

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 62-59

EDN: NUIVAY

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-2-216-233



Разработка устройства составного тормозного диска дисково-колодочного тормоза транспортных средств с повышенными эксплуатационными характеристиками

Е.Ф. Скляренко^{1✉}, Ю.Д. Шевцов²^{1,2}Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Резюме. Цель – разработать устройство составного тормозного диска дисково-колодочного тормоза транспортных средств, обладающего повышенными эксплуатационными характеристиками. Объектом исследований явились конструкции дисково-колодочных тормозных устройств транспортного средства марки Ford, модели Explorer 5-го поколения, 2017 года выпуска. Для устранения недостатков данных дисков (повышенные градиенты температур и внутренних напряжений на поверхностях и в теле тормозных дисков; отсутствие свойства ремонтпригодности дисков; недостаточный отвод тепла от рабочих поверхностей пары трения диск-колодка) использовались методы теории решения изобретательских задач, с учетом положений которой был предложен метод расчленения основных конструктивных элементов тормозного диска на составляющие. Для разработки конструкции составного тормозного диска использовались методы трехмерного проектирования в учебной версии российского программного продукта КОМПАС-3D, v21. На основе поставленных задач разработано устройство составного тормозного диска, конструктивные элементы которого представлены на иллюстрациях 3D-моделей и изготовленных прототипов с пояснениями их осуществления. В результате построения конечно-элементных сеток с последующим выполнением статических расчетов на прочность по критериям Мизеса были выявлены области напряжено-деформируемого состояния разработанных деталей устройства составного тормозного диска. Сделаны выводы о необходимости оптимизации элементов конструкции и выбора материалов, обладающих оптимальными физическими свойствами (плотность, предел текучести, модуль упругости, теплопроводность и т.д.), что позволит снизить инерционные массы изделий и неподрессоренные массы транспортного средства, повысить гарантированный запас прочности и улучшить отведение тепла от пар трения дисково-колодочных тормозных устройств. Рассмотрены и применены методы и технологии 3D-печати воскоподобными филаментами, необходимые для сталелитейного производства по выплавляемым моделям. Таким образом, по результатам проведенных исследований показано, что выбор оптимальных материалов позволит повысить эффективность торможения при использовании разрабатываемой конструкции, снизить тормозной путь и время останова транспортного средства. Представлены рекомендации по настройкам и режимам печати.

Ключевые слова: составной тормозной диск, составной тормозной ротор, конечно-элементный анализ, 3D-печать, выплавляемые модели

Для цитирования: Скляренко Е.Ф., Шевцов Ю.Д. Разработка устройства составного тормозного диска дисково-колодочного тормоза транспортных средств с повышенными эксплуатационными характеристиками // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 2. С. 216–233. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-216-233>. EDN: NUIVAY.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Development of a modular brake disc assembly for spot-type disc brake systems with enhanced performance characteristics

Evgeniy F. Sklyarenko^{1✉}, Yuriy D. Shevtsov²^{1,2}Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Abstract. This study presents a modular brake disc assembly designed to improve the performance characteristics of automotive spot-type disc brake systems. We examined disc brake system configurations in 2017 fifth-generation Ford Explorer vehicles. Three principal limitations of conventional brake discs were identified: excessive thermal gradients and internal stresses within disc components, non-repairable structural designs, and insufficient heat

transfer from friction surfaces during operation. To address these challenges, we employed the theory of inventive problem solving (TRIZ), which led to the development of a modular decomposition approach for principal structural elements of the brake disc. The design process involved 3D modelling techniques within the KOMPAS-3D v21 educational software package, which facilitates comprehensive virtual prototyping and analysis. Finite element meshing and subsequent static strength calculations, using the von Mises criteria, revealed stress-strain distribution zones in the developed components of the modular brake disc assembly. The findings underscore the importance of enhancing structural design and selecting materials with optimal physical properties, including density, yield strength, elastic modulus, and thermal conductivity. This approach would reduce the inertial masses of components and the unsprung masses of the vehicle, while increasing the guaranteed safety factor and improving heat dissipation from the friction pairs in spot-type disc brake systems. In addition, 3D printing methods with wax-like filaments, essential for investment casting in steel production, were reviewed and applied. The study demonstrates that the selection of optimal materials enhances braking efficiency and reduces the stopping distance and time of a vehicle when using the proposed design. Recommendations for print settings and modes are also provided.

Keywords: composite brake disc, composite brake rotor, finite element analysis, 3D printing, investment casting models

For citation: Sklyarenko E.F., Shevtsov Yu.D. Development of a modular brake disc assembly for spot-type disc brake systems with enhanced performance characteristics. *iPolytech Journal*. 2025;29(2):216-233. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-216-233>. EDN: NUIVAY.

ВВЕДЕНИЕ

Конструкции тормозных дисков, используемых во фрикционных тормозных узлах транспортных средств (ТС), широко известны³ [1–9]. Тормозные диски в целом используются в тормозных системах ТС для их замедления, остановки или удержания в неподвижном состоянии путем прижатия к фрикционным кольцевым дискам фрикционных накладок тормозных колодок при задействовании тормоза. Тормозные диски (при использовании вентилируемых тормозных дисков) включают в себя ступичную часть, соединенную с двумя взаимно параллельными боковыми фрикционными кольцами, которые, в свою очередь, чаще всего соединены между собой перегородками, например, в виде лопастей, ребер, перемычек, столбов, гребней, которые могут иметь различный профиль. Указанные перегородки вместе с внутренними поверхностями фрикционных колец образуют каналы (вентиляционный аппарат), по которым при вращении тормозного диска интенсифицируется процесс

прохождения потоков воздуха, омывающих стенки вентиляционного аппарата, что способствует конвективному охлаждению тормозного диска.

В результате патентного поиска [5–7] и анализа проблем известных конструкций вентилируемых тормозных дисков, освещенных в научных трудах [1–9, 13–15], был выделен ряд свойственных им недостатков, к которым относятся:

1) повышенный градиент температур между роторной и ступичной частями, вследствие чего роторная часть имеет большее тепловое расширение, чем ступичная часть. Перепад температур в теле диска при торможении приводит к повышенным термомеханическим напряжениям в его теле, что, в свою очередь, приводит к образованию трещин на границах перепада температур и возникающих напряжений;

2) известные устройства тормозных дисков не обладают таким свойством, как ремонтпригодность, предусмотренным производителем. Так, в случае износа рабочих



Рис. 1. Вид общей конструкции современных тормозных дисков транспортных средств
Fig. 1. General view of the design of modern vehicle brake discs

³Вольченко Н.А., Красин П.С. Дисково-колодочные тормозные устройства: учеб. пособ. Краснодар: КубГТУ, 2020. 66 с.

поверхностей ротора и/или повреждения тормозного диска требуется его полная замена на новый тормозной диск ввиду цельной (неразборной) конструкции. Значит, цельнолитая конструкция тормозных дисков (роторов) не позволяет использовать повторно его «каркас» или заменять/восстанавливать изношенные кольцевые поверхности трения;

3) что касается соединительных элементов, предназначенных для соединения между собой двух противоположащих фрикционных кольцевых дисков, в совокупности образующих вентиляционные каналы, то они изготавливаются совместно (единовременно) с кольцевыми фрикционными дисками, например, методами литья, из одного и того же материала, что и все тело тормозного диска (ротор, ступичная часть). Ввиду чего материал внутренних стенок вентиляционного аппарата, равно как и остальные конструктивные элементы ротора и ступичной части, имеет те же теплопроводность и теплоемкость, из-за чего не может быть достигнут более эффективный отвод теплоты от тормозного диска.

Целью работы является разработка устройства составного тормозного диска и определение необходимых расчетных методов исследования, которые позволят оптимизировать предложенные конструктивные решения и устранить известные недостатки тормозных устройств ТС.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Таким образом, для разработки устройства составного тормозного диска дисково-колодочного тормоза ТС, обладающего повышенными эксплуатационными характеристиками, необходимым является решение следующих технических задач:

1) устройство составного тормозного диска должно обладать свойством ремонтно-пригодности, то есть его конструкция должна позволять производить замену/восстановление отдельной изношенной и/или поврежденной детали, например, с использованием комплекта запасных частей и принадлежностей или методами восстановления поверхностей;

2) устройство составного тормозного диска должно обеспечивать его эффектив-

ное охлаждение, в первую очередь набегающими потоками воздуха окружающей среды;

3) устройство и материалы деталей составного тормозного диска должны обеспечивать ему высокую стойкость к термомеханическим нагрузкам и напряжениям, возникающим при торможении;

4) устройство составного тормозного диска (и каждой из составляющих его деталей) должно допускать возможность применения технологических процессов при их изготовлении (производстве) и последующем обслуживании/ремонте при эксплуатации с использованием доступных и распространенных, а также рентабельных технологий и технических средств.

Решение поставленных задач выполнялось для ТС, в частности для ТС марки Ford, модели Explorer 5-го поколения, 2017 года выпуска, имеющего массу 2405 кг, мощность двигателя внутреннего сгорания 249 л.с. (лошадиных сил), максимальную скорость 183 км/ч, оснащенного на передней оси вентилируемыми тормозными дисками и 4-поршневыми тормозными суппортами. 3D-модель разработанной конструкции составного тормозного диска представлена на рис. 2, 3. При проектировании указанной конструкции составного тормозного диска соблюдались требования изготовителя Ford к габаритным и установочным размерам указанного ТС таким образом, чтобы была возможна его штатная установка. Так, толщина штатного тормозного диска равна 32 мм, внешний диаметр тормозного диска – 352 мм, количество крепежных отверстий к ступице составило 5 шт.

