

Применение методов конечных элементов при изготовлении изделий с помощью аддитивных технологий

Д.В. Осипов✉, П.Ю. Иванов, А.С. Ковшин, В.В. Пахомов

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉osipovdnor@mail.ru

Резюме

На сегодняшний день актуальным вопросом является повышение эффективности работы пневматических тормозов грузовых поездов и снижение их истощимости при циклических торможениях. Эффективная и безотказная работа тормозной системы грузовых поездов – ключевой вопрос повышения безопасности их движения и увеличения скорости. В связи с многократным ростом скорости движения, а также увеличением массы подвижного состава не модернизированной более 40 лет тормозная система является главным ограничением для дальнейшего роста скоростей движения и масс подвижного состава из-за невозможности обеспечения требуемой безопасности движения. Также от непродуктивной работы тормозной системы зависит количество отказов колесных пар по причине возникновения ползунов на поверхности катания в связи с истощимостью пневматических тормозов, что может привести к неэффективному отпуску тормозов. Это, в свою очередь, потребует дополнительного простоя отдельных единиц подвижного состава на период обточки колесных пар. Таким образом, существующая тормозная система нуждается в глубокой модернизации. Для достижения этих целей необходимо применение современных аддитивных технологий при прототипировании новых пневматических приборов, но при этом остается открытым вопрос прочности таких изделий. Данная статья посвящена исследованию проблем прочности изделий, изготовленных при помощи аддитивных технологий. При проведении эксперимента была нарушена целостность объекта путем воздействия сжатого воздуха на рабочие поверхности. На основе физических параметров применяемых материалов было проведено имитационное компьютерное моделирование воздействия давления на корпус редуктора при его работе.

Ключевые слова

эффективность тормозов, истощимость тормозной системы, двухтрубная тормозная система, пневматический редуктор, прототипирование, аддитивные технологии, компьютерное моделирование, метод конечных элементов

Для цитирования

Применение методов конечных элементов при изготовлении изделий при помощи аддитивных технологий / Д.В. Осипов, П.Ю. Иванов, А.С. Ковшин, В.В. Пахомов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 162–172. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).162-172.

Информация о статье

поступила в редакцию: 1.11.2022 г.; поступила после рецензирования: 23.11.2022 г.; принята к публикации: 24.11.2022 г.

Application of finite element methods in the manufacture of products using additive technologies

D.V. Osipov✉, P.Yu. Ivanov, A.S. Kovshin, V.V. Pakhomov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉osipovdnor@mail.ru

Abstract

To date, an urgent issue is to increase the efficiency of the pneumatic brakes of freight trains and reduce their depletion during cyclic braking. Efficient and trouble-free operation of the braking system of freight trains is a key issue of improving safety and speed. Due to the multiple increase in the speed of movement, as well as in the mass of rolling stock, the braking system, which has not been modernized for more than forty years, is a key limitation hindering further growth of movement speeds and masses of rolling stock due to the inability to ensure the required traffic safety. Also, the low efficiency of the braking system depends on the number of wheel set failures due to the occurrence of sliders on the rolling surface resulting from exhaustion, which can lead to inefficient release of brakes, which in turn will require additional downtime of individual units of rolling stock for the period of turning wheel sets. In this regard, the existing braking system needs a deep modernization. To achieve these goals, it is necessary to use modern additive technologies in prototyping new pneumatic devices, but the question of the strength of such products remains open. This article is devoted to the study of the strength of products manufactured using additive technologies. During the experiment, the integrity of the object was violated under the influence of compressed air on the working surfaces. In this regard, based on the physical parameters of the materials used, a simulated computer modeling of the effect of pressure on the gearbox housing during its operation was carried out.

Keywords

brake efficiency, exhaustion of the braking system, two-pipe braking system, pneumatic reducer, prototyping, additive technologies, computer simulation, finite element method

For citation

Osipov D.V., Ivanov P.Yu., Kovshin A.S., Pakhomov V.V. Primenenie metodov konechnykh elementov pri izgotovlenii izdelii s pomoshch'yu additivnykh tekhnologii [Application of finite element methods in the manufacture of products using additive technologies]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 162–172. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).162-172.

Article info

Received: November 1, 2022; Revised: November 23, 2022; Accepted: November 24, 2022.

Введение

Проблема низкой эффективности современного пневматического автоматического тормоза грузового поезда кроется в сочетании функций питания и управления тормозами в одном воздуховоде тормозной магистрали. Вследствие этого при циклических торможениях система истощается, поэтому необходимо применять выдержку времени между торможениями для полной зарядки запасного резервуара и камер воздухораспределителей в режимах управления автоматическими тормозами [1]. Данная проблема решается внедрением дополнительной трубы питательной магистрали для питания запасного резервуара и разделения функций управления и питания [2–4]. Данное решение используется за рубежом и адаптировано к отечественным воздухораспределителям. Схема предлагаемой модернизации приведена на рис. 1.

