2022. – № 15(410). – С. 61-65. – EDN KLSFEH.

13. Сталь 20 (ст20) – характеристики, применение. – URL: https://metall.life/marochnik/stal-20.

14. Оптофатлиевые смолы. – URL: https://p-kg.ru/ortoftalevye.

15. Области применения композиционных материалов. – URL: https://carbocarbo.ru/application/.

References

1. Baurova N.I., Zorin V.A. *Primeneniye polimernykh kompozitsionnykh materialov pri proizvodstve i remonte mashin* (Application of polymer composite materials in the production and repair of machines), Moscow, MADI, 2016, 264 p.

2. Kosenko Ye.A., Zorin V.A., Baurova N.I., Nefolov I.S. *Intellektual'nyye i kompozitsionnyye materialy v mashinostroyenii* (Intellectual and composite materials in mechanical engineering), Moscow, MADI, 2018, 72 p.

3. URL: https://kompas.ru/source/info_materials/2018/APM_FEM_17.pdf.

4. Baurova N.I., Zorin V.A. *Metody otsenki ekspluatatsionnykh svoystv detaley iz polimernykh kompozitsionnykh materialov* (Methods for assessing the performance properties of parts made of polymer composite materials), Moscow, MADI, 2017, 84 p.

5. Kassa F. *Molodoy uchenyy*, 2019, no. 6(244), pp. 14-16.

6. Mashiny zemleroynyye USTROYSTVA ZASHCHITY PRI OPROKIDYVANII Tekhnicheskiye trebovaniya i laboratornyye ispytaniya, GOSTR ISO 3471-2009 (Earth-moving machinery ROLL-OVER PROTECTION DEVICES Technical requirements and laboratory tests, GOSTR ISO 3471-2009).

7. URL: https://shopnewcomposite.ru/catalog/penoplasty-akrimid.

8. VOLOKNA UGLERODNYYe. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya i metody ispytaniy, GOST R 57407-2017 (CARBON FIBERS. General technical requirements and test methods, GOST R 57407-2017).

9. URL: https://shopnewcomposite.ru/blogs/poliefirnye-smoly.

10. URL: https://xumuk.ru/encyklopedia/2/4640.html.

11. URL: https://dormashina.ru/produkciya/dorozhnye-katki-dm/valcovye/dm-13-vd.html.

12. Alzaytuni A. B. *Molodoy uchenyy*, 2022, no. 15(410), pp. 61-65.

13. URL: https://metall.life/marochnik/stal-20.

14. URL: https://p-kg.ru/ortoftalevye.

15. URL: https://carbocarbo.ru/application/.

Рецензент: В.К. Федоров, д-р техн. наук, проф., генеральный директор ОАО «Ирбис»

Информация об авторах

Кудин Евгений Андреевич, студент, МАДИ.

Павлов Алексей Петрович, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Information about the authors

Kudin Evgeny A., student, MADI.

Pavlov Alexey P., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Статья поступила в редакцию 22.05.2025; одобрена после рецензирования 02.06.2025; принята к публикации 17.06.2025.
The article was submitted 22.05.2025; approved after reviewing 02.06.2025; accepted for publication 17.06.2025.