Для решения поставленных технических задач использовалась теория решения изобретательских задач (ТРИЗ) [16], с учетом которой был разработан метод расчленения основных конструктивных элементов вентилируемого тормозного диска на составляющие. Суть предлагаемого метода заключается в разбиении элементов конструкции на функциональные группы. Так, путем разделения конструкции вентилируемого тормозного диска на функциональные группы были выделены его следующие основные конструктивные элементы: 1) фрикционные кольцевые диски (слева и справа), воспринимающие воздействия от фрикционных накладок тормозных колодок; 2) функциональный каркас, выполняющий как функцию не-

сущей конструкции с элементами крепежа, так и функцию распределения течения потоков воздуха окружающей среды, необходимой для реализации интенсификации охлаждения тормозного диска; 3) функциональные корпуса теплоконденсаторов, выполняющие функции соединения деталей конструкции в единое целое устройство – тормозной диск, отведения теплоты от фрикционных кольцевых дисков в стенки вентиляционного аппарата и, соответственно, функцию вентиляционного аппарата; 4) ступичный фланец, выполняющий монтажную функцию устройства составного тормозного диска к ступице колеса. Таким образом, расчленение основных конструктивных элементов вентилируемого тормозного диска на составляющие позволило выделить его основные компоненты, представленные на рис. 2, которые могут быть изготовлены независимо друг от друга с применением доступных и распространенных, а также рентабельных технологий и технических средств, например, методов литейного производства, в том числе по выплавляемым моделям на основе воскоподобных материалов и композиционных оболочек. Для разработки конструкции составного тормозного диска использовались методы трехмерного проектирования в учебной версии

русского программного продукта КОМПАС-3D v21 (рис. 2–13).

Устройство разрабатываемого составного тормозного диска дисково-колодочного тормоза ТС с повышенными эксплуатационными характеристиками (см. рис. 2–13) представляет собой составную (сборно-разборную) конструкцию, включающую в себя: 1 – фрикционный кольцевой диск; 2 – функциональный каркас; 3 – функциональный корпус теплоконденсатора; 4 – ступичный фланец; 5 – наружную сторону фрикционного кольцевого диска; 6 – тыльную (внутреннюю) сторону фрикционного кольцевого диска; 7 – шип; 8 – малую упорную площадку; 9 – упорное ребро; 10 – внутреннюю упорную площадку; 11 – наружную упорную площадку; 12 – фланцевую часть; 13 – отверстие для фиксации ступичного фланца; 14 – отверстие для фиксации функционального корпуса теплоконденсатора; 15 – сквозные каналы (вентиляционный аппарат); 16 – боковую упорную площадку; 17 – малую проушину; 18 – отверстие для фиксации функционального корпуса теплоконденсатора на функциональном каркасе; 19 – внутреннюю перемычку; 20 – шип; 21 – проушину; 22 – отверстие; 23 – установочную поверхность; 24 – установочную поверхность; 25 – установочную по-

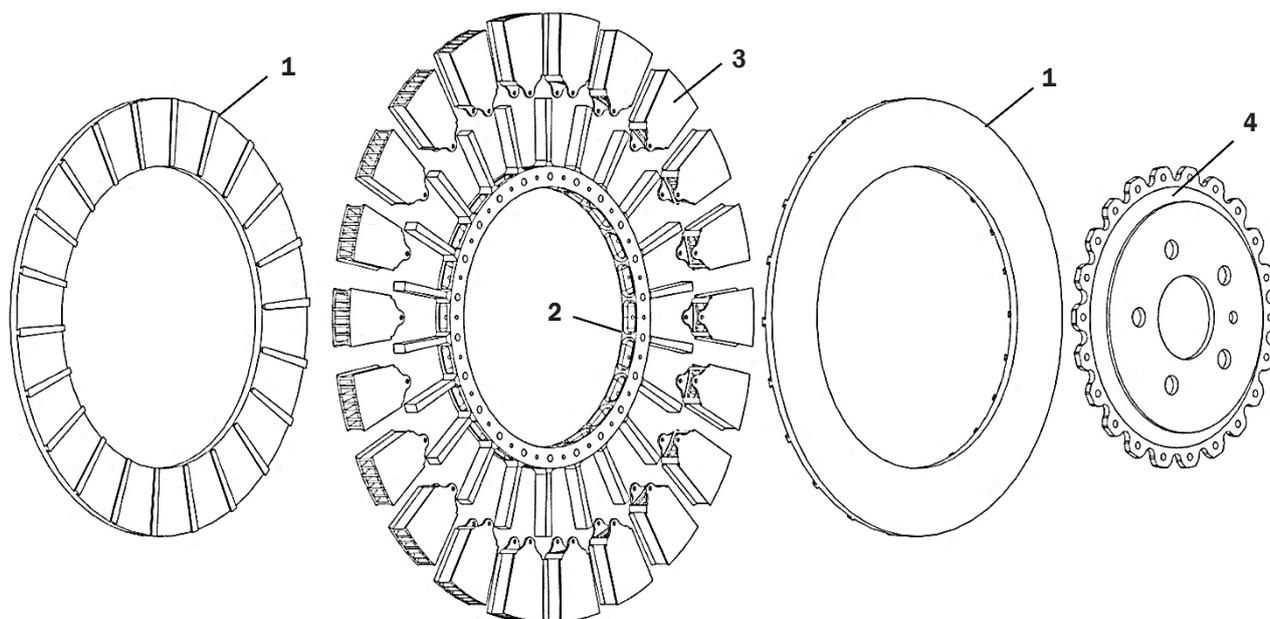


Рис. 2. Вид в перспективе на детали устройства составного тормозного диска в разрозненном (разобранном) состоянии: 1 – фрикционный кольцевой диск; 2 – функциональный каркас; 3 – функциональный корпус теплоконденсатора; 4 – ступичный фланец

Fig. 2. Perspective view of the components of the composite brake disc in a disassembled state: 1 – friction annular disc; 2 – functional frame; 3 – functional body of the heat condenser; 4 – hub flange

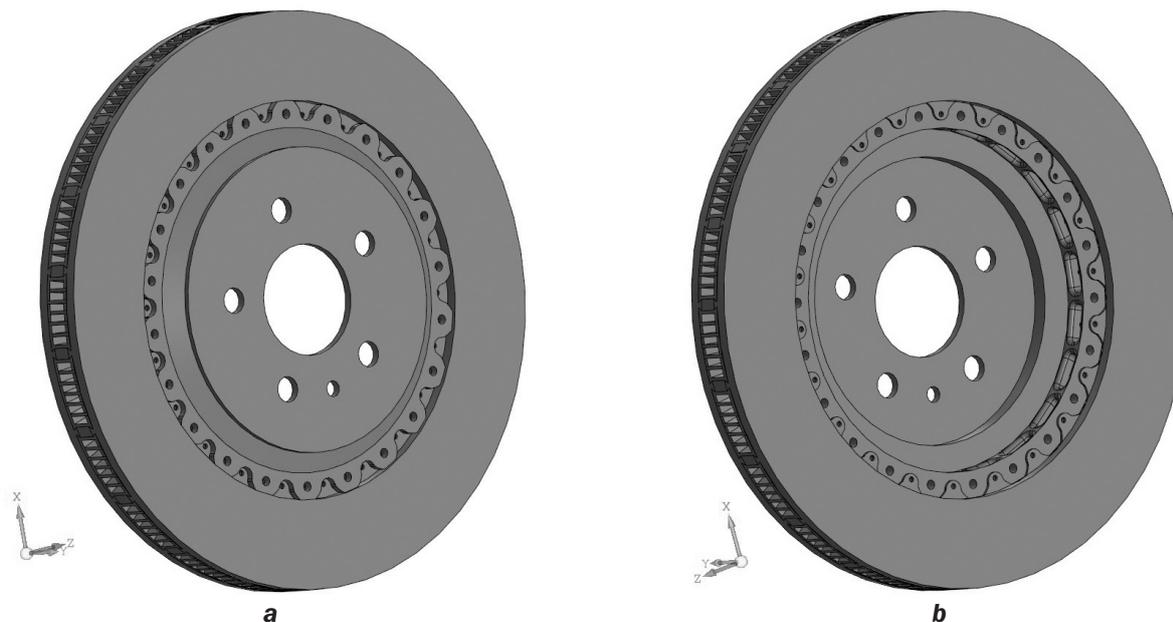


Рис. 3. Общий вид составного тормозного диска по рис. 2 в сборе, разработанного в учебной версии российского программного продукта КОМПАС-3D v21: а – вид спереди; б – вид сзади

Fig. 3. General view of the composite brake disc assembly according to Fig. 2 developed in the training version of the Russian software product COMPASS-3D v21: a – front view; b – rear view

верхность; 26 – центральное отверстие; 27 – отверстие; 28 – проем (карман); 29 – сквозной канал (вентиляционный аппарат).

Фрикционные кольцевые диски 1 (см. рис. 4–5), предпочтительно изготавливаемые из металлических сплавов или композиционного материала, например, карбида кремния, армированного углеродными волокнами, выполняются в виде цилиндрических колец. Наружная сторона фрикционных кольцевых дисков 5 предназначена для контактного взаимодействия с фрикционным материалом тормозной колодки при торможении, может изготавливаться ровной, а также иметь насечки (канавки, углубления, слотирование) или перфорацию. На тыльной (внутренней) стороне фрикционных кольцевых дисков 6 выполняются шипы 7, например, типа «ласточкин хвост», в количестве от двух до пятидесяти штук, а предпочтительнее в количестве от шестнадцати до двадцати шести штук, которые предназначены для соединения фрикционных кольцевых дисков 1 между собой с помощью функциональных корпусов теплоконденсаторов 3. При этом на шипах 7 выполняются малые упорные площадки 8, необходимые для упора фрикционных кольцевых дисков 1 в упорные ребра 9, выполненные в функциональном каркасе 2. Внутренние упорные площадки 10,

выполненные между шипами 7 на тыльной (внутренней) стороне фрикционных кольцевых дисков 6, предпочтительно выполняются ровными с целью обеспечения надлежащего контактного взаимодействия и теплообмена с наружными упорными площадками 11, которые выполняются на корпусах теплоконденсаторов 3.