Выбор способа изготовления и материала пневматического редуктора

Для работы такой системы необходимо наличие высокопроизводительного пневматического редуктора (Р), который будет обеспечивать через питательную магистраль (ПМ) дополнительное питание запасного резервуара (ЗР) сжатым воздухом. В процессе изготовления нового изделия только при использовании 3D-модели трудно обнаружить различные недостатки и ошибки, следовательно, необходимо обеспечить внедрение и применение инновационных технологий в процесс проектной деятельности, дающих возможность быстро изготовить изделия для оценки их эстетических и функциональных качеств [5]. С целью сокращения не только временных затрат, но и финансовых вложений, целесообразно применение современных аддитивных технологий [6]. Данные технологии позволяют использовать различные материалы, ис-

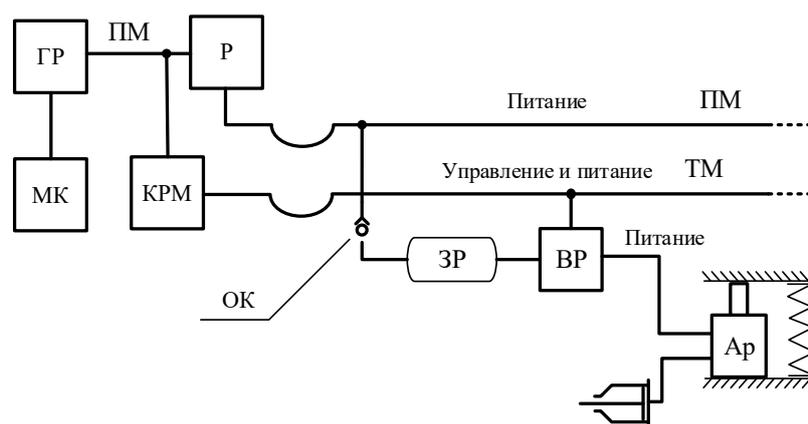


Рис. 1. Упрощенная схема двухтрубной пневматической тормозной системы для отечественного грузового подвижного состава:

ГР – главный резервуар; ПМ – питательная магистраль; ТМ – тормозная магистраль; Р – редуктор; МК – мотор-компрессор; КРМ – кран машиниста; ОК – обратный клапан; ЗР – запасный резервуар; ВР – воздухораспределитель; Ар – авторегулятор

Fig. 1. Simplified scheme of a two-pipe pneumatic braking system for domestic freight rolling stock
GR – main reservoir; PM – nutrient line; TM – brake line; R – reducer; МК – motor-compressor;
KRM – driver's crane; ОК – check valve; ZR – spare tank; VR – air distributor; Ar – auto-regulator

пользуя различные методы 3D-печати. Наиболее широкое распространение получила FDM-технология – способ послойного наплавления материала, представляющий собой пластиковый пруток, который подается в печатающую головку, где пластик нагревается и послойно наращивается на изделие. Для производства элементов конструкции пневматического редуктора технология была выбрана из-за простоты процесса изготовления, доступности оборудования, невысокой стоимости материала, высокой скорости печати и большого выбора исходных материалов [7–10].

Так как рабочее давление сжатого воздуха для редуктора составляет 0,9 МПа, то в качестве исходного материала для корпуса редуктора был выбран пластик PETG, поскольку этот материал обладает наиболее высокими прочностными характеристиками по сравнению с другими видами пластика. Готовая верхняя часть корпуса представлена на рис. 2.

Расчет прочности изделий, изготовленных при помощи аддитивных технологий методом конечных элементов

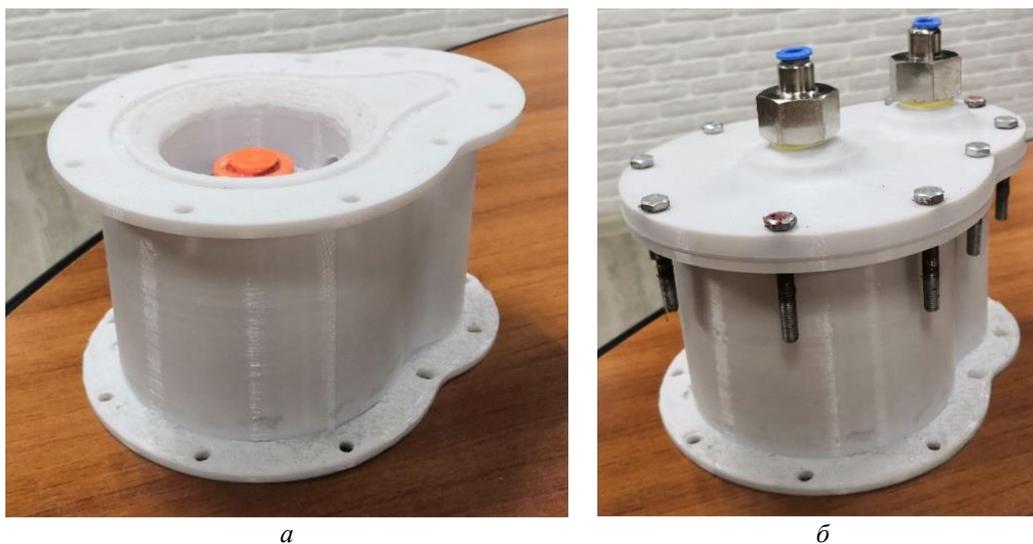
Основная причина отказа от изготовления прототипов, а далее и готовых продуктов из металла заключается в том, что такие изделия значительно дороже по себестоимости производства. Кроме того, они обладают повышенной массой. Для решения этой проблемы данную деталь изготовили пустотелой, с заполнением

внутреннего объема всего на 40 %. Но при этом совершенно очевидно, что минусом такого решения является снижение прочности готового изделия. С этой целью необходимо установить связь снижения прочности изделия в зависимости от заполнения изделий, изготовленных при помощи аддитивных технологий, а также возможность применения программного обеспечения Autodesk Inventor, для расчета напряженно-деформированного состояния объектов при помощи методов конечных элементов.