Функциональный каркас 2 (см. рис. 6), предпочтительно изготавливаемый из металлических сплавов или композиционных материалов, имеет фланцевую часть 12, в которой выполнены отверстия для фиксации ступичного фланца 13 и отверстия для фиксации функциональных корпусов теплоконденсаторов 14 соответственно. Во фланцевой части 12 функционального каркаса 2 выполнены сквозные каналы (вентиляционный аппарат) 15, через которые при вращении составного тормозного диска проходят потоки воздуха, охлаждающие его. При этом от фланцевой части 12 функционального каркаса 2, предпочтительно в радиальном направлении, исходят упорные ребра 9 в количестве от двух до пятидесяти штук, оптимально в количестве от шестнадцати до двадцати шести штук, форма которых может быть профилированной, но предпочтительно имеющая прямоугольные сечения. Предпочтительно, чтобы грани упорных ребер 9 вы-

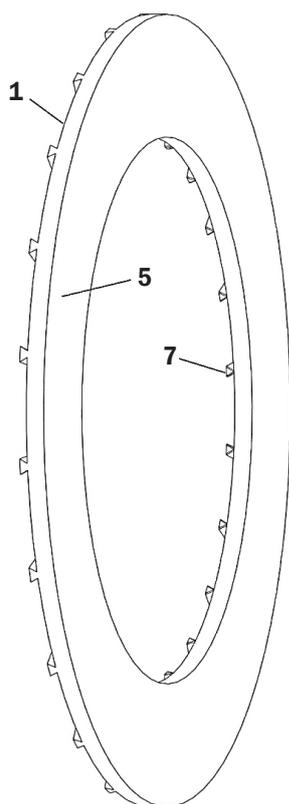


Рис. 4. Вид в перспективе на фрикционный кольцевой диск спереди
Fig. 4. Perspective view of the friction annular disk from the front

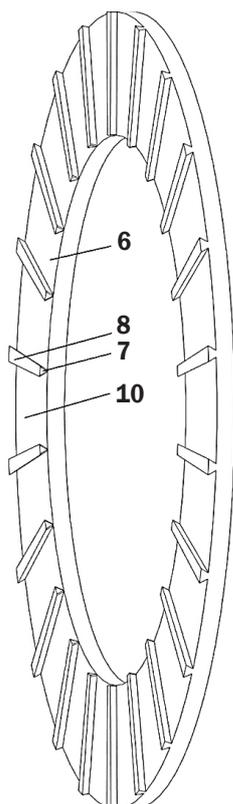


Рис. 5. Вид в перспективе на фрикционный кольцевой диск сзади
Fig. 5. Perspective view of the friction annular disk from behind

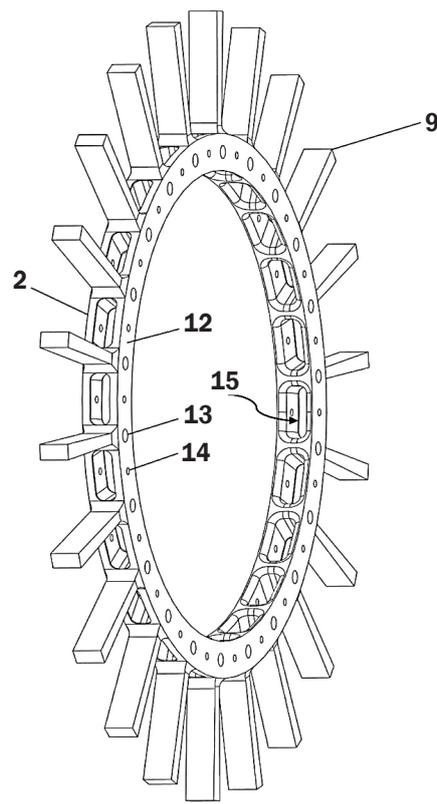


Рис. 6. Вид в перспективе на функциональный каркас, выполненный симметрично
Fig. 6. Perspective view of a functional frame made symmetrically

полнялись взаимно перпендикулярными и имели ровные поверхности, с целью обеспечения надлежащего контактного взаимодействия и теплообмена с функциональными корпусами теплоконденсаторов 3.

Функциональные корпуса теплоконденсаторов 3 (см. рис. 7, 8), предпочтительно изготавливаемые из металлических сплавов или композиционных материалов, имеют следующие конструктивные элементы: наружные упорные площадки 11, по средствам которых функциональные корпуса теплоконденсаторов 3 контактируют с фрикционными кольцевыми дисками 1; боковые упорные площадки 16, по средствам которых корпуса теплоконденсаторов 3 контактируют с упорными ребрами 9 функционального каркаса 2; малые проушины 17, в которых выполнены отверстия для фиксации функциональных корпусов теплоконденсаторов на функциональном каркасе 18 с помощью клепок или резьбового соединения (например, болтов, винтов, гаек, крепежных втулок); внутренние перемычки 19, соединяющие стенки

корпуса теплоконденсатора, которые в совокупности образуют сквозные каналы, через них при вращении составного тормозного диска проходят потоки воздуха, охлаждающие его, при этом внутренние перемычки 19 могут быть выполнены, например, в виде лопастей, ребер, перемычек, столбов, гребней, могут иметь различный профиль и пространственное расположение, например, продольно, поперек или под углом по отношению к стенкам функционального корпуса теплоконденсатора; шипы 20, выполняемые на ребрах боковых граней функциональных корпусов теплоконденсаторов 3 для соединения с фрикционными кольцами 1, и предпочтительно имеющие треугольное сечение.

Ступичный фланец 4 (см. рис. 9, 10) изготавливается в виде чаши (миски, тарелки), имеющей радиально расположенные проушины 21 в количестве от двух до пятидесяти штук, а предпочтительнее в количестве от шестнадцати до двадцати шести штук, в которых выполняются отверстия 22. При этом установочные поверхности 23, 24 и 25 вы-

полняются ровными и взаимно параллельными. Ступичный фланец 4 может иметь центральное отверстие 26, а также отверстия 27 для установки на ступицу, которые могут располагаться по окружности на некотором расстоянии от центрального отверстия 26.

Сборка элементов (деталей) конструкции составного тормозного диска, изготовленных с применением доступных и распространенных, а также рентабельных технологий и технических средств, осуществляется методом стыковки между собой фрикционных кольцевых дисков 1 и функционального каркаса 2, устанавливаемого между фрикционными кольцевыми дисками 1 таким образом, чтобы малые упорные площадки 8 шипов 7, выполненных, например, по типу «ласточкин хвост» на тыльных (внутренних) сторонах фрикционных кольцевых дисков 6 совпадали с упорными ребрами 9, выполненными в функциональном каркасе 2, как это показано на рис. 11–13, после чего в образовавшиеся проемы (карманы) 28 устанавливаются функциональные корпуса теплоконденсаторов 3, которые по средствам шипов 20 входят в зацепление с шипами 7, выполненными на тыльных (внутренних) сторонах фрикционных кольцевых дисков 6, образуя с ними механическую связь. После выполнения указанных

операций выполняется фиксация функциональных корпусов теплоконденсаторов 3 на функциональном каркасе 2 по средствам клепок или резьбового соединения через соответствующие отверстия для фиксации функциональных корпусов теплоконденсаторов на функциональном каркасе 18 и отверстий для фиксации функциональных корпусов теплоконденсаторов 14. Ступичный фланец 4 составного тормозного диска устанавливается и фиксируется на металлическом функциональном каркасе 2 по средствам клепок или резьбового соединения через соответствующие отверстия 22 и отверстия для фиксации ступичного фланца 13.

Ремонтопригодность разрабатываемого составного тормозного диска достигается за счет устройства его конструкции, которая является составной (сборно-разборной), что в свою очередь позволяет в случае необходимости, например, износа и/или повреждения, производить замену любой из требующих того составляющих его деталей на новую запасную часть или имеющую иные необходимые параметры и свойства. Так, например, в процессе эксплуатации возможна замена фрикционных кольцевых дисков, изготовленных, например, из чугуна, на фрикционные кольцевые диски, имею-

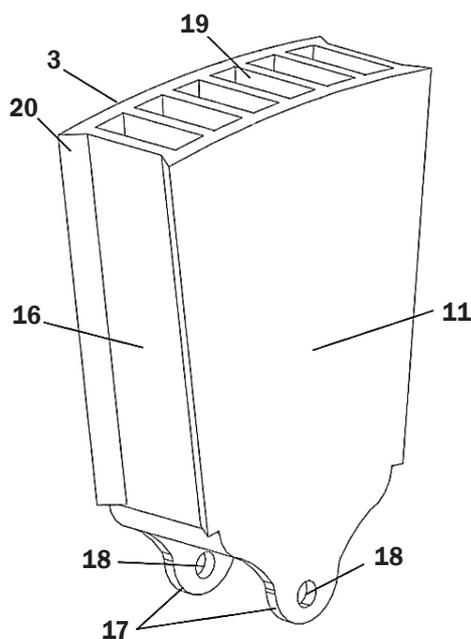


Рис. 7. Вид в перспективе на функциональный корпус теплоконденсатора

Fig. 7. Perspective view of the heat condenser functional body

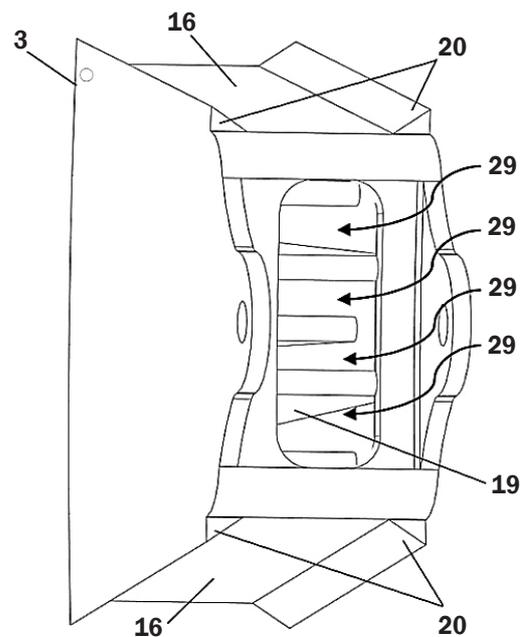


Рис. 8. Вид в перспективе на элементы вентиляционного аппарата функционального корпуса теплоконденсатора

Fig. 8. Perspective view of the elements of the ventilation unit of the heat condenser functional body

щие соответствующую конструкцию, но изготовленные из другого предпочтительного материала, например, из стали или керамического композиционного материала, армированного углеродными волокнами. Таким образом, предлагаемое техническое решение позволяет не только придать свойство ремонтпригодности тормозному диску, но и также в случае необходимости позволяет адаптировать эффективность составного тормозного диска в соответствии с условиями эксплуатации и режимами его нагружения путем установки тех или иных составляющих его деталей (запасных частей), изготовленных из материалов, имеющих требуемые (предпочтительные) параметры и свойства.