Суть метода конечных элементов заключается в разбиении поверхности физического тела на простые элементы различной формы и величины. В результате такого разбиения создается сетка из границ элементов, образуя узлы на пересечениях границ. В результате возникает числовая область решения, имеющая конечное число точек, что в конечном итоге приводит к созданию из простых уравнений более сложных их систем, позволяя решить поставленную задачу.

Для расчета прочности необходимо задать физико-механические свойства материала как в работе [11] (табл. 1).

Основным критерием, по которому можно оценить разрушится деталь или нет, является напряжения по Мизесу. Пластичный материал начинает повреждаться в местах, где напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению. В большинстве случаев, предел текучести используется в качестве пре-



а

б

Рис. 2. Часть корпуса пневматического редуктора:

a – без крышки; *б* – с крышкой и смонтированными переходниками

Fig. 2. Part of the pneumatic gearbox housing:

a – without a lid; *b* – with a lid and mounted adapters

Табл. 1. Физико-механические свойства PETG-пластика
Table 1. Physical and mechanical properties of PETG plastic

Показатель Indicator	Стандартные значения Standard values	Значения, принятые к расчету Values accepted for calculation
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	1,26–1,28	1,27
Прочность при растяжении, МПа Tensile strength, MPa	60–66	63
Предел текучести, МПа Yield strength, MPa	47,9–52,9	21
Модуль сдвига, МПа Shear modulus, MPa	1 240	1 240
Модуль Юнга, МПа Young's modulus, MPa	2 010–2 110	2 060
Коэффициент Пуассона Poisson's Ratio	0,42	0,42

дельного напряжения [12-16]. В данном случае предел текучести также будет использоваться в качестве предельного напряжения.

Недостатком использования вычислительных способностей Autodesk Inventor является то, что расчет проводится для полнотелого материала, по этой причине невозможно установить предел прочности для изделий с различной величиной заполнения внутреннего пространства. На основании проведенных исследований прочности ABS-пластика в зависимости от величины заполнения было выявлено, что предел прочности снижается пропорционально степени заполненности пространства внутри исследуемых образцов [17-20]. Следовательно, если корпус редуктора заполнен материалом на 40 %, то его предел прочности снизится приблизительно на 60 %. Таким образом, установим окончательный предел прочности, равный 21 МПа. Далее для точности расчетов были заданы следующие параметры сетки (табл. 2).

При износе прокладок сжатый воздух будет создавать силу, действующую на всю по-

верхность фланцев, что приведет к разрушению редуктора (самому опасному случаю), поэтому моделироваться будет именно этот процесс. С целью обеспечения безопасности при проведении эксперимента ограничимся рабочим давлением в камере над клапаном – 0,6 МПа (рис. 3).

Тогда по закону Паскаля сила, действующая на фланцы корпуса, составит

$$F = P \cdot S,$$

где $P = 6 \text{ кгс/см}^2$ – давление сжатого воздуха; $S = 146 \text{ см}^2$ – площадь, на которую действует давление при нарушении плотности прокладки.

Таким образом,

$$F = 6 \cdot 146 = 876 \text{ кгс} = 8\,594 \text{ Н}.$$

Далее необходимо приложить нагрузки к стенкам камеры над клапаном и к фланцам корпуса (рис. 4). Силу, действующую на фланцы, направляем вверх, так как давление будет стремиться сорвать крышку, воздействуя через болты на фланцы.

По результатам моделирования напряжений наибольшие напряжения сконцентрированы в месте примыкания фланцев редуктора к

Табл. 2. Настройки сетки
Table 2. Grid settings

Показатель Indicator	Значение Value
Средний размер элементов, м Average size of elements, m	0,01
Минимальный размер элементов, м Minimum size of elements, m	0,2
Коэффициент разнородности Heterogeneity coefficient	1,5
Максимальный угол поворота, град. Maximum angle of rotation, deg.	60

его корпусу (рис. 5), а наибольшие напряжения по Мизесу составили 37–40 МПа, максимально допустимый предел текучести – 31 МПа. Наблюдается околонулевой запас прочности, следовательно, в этих местах произойдет разрушение корпуса редуктора.

Для подтверждения результатов расчета напряженно-деформированного состояния бы-

ла проведена проверка корпуса редуктора на прочность за счет подключения его к компрессорной установке для подачи сжатого воздуха. При воздействии давления 0,6 МПа на корпус редуктора зафиксировано разрушение корпуса в местах максимальных напряжений, соответствующих математическому моделированию процесса нагружения конструкции (рис. 6).