Повышение эффективности охлаждения разрабатываемого составного тормозного диска достигается, во-первых: за счет развитого вентиляционного аппарата с повышенной эффективной площадью внутренних поверхностей вентиляционного аппарата, входные отверстия которого выполнены в функциональном каркасе и имеющие свое продолжение в каждом отдельном функциональном корпусе теплоконденсаторов, которые выполнены в них с множеством внутренних перемычек, что в совокупности способствует улучшению конвективного теплообмена тормозного диска с воздухом окружающей среды; во-вторых, за счет использования в конструкции функционально-

го каркаса и в конструкции функциональных корпусов теплоконденсаторов материалов, которые обладают необходимой прочностью наряду с повышенной теплопроводностью и/или теплоемкостью, к ним могут относиться, например, алюминиевые сплавы, углеродистые стали, что способствует интенсификации охлаждения рабочих поверхностей диска, поскольку теплота быстрее отводится от них в стенки вентиляционного аппарата, то есть к внутренним перемычкам, а затем и в воздух окружающей среды.

Стойкость к термомеханическим нагрузкам и напряжениям, возникающим в тормозном диске при торможении, достигается за счет следующих технических решений:

- во-первых, за счет составной (сборно-разборной) конструкции, благодаря которой величина теплового расширения каждого конструктивного элемента может быть компенсирована с целью снижения напряженно-деформируемого состояния элементов конструкции при их нагреве и снижения тем самым вероятности возникновения трещин по средствам компенсаторного теплового зазора, выполняемого в таких частях элементов составной конструкции, например, как в тех, которые образуют соединение типа «ласточкин хвост» между фрикционными кольцевыми дисками, функциональным каркасом и функциональными корпусами теплоконденсаторов;

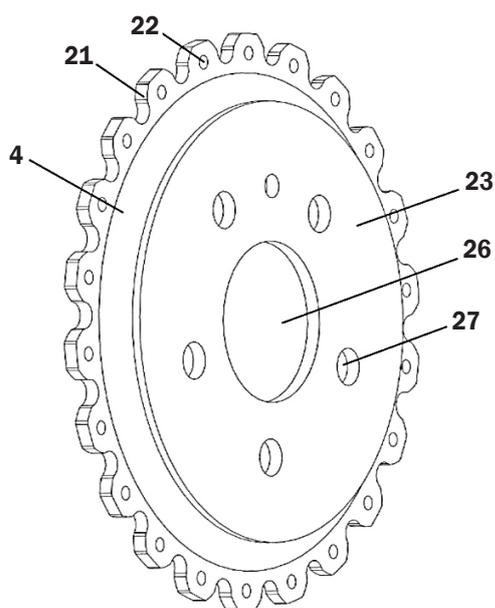


Рис. 9. Вид в перспективе на ступичный фланец спереди
Fig. 9. Perspective view of the hub flange from the front

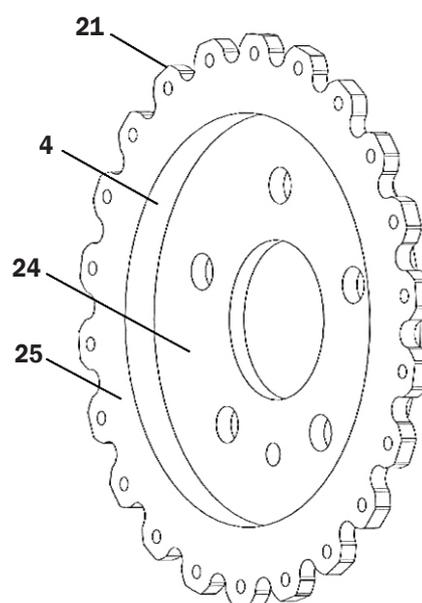


Рис. 10. Вид в перспективе на ступичный фланец сзади
Fig. 10. Perspective view of the hub flange from the rear

– во-вторых, за счет повышенной эффективности охлаждения составного тормозного диска, и, как следствие, снижения его рабочей температуры, достигаемой за счет развитого вентиляционного аппарата, имеющего повышенную эффективную площадь внутренних поверхностей вентиляционного аппарата, то есть внутренних перемычек, которые выполнены одним целым с функциональными корпусами теплоконденсаторов из материалов с повышенной теплопроводностью и/или теплоемкостью.

Возможность применения технологических процессов при изготовлении (производстве) и последующем обслуживании/ремонте составного тормозного диска при эксплуатации с использованием доступных и распространенных, а также рентабельных технологий и технических средств, достигается благодаря разработанной конструкции предлагаемого устройства составного тормозного диска и составляющих его деталей, которая позволяет применять для изготовления составляющих деталей, например, литье, формование, штамповку, ковку, SLM-печать (селективное лазерное плавление от англ. Selective Laser Melting) металлами, последующую механическую обработку и сборочные операции, такие как стыковка, клепка, завинчивание, которые необходимо выполнить для соединения составных частей

(деталей) в единое целое устройство. При этом за счет составной (сборно-разборной) конструкции составного тормозного диска для его последующего обслуживания/ремонта или, например, в случае необходимости установки фрикционных кольцевых дисков с другими предпочтительными параметрами и свойствами выполнение работ по разборке-сборке предлагаемого составного тормозного диска может быть выполнено с использованием доступного и распространенного слесарного, в том числе ручного инструмента и оснастки.

При выполнении подготовки геометрических 3D-моделей разработанной конструкции составного тормозного диска к прочностным расчетам производилось задание материалов деталей, прилагались различные типы нагрузок и закрепления, создавались конечно-элементные сетки с последующим выполнением статических расчетов в российском программном продукте APM FEM для КОМПАС-3D v20.0.3.7. Варианты задания материалов, закреплений и нагрузок сведены в таблицу.

Конечно-элементная сетка деталей создавалась в виде 4-узловых тетраэдров, коэффициент сгущения поверхности 1,2, коэффициент разрежения в объеме 1,5, максимальная длина стороны элемента 5 мм. Так, для фрикционного кольцевого диска количество

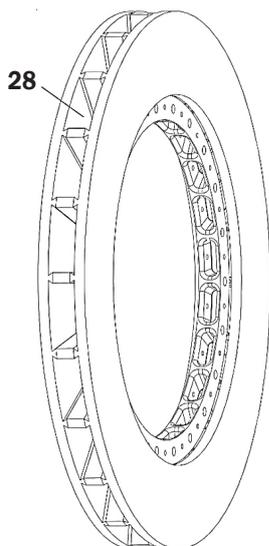


Рис. 11. Стыковка функционального каркаса с фрикционными кольцевыми дисками

Fig. 11. Coupling of the functional frame with the friction annular discs

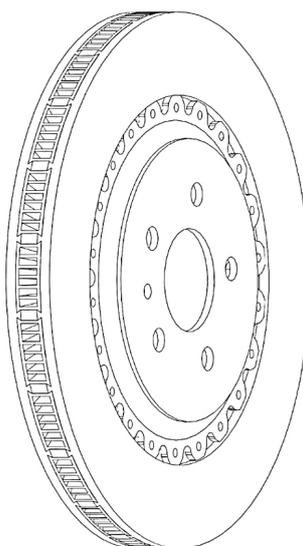


Рис. 12. Вид спереди на составной тормозной диск в сборе

Fig. 12. Front view of the composite brake disc assembly

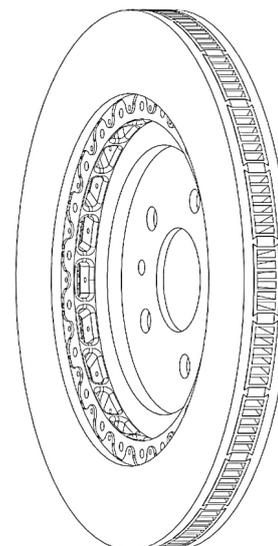


Рис. 13. Вид сзади на составной тормозной диск в сборе

Fig. 13. Rear view of the composite brake disc assembly

конечных элементов составило 74469, количество узлов – 21470 (рис. 14), для функционального каркаса количество конечных элементов составило 197519, количество узлов – 56940 (рис. 15), для функционального корпуса теплоконденсатора количество конечных элементов составило 34455, количество узлов – 10099 (рис. 16).

Известно [17, 18], что критерии прочности деталей машин основаны на общих положениях, которые имеют зависимость от условий деформирования материала. Так, материал изделия может находиться в одном из механических состояний: упругом, пластическом или в состоянии разрушения. Каждое из состояний тела (изделия) характеризуется

критерием прочности, которое устанавливает момент ее исчерпания, сопровождающийся разрушением тела с его разделением на части. Современные методы проектирования и анализа деталей машин позволяют смоделировать их поведение в реальной эксплуатации. Для оценки прочности разработанных конструкций применяются различные математические модели с проведением расчетов, например, методом конечных элементов, конечных разностей, конечных объемов. В таком российском программном продукте, как АРМ FEM для КОМПАС-3D v20.0.3.7 критерий текучести (момент наступления пластических деформаций) может быть определен по критериям Мезиса.

Варианты задания материалов, закреплений и нагрузок
 Options for setting materials, fastenings, and loads

Наименование детали	Материал	Закрепление	Вид нагрузки	Величина нагрузки
Фрикционный кольцевой диск	СЧ20	С учетом конструкции по средствам шипов	Давление со стороны воздействия тормозных колодок, МПа	10
			Крутящий момент в направлении действия тормозного момента, Нм	250
Функциональный каркас	Сталь 65Г	С учетом конструкции по средствам крепежных отверстий и упорных ребер	Давление со стороны воздействия тормозных колодок, МПа	10
			Крутящий момент в направлении действия тормозного момента, Нм	250
Функциональный корпус теплоконденсатора	Сталь 65Г	С учетом конструкции по средствам проушин и упорных площадок	Давление со стороны воздействия тормозных колодок, МПа	10
			Крутящий момент в направлении действия тормозного момента, Нм	250

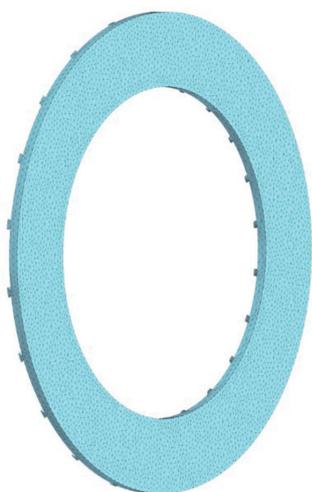


Рис. 14. Сгенерированная конечно-элементная сетка фрикционного кольцевого диска
Fig. 14. Generated finite element mesh of a frictional annular disk

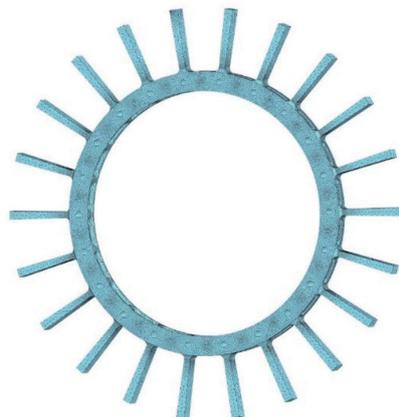


Рис. 15. Сгенерированная конечно-элементная сетка функционального каркаса
Fig. 15. Generated finite element mesh of the functional frame

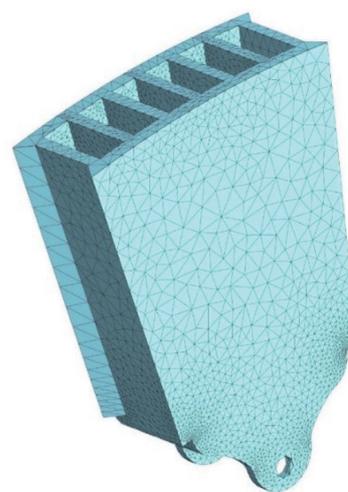


Рис. 16. Сгенерированная конечно-элементная сетка функционального корпуса теплоконденсатора
Fig. 16. Generated finite element mesh of the functional body of the heat condenser

Таким образом, при помощи указанного программного продукта было выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния деталей разработанной конструкции составного тормозного диска ме-

тодом конечных элементов. По результатам наложения действия статических нагрузок были получены численные значения и карты эквивалентных напряжений, перемещений и прочности (рис. 17–20).

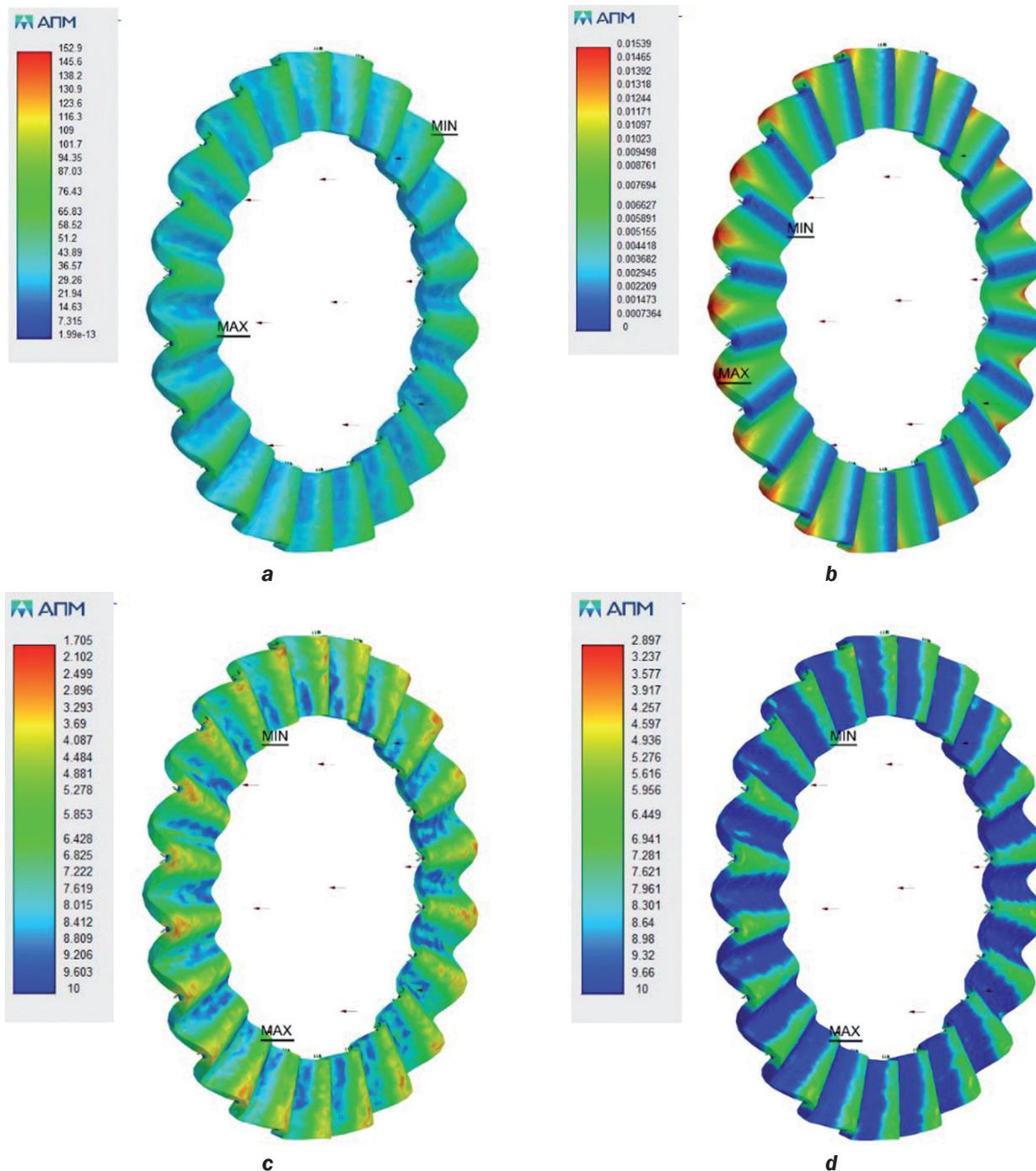


Рис. 17. Результаты статического расчета фрикционного кольцевого диска: а – эквивалентные напряжения по Мизесу не превышают 153 Н/мм²; б – суммарные линейные перемещения не превышают 0,016 мм; в – коэффициент запаса по усталостной прочности составляет 1,7 при двухмиллионных циклах нагружения; д – коэффициент запаса по пределу прочности составляет 2,89

Fig. 17. Results of static calculation of the frictional annular disk: а – equivalent Mises stresses do not exceed 153 N/mm²; б – total linear displacements do not exceed 0.016 mm; в – safety factor for fatigue strength is 1.7 at two million loading cycles; д – safety factor for ultimate strength is 2.89