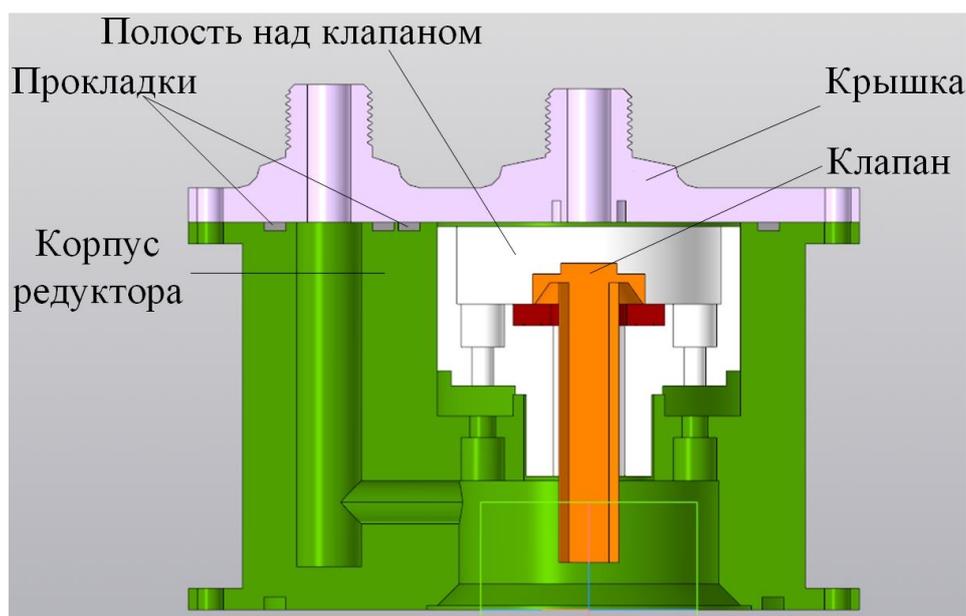


Рис. 3. Устройство верхней части пневматического редуктора
Fig. 3. The design of the upper part of the pneumatic gearbox

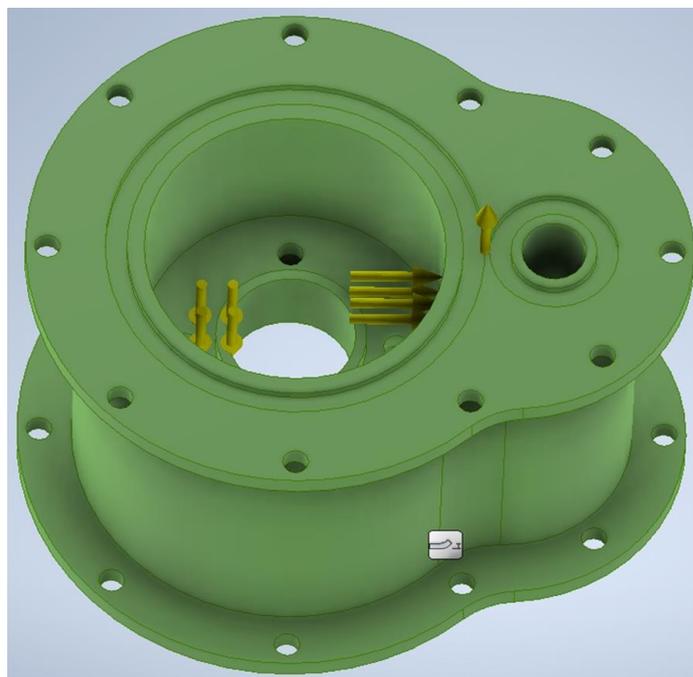


Рис. 4. Силы, действующие на корпус редуктора
Fig. 4. Forces affecting on the gearbox housing

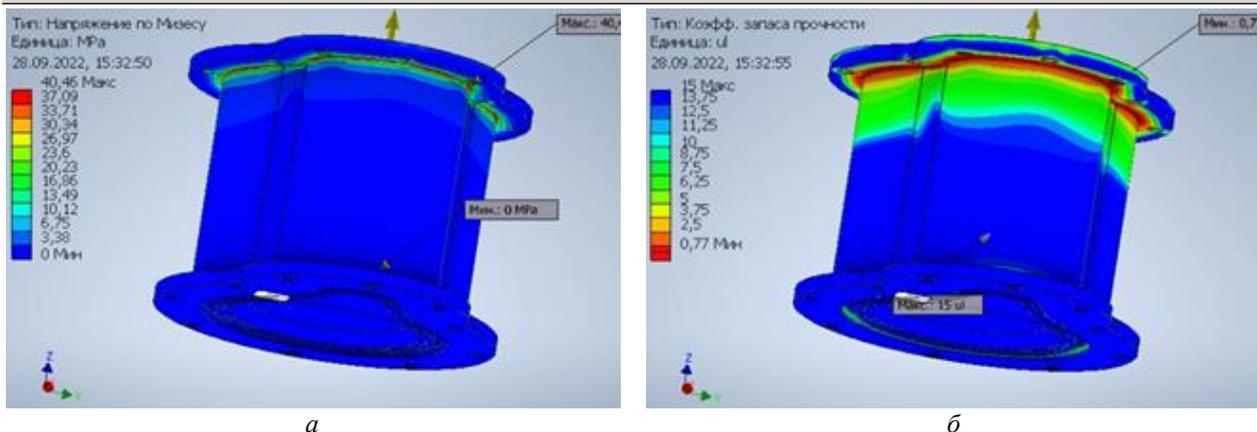


Рис. 5. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния корпуса редуктора:
a – напряжения по Мизесу; *б* – запас прочности