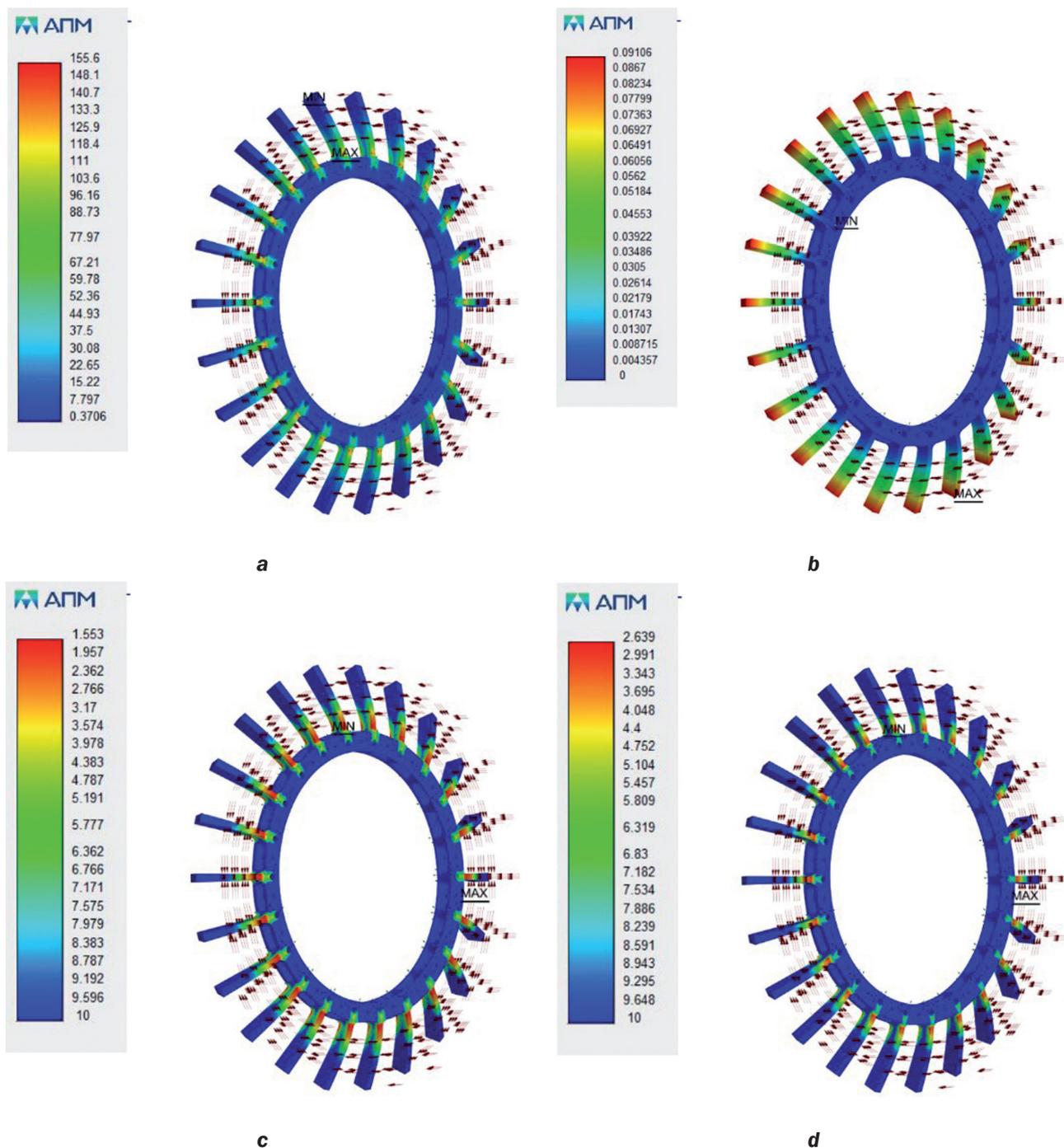


Рис. 18. Результаты статического расчета функционального каркаса: а – эквивалентные напряжения по Мизесу не превышают 156 Н/мм²; б – суммарные линейные перемещения не превышают 0,092 мм; в – коэффициент запаса по усталостной прочности составляет 1,55 при двухмиллионных циклах нагружения; д – коэффициент запаса по пределу прочности составляет 2,63

Fig. 18. Results of static calculation of the functional frame: а – equivalent stresses according to Mises do not exceed 156 N/mm²; б – total linear displacements do not exceed 0.092 mm; в – safety factor for fatigue strength is 1.55 at two million loading cycles; д – safety factor for ultimate strength is 2.63

Наиболее нагруженными элементами в деталях устройства составного тормозного диска оказались:

1) для фрикционного кольцевого диска – внутренние упорные площадки. Сжимаю-

щие напряжения, от воздействий прижатия колодками не превышают 153 Н/мм²;

2) функционального каркаса – упорные ребра. Напряжения в направлении действия тормозного момента не превышают 156 Н/мм²;

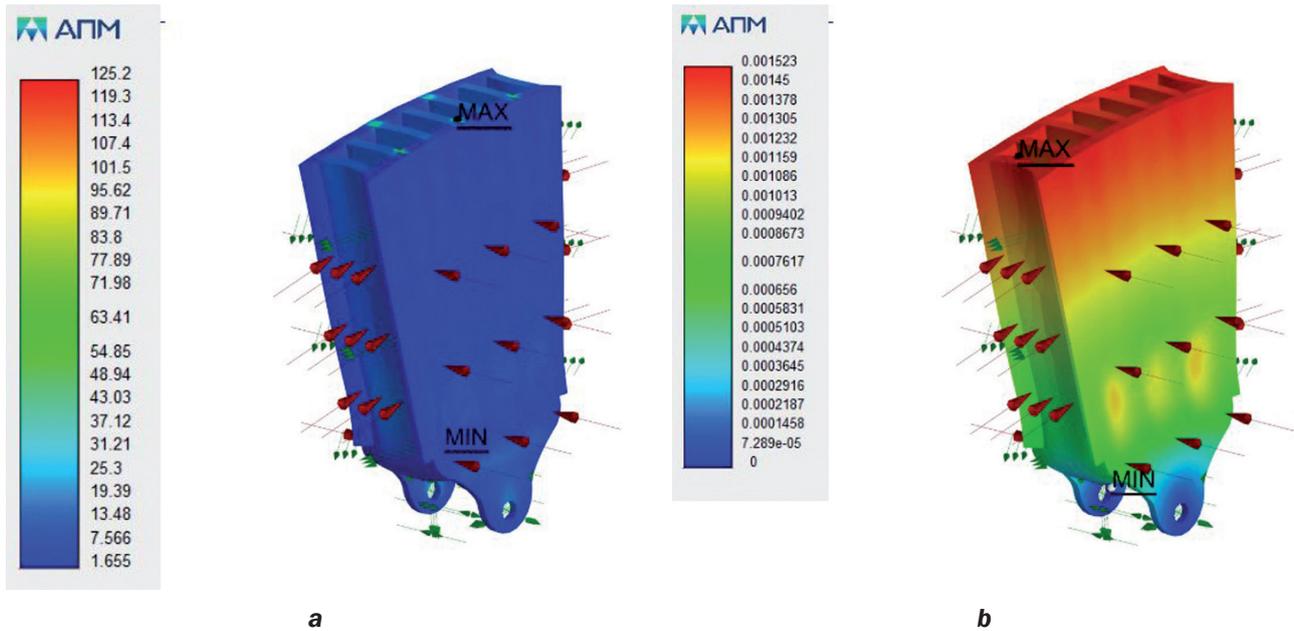


Рис. 19. Результаты статического расчета функционального корпуса теплоконденсатора: а – эквивалентные напряжения по Мизесу не превышают 126 Н/мм²; б – суммарные линейные перемещения не превышают 0,0016 мм

Fig. 19. Results of static calculation of the heat capacitor functional body: а – equivalent stresses according to Mises do not exceed 126 N/mm²; б – total linear displacements do not exceed 0.0016 mm

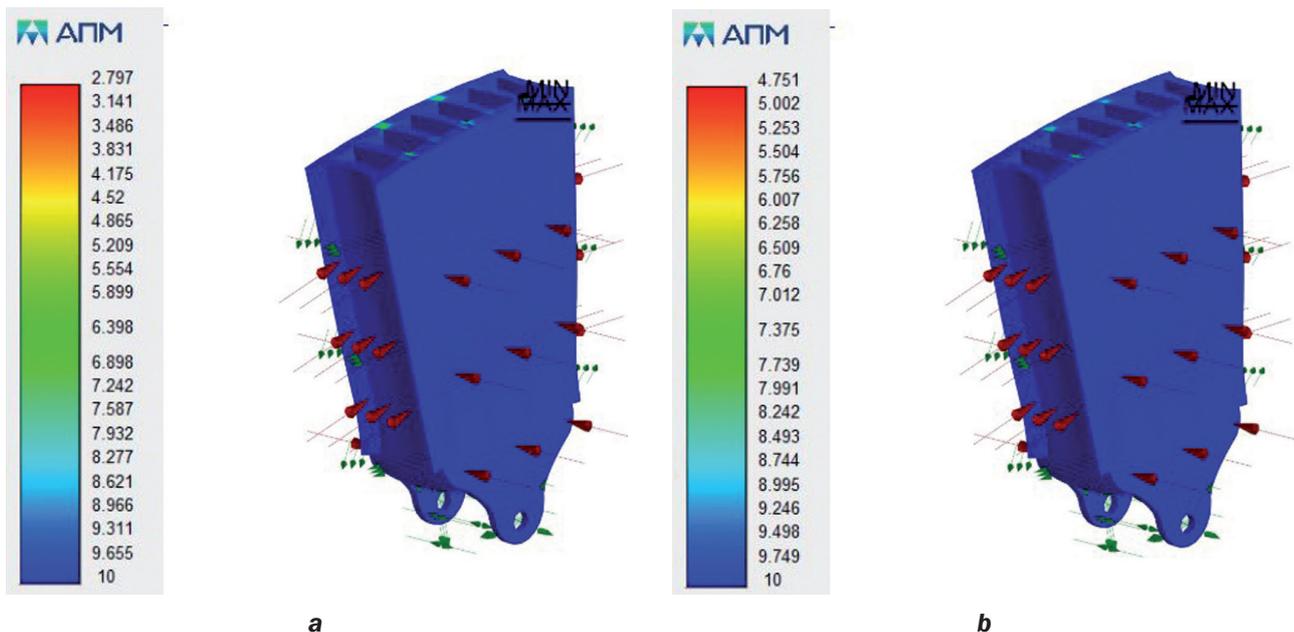


Рис. 20. Результаты статического расчета функционального корпуса теплоконденсатора: а – коэффициент запаса по усталостной прочности составляет 2,79 при двухмиллионных циклах нагружения; б – коэффициент запаса по пределу прочности составляет 4,75

Fig. 20. Results of static calculation of the heat condenser functional housing: а – safety factor for fatigue strength is 2.79 at two million loading cycles; б – safety factor for ultimate strength is 4.75

3) корпуса теплоконденсатора – малые проушины и внутренние перемычки. Напряжения в направлениях действия тормозного момента и сил прижатия колодками не превышают 46 и 126 Н/мм² соответственно.

Исходя из того, что целесообразность выполнения тех или иных технических разработок находится в зависимости с возможностью их последующей реализации (изготовления), в работе приводятся краткие сведения о воз-

можных технологиях изготовления деталей разработанной конструкции, а именно о технологиях литья металлов по выплавляемым моделям [19–22]. Так, в процессе исследований были изготовлены выплавляемые модели деталей, представленные на рис. 21, 22.