Fig. 5. The results of modeling the stress-strain state of the gearbox housing:
a – Mises stress; *b* – safety margin



Рис. 6. Разрушение корпуса редуктора в месте примыкания фланцев к основному телу
Fig. 6. Destruction of the gearbox housing at the junction of the flanges to the main body

Корпус первоначально предложенной формы не смог обеспечить работоспособность при давлении 0,9 МПа, разрушившись при давлении 0,6 МПа. Причем разрыв корпуса начался по линии максимальной концентрации напряжения и продолжился по диагонали над корпусом, что привело к полному отрыву фланцев (см. рис. 6). Форма разрыва указала на слабо проработанный стык фланца с корпусом, который имел резкий переход, концентрирующий напряжение, что достаточно ярко демонстрируют результаты расчетов. Принятым методом снижения концентрации напряжения является применение галтелей, обеспечивающих более плавный переход между плоскостями. В результате анализа и с учетом полученного результата было принято решение о необходимости внесения таких изменений в конструкцию корпуса, как увеличение толщины фланцев с 5 до 10 мм, а также создание галтели от основного корпуса к фланцам верхней части корпуса редуктора (рис. 7).

В ходе проведения аналогичного моделирования (рис. 8) было получено подтверждение

эффективности принятых изменений в конструкции, так как максимальное напряжение по Мизесу составило 10,6 МПа в местах наибольшей концентрации усилий и деформаций. Таким образом, обеспечивается более чем двукратный запас прочности в местах, подверженных наибольшим нагрузкам, т. е. модернизированный корпус сможет выдерживать рабочее давление до 1,2 МПа.

После получения удовлетворительных результатов моделирования, усиленный корпус был подключен к компрессорной установке и испытан при давлении 0,4 МПа. В ходе наблюдения за состоянием объекта под нагрузкой нарушения целостности выявлено не было. При повторном испытании показатель давления был увеличен до 0,6 МПа, что также не вызвало никаких повреждений (рис. 9). При нахождении под давлением 0,9 МПа, которое является номинальным для данного редуктора, в течение длительного времени также не произошло разрушение корпуса, что говорит о большом запасе прочности при правильном проектировании геометрии конструкции и учета нагруженных зон.

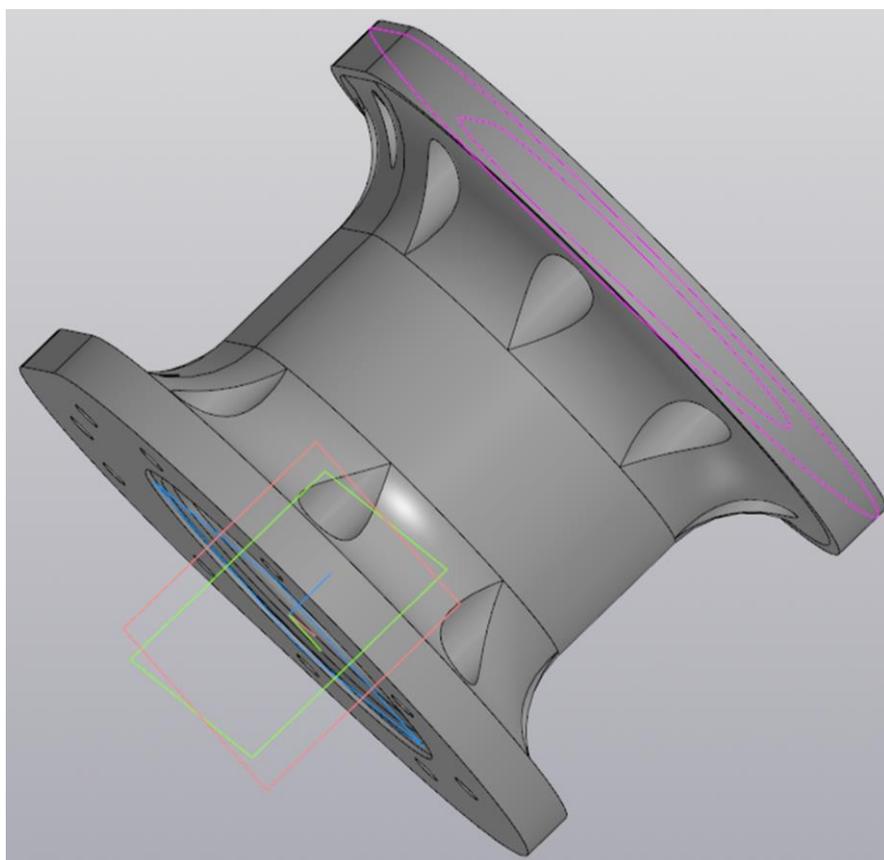


Рис. 7. Модернизированная верхняя часть корпуса редуктора
Fig. 7. Upgraded upper part of the gearbox housing

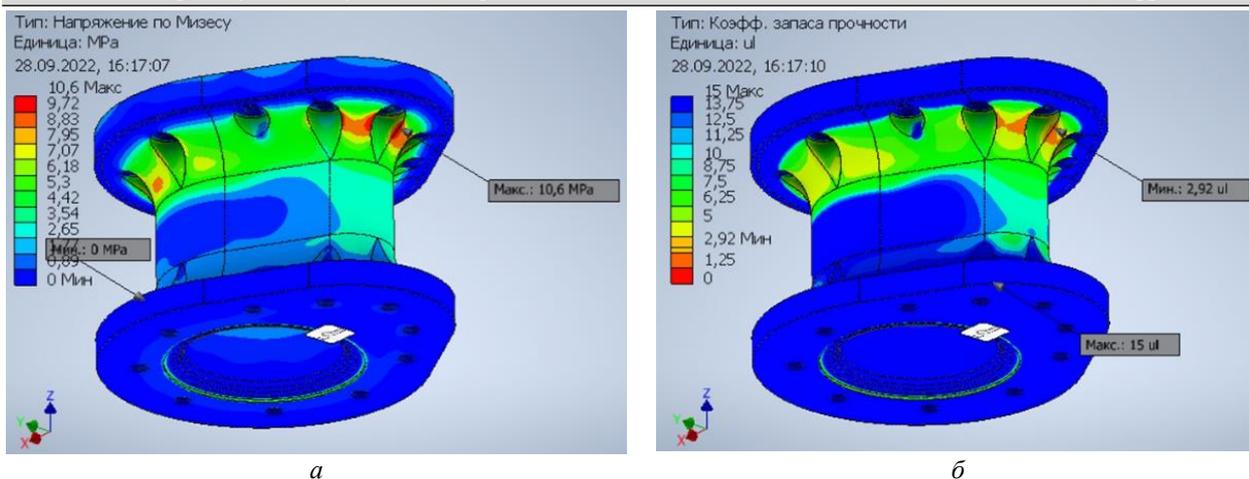


Рис. 8. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния усиленного корпуса редуктора:

a – напряжения по Мизесу; *б* – запас прочности

Fig. 8. The results of modeling the stress-strain state of the reinforced gearbox housing:
a – Mises stresses; *b* – safety margin



Рис. 9. Модернизированная часть корпуса пневматического редуктора

Fig. 9. Upgraded part of the pneumatic gearbox housing

Заключение

По результатам экспериментальных исследований и проведенного компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния корпусов редуктора, изготовленных при помощи аддитивных технологий, выявлено, что максимально допустимое напряжение снижается приблизительно на величину незаполненного пространства внутренней структуры. Однако при этом необходимо провести дополнительные исследования величины максимально допустимых

напряжений в зависимости от степени заполнения изделия и от настроек печати для уточнения данного вопроса. Также подтверждена высокая сходимость компьютерного моделирования с результатами экспериментальных исследований, что позволяет использовать программное обеспечение Autodesk Inventor для расчета пустотелых изделий, изготовленных при помощи аддитивных технологий.

Список литературы

1. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава: утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества (протокол от 6-7 мая 2014 г. № 60). Курган : Южн.-Урал. дирекция тяги, 2016. 162 с.
2. Зарубежный опыт повышения эффективности пневматических тормозов / П.Ю. Иванов, Е.Ю. Дульский, Н.И. Мануилов и др. // Локомотив. 2020. № 11 (767). С. 36–37.
3. Сравнительный анализ тормозных систем подвижного состава с однотрубным и двухтрубным питанием / П.Ю. Иванов, Е.Ю. Дульский, А.А. Хамнаева и др. // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 3 (79). С. 35–42.
4. Пат. 2740624 Рос. Федерация. Двухтрубная тормозная система железнодорожного подвижного состава / П.Ю. Иванов, А.А. Хамнаева, А.М. Худоногов и др. № 2020121882 ; заявл. 26.06.2020 ; опубл. 18.01.2021, Бюл. № 2. 8 с.
5. Зотов О.Ю., Фролов Д.А. Особенности метода изготовления изделий путем послойного наплавления материала // Ученый XXI века. 2016. № 1 (14). С. 7–11.
6. Применение аддитивных технологий при проектировании и изготовлении автотормозного оборудования / Н.С. Горбунова, Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов и др. // Молодая наука Сибири. 2021. № 1 (11). С. 44–50. Электр. журн. URL <https://mnv.irkups.ru/en/node/754> (Дата обращения 15.10.2022).
7. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство / О.Н. Гончарова, Ю.М. Бережной, Е.Н. Бесарабов и др. // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4 (43). С. 123.
8. Эффективность использования аддитивных технологий как альтернативы традиционным субтрактивным технологиям при изготовлении сложных деталей из металла / А.С. Агафонцев, Н.Н. Вовк, Ю.В. Клевнов и др. // Тр. РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2017. № 22-2. С. 228–231.
9. Этгель В.А., Берг А.А., Иванов С.С. Исследование технологии производства деталей сложной конфигурации с помощью аддитивных технологий // Академическая наука - проблемы и достижения : материалы XV междунар. науч.-практ. конф. North Charleston, 2018. С. 41–43.
10. Исследование комплекса характеристик базовых материалов для FDM-технологии аддитивного синтеза. Физико-механические и теплофизические свойства / Г.Н. Петрова, М.М. Платонов, В.А. Большаков и др. // Пластические массы. 2016. № 5-6. С. 53–58.
11. Шумейко И.А., Зайченко Н.О. Анализ пластмасс при их выборе для 3D печати модели ветроэнергетической установки // Universum: технические науки. 2021. № 3-1 (84). С. 74–77.
12. Базуев С.В., Лукашук О.А. Исследование напряженно-деформированного состояния траверсы литейного крана // Молодой ученый. 2020. № 19 (309). С. 5–8.
13. Galoyan H.A. Geometry modification and analysis of the “butterfly” flexure pivot by the experimental and finite element methods // Mechanics, Machine science, Machine-building : proceedings National Polytechnic University of Armenia. 2020. № 1. P. 48–54.
14. Тигиев З.И., Хрестусь К.В., Дауров О.Э. Применение метода конечных элементов для решения инженерных задач // Вестн. науч. тр. молодых учёных, аспирантов, магистрантов и студентов ФГБОУ ВО «Горский государственный аграрный университет». 2018. Т. 55. Ч. IV. С. 231–233.
15. Дульский Е.Ю. Моделирование режимов ИК-энергоподвода в технологии продления ресурса тяговых электрических машин с использованием метода конечных элементов // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2013. № 12 (83). С. 258–263.
16. Балашов А.В., Маркова М.И. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1 (52). С. 66.
17. Дремухин М.А., Наговицин В.Н. Разработка и моделирование неметаллической формообразующей оснастки для изготовления полимерных композиционных рефлекторов спутниковых антенн // Космические аппараты и технологии. 2021. Т. 5. № 4 (38). С. 183–190.
18. Крылов Д.В. Применение аддитивных технологий при производстве авиационных конструкций // XXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых): Междунар. молодёж. науч. конф. Казань, 2017. Т. 1. С. 529–533.
19. Петров В.М., Безпальчук С.Н., Яковлев С.П. О влиянии структуры на прочность изделий из пластика, получаемых методом 3D-печати // Вестн. гос. ун-та морск. и речн. флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 4. С. 765–776.
20. Кузнецов А.Е., Соколова В.М. Основные факторы, влияющие на прочность изделий при печати на 3D-принтере // Химия и химическая технология: достижения и перспективы : сб. материалов V Всерос. конф. Кемерово, 2020. С. 118.1–118.5.