Для печати использовались филаменты PET-G, ABS, WAX-3D. В результате рассмотрения указанной технологии литья на этапе создания прототипов было установлено, что в качестве литейных заготовок (выплавляемых моделей) целесообразно использовать

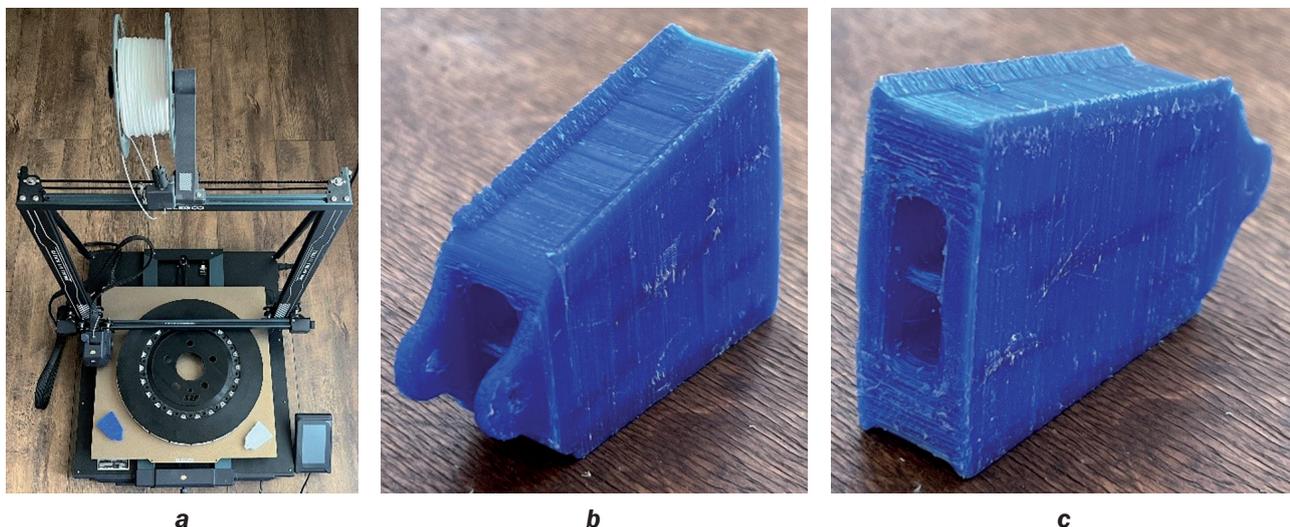


Рис. 21. Общий вид 3D-принтера Elegoo Neptune 3 Max, имеющего область печати 420x420x500 мм и температуру работы экструдера до 260°C. С помощью указанного 3D-принтера были изготовлены выплавляемые модели разработанной конструкции составного тормозного диска, в том числе из воскоподобного филамента: а – 3D-принтер Elegoo Neptune 3 Max; б – вид в перспективе снизу на выплавляемую модель функционального корпуса теплоконденсатора, изготовленную с помощью 3D-принтера из воскоподобного филамента; с – вид в перспективе сверху на выплавляемую модель функционального корпуса теплоконденсатора, изготовленную с помощью 3D-принтера из воскоподобного филамента

Fig. 21. General view of the Elegoo Neptune 3 Max 3D printer with a print area of 420x420x500 mm and extruder operating temperature of up to 260°C. Using the specified 3D printer investment models of the developed design of a composite brake disc were made including those made of wax-like filament: a – Elegoo Neptune 3 Max 3D printer; b – bottom perspective view of the investment casting model of the heat condenser functional body made of wax-like filament using a 3D printer; c – top perspective view of the investment casting model of the heat condenser functional body made of wax-like filament using a 3D printer



Рис. 22. Общий вид 3D-моделей разработанной конструкции составного тормозного диска: а – в разобранном состоянии; б – в собранном состоянии

Fig. 22. General view of 3D models of the developed design of composite brake disc: a – disassembled; b – assembled

воскоподобные материалы. Воскоподобный филамент поставляется в виде прутка толщиной 1,75 мм и используется для печати на 3D-принтерах по технологии FDM (моделирование методом послойного наплавления от англ. Fused Deposition Modeling). Модели, напечатанные воском, могут быть подвержены постобработке как механически (абразивным инструментом и оснасткой), термически (в пламени горелки), так и химически («полировка» растворителем для сглаживания слоев и придания глянца). Значимым отличием воскоподобных филаментов является их крайне низкая зольность (менее 0,01%), низкое газовыделение при выжигании, усадка не более 0,8% и ценовая доступность, что в совокупности является важным фактором для мелкосерийного прототипирования. Важной особенностью использования воскоподобных филаментов является их повышенная пластичность, вследствие чего рекомендуется использовать 3D-принтеры с системой «Директ» с «цепкими» подающими шестернями, во избежание замятия филамента в системе подачи к соплу.

По результатам опытной печати, выполненной на 3D-принтере Elegoo Neptune 3 Max, можно дать следующие рекомендации по настройкам и режимам печати: в настройках слайсера необходимо задать команду G-Code: «M302 S80». Температура сопла при печати 120 °С. Для повышения адгезии модели к печатному столу на первом слое печати температура печатного стола 105 °С, далее не более 20 °С. Скорость печати 25–35 мм/с, обдув выключен, исключить перепады температур и сквозняки в помещении (желательно использовать термокамеру для 3D-принтера), высота печатаемого слоя 0,2 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезируя и обобщая результаты выполненной работы, представляется возможным указать следующие выводы:

1) современные методы проектирования и прочностного анализа, несмотря на их достаточно высокую ресурсоемкость (необходимость мощной вычислительной техники и временные затраты), доказали не только целесообразность их применения, но и необходимость в них, поскольку становится возможным произвести моделирование

различных конфигураций устройств, выбрать оптимальные конструктивные решения (в том числе выбор материалов для изготовления) и произвести прочностной анализ;

2) технологии 3D-печати позволяют в достаточно короткие сроки изготовить модель прототипа с минимальными материальными и трудовыми затратами, что в свою очередь позволяет произвести оптимизацию конструкции путем установки ее элементов на предполагаемые штатные места установки в ТС. При этом становится возможным выполнить функциональную проверку предполагаемой технологии монтажа/демонтажа изделия и произвести их анализ, например, на предмет трудозатрат времени и необходимого оборудования для их последующей реальной эксплуатации;

3) предложенное устройство составного тормозного диска демонстрирует состоятельность предложенного метода расчленения объекта на составляющие, используя критерии функционального назначения элементов конструкции устройства, модернизацию которого требуется выполнить;

4) по результатам статического прочностного анализа деталей установлено, что для повышения гарантированного запаса прочности элементов разрабатываемой конструкции необходимо увеличить сечение упорных ребер функционального каркаса, модернизировать конструкцию функциональных корпусов теплоконденсаторов и шипов на фрикционных кольцевых дисках. Подбор дополнительных (альтернативных) материалов, одновременно обладающих повышенными прочностными характеристиками, пониженной массой и высокой теплопроводностью, позволит снизить инерционные массы изделий и неподрессоренные массы ТС, повысить гарантированный запас прочности и улучшить отведение тепла от пар трения дисково-колодочных тормозных устройств, что в совокупности будет способствовать повышению эффективности торможения, снижая тормозной путь и время остановки ТС;

5) после указанных выше модернизаций конструкции необходимо выполнить моделирование физико-механических процессов трения, нагрева и охлаждения, возникающих в составном тормозном диске (в сборе) при торможении ТС, и дать им оценку. Так, в качестве методики теплового испытания тор-

мозного диска методом конечных элементов могут быть приняты правила ЕЭК ООН N 13 (испытания «Типа О» и испытания «Типа I»), которые устанавливают требования к режимам испытаний тормозных устройств ТС;

б) предложенные рекомендации по изготовлению выплавляемых моделей из

воскоподобных филаментов по технологии FDM 3D-печати, необходимые для создания литейных форм, показали свою состоятельность и могут применяться в рамках настоящего исследования для изготовления деталей с формами сложной конфигурации.

Список источников

1. Петрик А.А., Вольченко Н.А., Пургал П.Ю., Вольченко Д.А. Фрикционные узлы: монография. Краснодар: КубГТУ, 2003. Т. 2. 220 с. EDN: QNANGL.
2. Вольченко Н.А., Поляков П.А., Скрыпник В.С., Витвицкий В.С. Энергонагруженность трибосопряжений дисково-колодочных тормозов транспортных средств // Евразийский Союз Ученых. 2018. № 3-2. С. 51–59. EDN: XNFTED.
3. Скляренко Е.Ф. Повышение энергоемкости и эффективности дисково-колодочных тормозных устройств транспортных средств // Инновационный потенциал развития науки в современном мире: достижения и инновации: сб. науч. статей по матер. XII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 28 февраля 2023 г.). Уфа, 2023. С. 91–111.
4. Sainath A., Dehadray P.M., Bharath P., Rao L.B. The thermal and stress analysis of disc brake // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2021. Vol. 1128. Iss. 1. P. 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1128/1/012015>.
5. Mrausi S., Trimble J., Olabanji O., Tlhabadira I., Daniyan I.A. Investigating the mechanical properties of automotive brake disc and pad developed from locally sourced materials // 14th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies. 2023. P. 197–203. <https://doi.org/10.1109/ICMIMT59138.2023.10200088>.
6. Barik N., Khadari S.A.R. Analysis of disc brake // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2021. Vol. 1123. P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1123/1/012004>.
7. Sau S.K., Pulinat K.G., Moss P.N., Ranjeet P., Prabu S.S. A comparative study on the thermal and dynamic analysis of a disc brake using Ansys // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 65. Part 8. P. 3714–3723. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.318>.
8. López-Flores, Jennifer-Guadalupe, Cordero-Guridi, De Jesús J., Ovando-Cuevas, Romeo E., et al. Thermal-structural numerical analysis of the brake and disc system of a Formula SAE 2024 type vehicle // Journal Mathematical and Quantitative Methods. 2024. Vol. 8. Iss. 1-13. P. e30814113. <https://doi.org/10.35429/JMQM.2024.8.14.3.13>.
9. Пат. № 2668785, Российская Федерация, С1, F16D 65/12. Вентилируемый тормозной диск / Д. Маронати, Л. Оберти, Н. Ронки; заявитель и патентообладатель С.П.А. Френи Брембо. Заявл. 16.12.2014; опубл. 02.10.2018. Бюл. № 28.
10. Пат. № 2556269, Российская Федерация, С2, F16D 65/12, F16D 65/847. Ротор тормозного диска с внутренней вентиляцией / Я. Виллемин, К. Виттке, А. Клингелхедер, А. Пипилис; заявитель, патентообладатель Брембо СГЛ Карбон Керамик Брэйкс ГМБХ. Заявл. 23.12.2011; опубл. 10.07.2015. Бюл. № 19.
11. Пат. № 2628419, Российская Федерация, С2, F16D65/12. Сборный тормозной диск вала / С. Вурс, А. Мелан; заявитель, патентообладатель Фэйвели Транспорт Виттен ГМБХ. Заявл. 13.11.2012; опубл. 16.08.2017. Бюл. № 23.
12. Федотов Е.С., Литвинов А.Е., Стародуб М.В. Причины возникновения повреждений тормозных дисков (Часть 1) // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2020. № 6. С. 56–61. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2020-6-56-61>. EDN: UXEEON.
13. Федотов Е.С., Стародуб М.В., Кузнецов В.А. Причины возникновения повреждений тормозных дисков (Часть 2) // Фундаментальные основы механики. 2021. № 7. С. 39–44. <https://doi.org/10.26160/2542-0127-2021-7-39-44>. EDN: OGBFYR.
14. Федотов Е.С., Литвинов А.Е., Стародуб М.В. Причины возникновения повреждений тормозных колодок дисково-колодочных тормозных механизмов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2020. № 9. С. 18–23. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2020-9-18-23>. EDN: FDKDVA.
15. Кошевой О.С., Мамулян Н.С., Радченко А.С. Триз – технология инноваций // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2013. № 1. С. 65–67. EDN: RPZDBN.
16. Колоско Д.Н., Хаустович И.С., Щербаченя В.А. Применение критерия Мизеса в прочностных расчетах систем инженерного анализа // Актуальные проблемы и перспективы развития сельских территорий и кадрового обеспечения АПК: сб. науч. статей III Междунар. науч.-практ. конф. (г. Минск, 7–8 июня 2023 г.). Минск: БГАТУ, 2023. С. 324–328.
17. Губенко А.С., Темпель Ю.А., Стариков А.И., Теплоухов О.Ю. Оптимизация прочностных и массовых характеристик детали с использованием алгоритмов порождающего проектирования // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. № 7. С. 358–362. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-7-358-359>.