References

1. Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: utv. Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva (protokol ot «6-7» maya 2014 g. № 60) [Rules for maintenance of brake equipment and brake control of railway rolling stock: approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States (Protocol No 60 dated May 6-7, 2014)]. Kurgan: Yuzhno-Ural'skaya direktsiya tyagi Publ., 2016. 162 p.
2. Ivanov P.Yu., Dul'skii E.Yu., Manuilov N.I., Khudonogov A.M., Khamnaeva A.A., Korsun A.A., Novikov N.N., Treskin S.V. Zarubezhnyi opyt povysheniya effektivnosti pnevmaticheskikh tormozov [Foreign experience in improving the efficiency of pneumatic brakes]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2020, no. 11 (767), pp. 36–37.
3. Ivanov P.Yu., Dul'skii E.Yu., Khamnaeva A.A., Korsun A.A., Treskin S.V. Sravnitel'nyi analiz tormoznykh sistem podvizhnogo sostava s odnotrubnym i dvukhtubnym pitaniem [Comparative analysis of braking systems of rolling stock with single-tube and two-tube power supply]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2020, no. 3 (79), pp. 35–42.
4. Ivanov P.Yu., Hamnaeva A.A., Hudonogov A.M., Dul'skii E.Yu., Manuilov N.I., Korsun A.A., Mayarchuk P.E., Treskin S.V. Patent RU 2740624 C1, 18.01. 2021.
5. Zotov O.Yu., Frolov D.A. Osobennosti metoda izgotovleniya izdelij putem poslojnogo naplavleniya materiala [Features of the method of manufacturing products by layer-by-layer deposition of material]. *Uchenyi XXI veka* [Scientist of XXI century], 2016, no. 1 (14), pp. 7–11.
6. Gorbunova N.S., Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Khamnaeva A.A., Novikov N.N. Primenenie additivnykh tekhnologii pri proektirovanii i izgotovlenii avtotormoznogo oborudovaniya [Application of additive technologies in the design and manufacture of auto-braking equipment]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia], 2021, no. 1 (11), pp. 44–50. Available at: URL <https://mnv.irkups.ru/en/node/754> (Accessed October 15, 2022).
7. Goncharova O.N., Berezhnoi Yu. M., Bessarabov E.N., Kadamov E.A., Gainutdinov T.M., Nagopet'yan, Kovina V.M. Additivnye tekhnologii – dinamichno razvivayushcheesya proizvodstvo [Additive technologies – dynamically developing production]. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2016, no. 4 (43), pp. 123.
8. Agafontsev A.S., Vovk N.N., Klevnov Yu.V., Kolyvanov A.N., Korepanov A.V., Koshkin V.V., Luchkin D.A., Mineichev M.V., Ovsov A.V., Sergeev D.V., Fomchenko V.N., Tsarev M.A. Effektivnost' ispol'zovaniya additivnykh tekhnologii kak al'ternativy traditsionnym subtraktivnym tekhnologiyam pri izgotovlenii slozhnykh detalei iz metalla [Efficiency of using additive technologies as an alternative to traditional subtractive technologies in the manufacture of complex metal parts]. *Trudy RFYAC-VNIIEF* [Proceedings of the Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics], 2017, no. 22-2, pp. 228–231.
9. Ettl' V.A., Berg A.A., Ivanov S.S. Issledovanie tekhnologii proizvodstva detalei slozhnoi konfiguratsii s pomoshch'yu additivnykh tekhnologii [Research of the production technology of parts of complex configuration using additive technologies]. *Materialy XV mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Akademicheskaya nauka – problemy i dostizheniya»* [Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference «Academic science – problems and achievements»]. North Charleston, 2018, pp. 41–43.
10. Petrova G.N., Platonov M.M., Bol'shakov V.A., Ponomarenko S.A. Issledovanie kompleksa kharakteristik bazovykh materialov dlya FDM-tekhnologii additivnogo sinteza. Fiziko-mekhanicheskie i teplofizicheskie svoystva [Investigation of the complex characteristics of base materials for FDM additive synthesis technology. Physico-mechanical and thermophysical properties]. *Plasticheskie massy* [Plastic masses], 2016, no. 5-6, pp. 53–58.
11. Shumeiko I.A., Zaichenko N.O. Analiz plastmass pri ikh vybore dlya 3D pechati modeli vetroenergeticheskoi ustanovki [Analysis of plastics when choosing them for 3D printing of a model of a wind power plant]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences], 2021, no. 3-1 (84), pp. 74–77.
12. Bazuev S.V., Lukashuk O.A. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya traversy liteinogo krana [Investigation of the stress-strain state of the casting crane traverse]. *Molodoi uchenyi* [Young Scientist], 2020, no. 19 (309), pp. 5–8.
13. Galoyan H.A. Geometry modification and analysis of the «butterfly» flexure pivot by the experimental and finite element methods. Proceedings National Polytechnic University of Armenia. Mechanics, Machine science, Machine-building, 2020, no 1, pp. 48–54.
14. Tigiev Z.I., Hrestus' K.V., Daurov O.E. Primenenie metoda konechnykh elementov dlya resheniya inzhenernykh zadach [Application of the finite element method for solving engineering problems]. *Vestnik nauchnykh trudov molodykh uchenykh, aspirantov, magistrantov i studentov FGBOU VO «Gorskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet»* [Bulletin of proceedings of young scientists, postgraduates, undergraduates and students of the Gorsky State Agrarian University]. Vladikavkaz, 2018, vol. 55, part IV, pp. 231–233.
15. Dul'skii, E.Yu. Modelirovanie rezhimov IK-energopodvoda v tekhnologii prodleniya resursa tyagovykh elektricheskikh mashin s ispol'zovaniem metoda konechnykh elementov [Modeling of IR power supply modes in the technology of life extension of traction electric machines using the finite element method]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2013, no. 12 (83), pp. 258–263.
16. Balashov A.V., Markova M.I. Issledovanie struktury i svoystv izdelii, poluchennykh 3D-pechat'yu [Investigation of the structure and properties of products obtained by 3D printing]. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2019, no. 1 (52), pp. 66.
17. Dremukhin M.A., Nagovitsin V.N. Razrabotka i modelirovanie nemetallicheskoj formoobrazuyushchei osnastki dlya izgotovleniya polimernykh kompozitsionnykh reflektorov sputnikovyykh antenn [Development and modeling of non-metallic shaping equipment for the manufacture of polymer composite reflectors of satellite antennas]. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii* [Spacecraft and technologies], 2021, vol. 5, no. 4 (38), pp. 183–190.

18. Krylov D.V. Primenenie additivnykh tekhnologii pri proizvodstve aviatsionnykh konstrukttsii [Application of additive technologies in the production of aircraft structures]. *Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya «XXIII Tupolevskie chteniya (shkola molodykh uchennykh)»* [International Youth Scientific Conference «XXIII Tupolev Readings (School of Young Scientists)»]. Kazan', 2017, vol. 1, pp. 529–533.

19. Petrov V.M., Bezpal'chuk S.N., Yakovlev S.P. O vliyaniy struktury na prochnost' izdelii iz plastikov, poluchaemykh metodom 3D-pechati [On the influence of the structure on the strength of plastic products obtained by 3D-printing]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova* [Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov], 2017, vol. 9, no. 4, pp. 765–776.

20. Kuznetsov A.E., Sokolova V.M. Osnovnye faktory, vliyayushchie na prochnost' izdelii pri pechati na 3D-printere [The main factors affecting the strength of products when printing on a 3D printer]. *Sbornik materialov V vserossiiskoi konferentsii «Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya: dostizheniya i perspektivy»* [Proceedings of the V All-Russian Conference «Chemistry and chemical technology: achievements and prospects»]. Kemerovo, 2020, pp. 118.1–118.5.

Информация об авторах

Осипов Дмитрий Валерьевич, аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: osipovdnor@mail.ru.

Иванов Павел Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: savl.ivanov@mail.ru.

Ковшин Андрей Сергеевич, инженер стартап-школы «Цифра», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: andrik893@mail.ru.

Пахомов Вадим Викторович, кафедра электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: vadim.pakhomov.2000@mail.ru.

Information about the authors

Dmitrii V. Osipov, Ph.D. Student of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: osipovdnor@mail.ru.

Pavel Yu. Ivanov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: savl.ivanov@mail.ru.

Andrei S. Kovshin, engineer of the startup school «Digit», Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: andrik893@mail.ru.

Vadim V. Pakhomov, Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: vadim.pakhomov.2000@mail.ru.