18. Красикова Е.С. Проектирование 3D-моделей для изготовления изделий методом литья по выплавляемым моделям // Высокие технологии в машиностроении: матер. XX Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Самара, 9–10 ноября 2023 г.). Самара: СамГТУ, 2023. С. 31–34. EDN: ISRYKI.
19. Пат. № 2772531, Российская Федерация, С1, В22С 9/04, В22С 7/02. Способ удаления выжигаемой полимерной модели из керамической формы в литье по выплавляемым моделям / А.В. Шилов; заявитель Акционерное общество «ОДК-Авиадвигатель». № 2021138594. Заявл. 24.12.2021; опубл. 23.05.2022. EDN: MOSJRS.
20. Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Одинокое В.И., Чернышова Д.В., Евстигнеева А.А., Иванкова Е.П. О трещиностойкости керамической оболочковой формы по выплавляемым моделям при затвердевании в ней шарообразной стальной отливки // Литейное производство. 2022. № 9. С. 17–21. EDN: BSLLOC.
21. Ткаченко С.С., Емельянов В.О., Мартынов К.В. Современная технология литья по выплавляемым моделям для производства художественных отливок // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 49–52. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-49-52>. EDN: KETJWM.
22. Сакович Н.Е., Никитин А.М., Шилин А.С., Рожнова В.С., Прудников С.А. Дисково-колодочные тормоза автотранспортных средств // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 6. С. 55–60. <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2021-88-6-55-60>. EDN: FZPNKF.

References

1. Petrik A.A., Vol'chenko N.A., Purgal P.Yu., Vol'chenko D.A. *Friction units*. Krasnodar: Kuban State Technological University; 2003, vol. 2, 220 p. (In Russ). EDN: QNANGL.
2. Volchenko N.A., Polyakov P.A., Skrypnik V.S., Vitvickij V.S. Energy loading of tribounits of vehicle disc-pad brakes. *Eurasian Union of Scientists*. 2018;3-2:51-59. (In Russ). EDN: XNFTED.
3. Sklyarenko E.F. *Increasing energy intensity and efficiency of vehicle disc-pad brake devices*. In: *Innovacionnyj potencial razvitiya nauki v sovremennom mire: dostizheniya i innovacii: sbornik nauchnyh statej po materialam XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii = Innovative potential for science development in the modern world: achievements and innovations: collection of scientific articles on the materials of the 12th International scientific and practical conference*. 28 February 2023, Ufa. Ufa; 2023, p. 91-111. (In Russ).
4. Sainath A., Dehadray P.M., Bharath P., Rao L.B. The thermal and stress analysis of disc brake. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021;1128(1):012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1128/1/012015>.
5. Mrausi S., Trimble J., Olabanji O., Tlhabadira I., Daniyan I.A. Investigating the mechanical properties of automotive brake disc and pad developed from locally sourced materials. In: *14th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies*. 2023;197-203. <https://doi.org/10.1109/ICMIMT59138.2023.10200088>.
6. Barik N., Khadari S.A.R. Analysis of disc brake. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021;1123:012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1123/1/012004>.
7. Sau S.K., Pulinat K.G., Moss P.N., Ranjeet P., Prabu S.S. A comparative study on the thermal and dynamic analysis of a disc brake using Ansys. *Materials Today: Proceedings*. 2022;65(8):3714-3723. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.318>.
8. López-Flores, Jennifer-Guadalupe, Cordero-Guridi, De Jesús J., Ovando-Cuevas, Romeo E., et al. Thermal-structural numerical analysis of the brake and disc system of a Formula SAE 2024 type vehicle. *Journal Mathematical and Quantitative Methods*. 2024;8(1-13):e30814113. <https://doi.org/10.35429/JMQM.2024.8.14.3.13>.
9. Maronati D., Oberti L., Ronki N. *Ventilated brake disc*. Patent RF, no. 2668785; 2018. (In Russ.).
10. Villemín Ya., Vittke K., Klingel'hefer A., Pipilis A. *Brake disc rotor with internal ventilation*. Patent RF, no. 2556269; 2015. (In Russ.).
11. Vurs S., Melan A. *Assembled shaft brake disc*. Patent RF, no. 2628419; 2017. (In Russ.).
12. Fedotov E.S., Litvinov A.E., Starodub M.V. Causes of damage to brake discs (Part 1). *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2020;6:56-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2020-6-56-61>. EDN: UXEEON.
13. Fedotov E.S., Starodub M.V., Kuznetsov V.A. Causes of damage to the brake discs (Part 2). *Fundamental'nye osnovy mekhaniki*. 2021;7:39-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2542-0127-2021-7-39-44>. EDN: OGBFYP.
14. Fedotov E.S., Litvinov A.E., Starodub M.V. Causes of damage to brake pads of disc-shoe brakes. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2020;9:18-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2020-9-18-23>. EDN: FDKDVA.
15. Koshevoy O.S., Mamulyan N.S., Radchenko A.S. Triz – technology innovation. *Models, systems, networks in economics, technology, nature, and society*. 2013;1:65-67. (In Russ.). EDN: RPZDBN.
16. Kolosko D.N., Khaustovich I.S., Shcherbachyena V.A. Application of the Mises criterion in strength calculations of engineering analysis systems. In: *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya sel'skih terri-torij i kadrovogo obespecheniya APK: sbornik nauchnyh statej III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii = Actual problems and development prospects of rural areas and personnel provision of agro-industrial complex: collected scientific articles of the 3d International scientific and practical conference*. 7–8 June 2023, Minsk. Minsk: Belarussian State Agrarian Technical University; 2023, p. 324-328. (In Russ.).
17. Gubenko A.S., Tempel Yu.A., Starikov A.I., Teploukhov O.Yu. Optimization of strength and mass characteristics of a part using generic design algorithms. In: *Proceedings of Tula State University. Technical Science*. 2023;7:358-362. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-7-358-359>.

18. Krasikova E.S. 3D model designing for product manufacturing using investment casting. In: *Vysokie tekhnologii v mashinostroenii: materialy XX Vserossijskoj nauch-no-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = High technologies in mechanical engineering: Proceedings of 20th All-Russian scientific and technical conference with international participation*. 9–10 November 2023, Samara. Samara: Samara State Technical University; 2023, p. 31-34. (In Russ.). EDN: ISRYKI.
19. Shilov A.V. *Method for removing a burnt-out polymer model from a ceramic mold in investment casting*. Patent RF, no. 2772531; 2022. (In Russ.). EDN: MOSJRS.
20. Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Odinokov V.I., Chernyshova D.V., Evstigneeva A.A., Ivankova E.P. On the crack resistance of a ceramic shell mold according to the smelted models when a spherical steel casting solidifies in IT. *Foundry. Technologies and Equipment*. 2022;9:17-21. (In Russ.). EDN: BSLLOC.
21. Tkachenko S.S., Emelyanov V.O., Martynov K.V. Modern technology of investment casting for the production of artistic castings. *Foundry Production and Metallurgy*. 2021;1:49-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-49-52>. EDN: KETJWM.
22. Sakovich N.Ye., Nikitin A.M., Shilin A.S., Rozhnova V.S., Prudnikov S.A. Disc-pad brakes of motor vehicles. *Bulletin of the Bryansk State Agrarian University*. 2021;6:55-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2021-88-6-55-60>. EDN: FZPNKF.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Склярченко Евгений Федорович,
аспирант,
Кубанский государственный
технологический университет,
350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия
✉ sklyarfedorovich97@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-0119-9875>

Evgeniy F. Sklyarenko,
Postgraduate Student,
Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya St., Krasnodar 350072, Russia
✉ sklyarfedorovich97@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-0119-9875>

Шевцов Юрий Дмитриевич,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры транспортных процессов
и технологических комплексов,
Кубанский государственный
технологический университет,
350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия
✉ shud48@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-1742-1135>

Yuriy D. Shevtsov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Transport
Processes and Technological Complexes,
Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya St., Krasnodar 350072, Russia
✉ shud48@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-1742-1135>

Заявленный вклад авторов

Authors' contribution

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Information about the article

Статья поступила в редакцию 13.03.2025 г.; одобрена после рецензирования 30.04.2025 г.; принята к публикации 02.06.2025 г.

The article was submitted 13.03.2025; approved after reviewing 30.04.2025; accepted for publication 02.06.2025.