

## ВЛИЯНИЕ ПЕРЕГРЕВА ДИСКОВОГО-КОЛОДНЫХ ТОРМОЗНЫХ МЕХАНИЗМОВ НА НАДЕЖНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТОРМОЖЕНИЯ

*Федотов Е.С., Харьков С.В., Москаленко М.Б.*

*Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар*

**Ключевые слова:** дисковые тормоза; горячие точки; термическая тряска; термическое растрескивание.

**Аннотация.** В современном автомобилестроении на сегодняшний день получили широкое распространение дисково-колодочные тормоза. Они преобразуют вращательное движение колеса автомобиля в тепловую энергию, используя трение между тормозным диском и колодками, для замедления скорости транспортного средства. Зачастую, при возникновении аварийных ситуаций прибегают к экстренному торможению, в результате которого происходит сильный нагрев тормозного диска и колодок. На различных участках поверхности диска происходит локальный нагрев, который может привести к пластической деформации. Из-за перегрева, образования горячих точек и термических колебаний, происходящих на диске, происходит разрушение диска в виде трещин на поверхности диска, что в последствии приводит к снижению эффективности торможения. В статье рассматриваются выборочные вопросы, касающиеся отказа тормозов из-за перегрева, и методы повышения эффективности.

## THE EFFECT OF OVERHEATING OF DISK-DECK BRAKE MECHANISMS ON THE RELIABILITY AND EFFICIENCY OF BRAKING

*Fedotov E.S., Kharkov S.V., Moskalenko M.B.*

*Kuban State Technological University, Krasnodar*

**Keywords:** disc brakes; hot Spots; thermal shaking; thermal cracking.

**Abstract.** In modern automotive industry today, disc-pad brakes are widespread. They convert the rotational movement of a car's wheel into thermal energy, using friction between the brake disc and the pads to slow the speed of the vehicle. Often, in case of emergency, they resort to emergency braking, as a result of which there is a strong heating of the brake disc and pads. Local heating occurs in various parts of the disk surface, which can lead to plastic deformation. Due to overheating, the formation of hot spots and thermal vibrations occurring on the disk, the disk is destroyed in the form of cracks on the surface of the disk, which subsequently leads to a decrease in braking efficiency. This article discusses selective issues related to brake failure due to overheating, and methods of increasing efficiency.

### Введение

Тормозная система является одной из наиболее важных при проектировании и производстве любого транспортного средства. Функция тормозной системы заключается в замедлении или остановке движения транспортного средства. Тормозная система напрямую связана с безопасностью движения транспортного средства. Как правило, в автомобилестроении используются два типа тормозных систем: дисковые тормоза и барабанные тормоза. Основной принцип работы тормозной системы заключается в преобразовании кинетической энергии транспортного средства в тепловую энергию. Чтобы остановить транспортное средство, трение создается между двумя механическими компонентами, что приводит к выделению тепла между

этими двумя компонентами и уменьшению кинетической энергии транспортного средства, т. е. уменьшает скорость транспортного средства.

### Тепловыделение в дисковом тормозе

Дисковый тормоз – одна из новейших технологий в автомобильной промышленности. Дисковый тормоз состоит из четырех основных частей, таких как тормозной диск, суппорт, колодки и главный цилиндр (рис. 1).

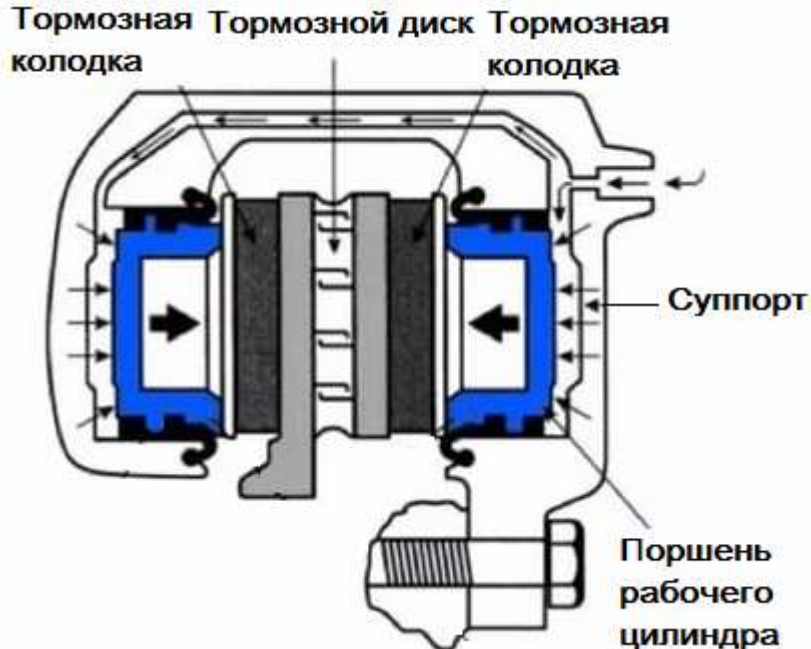


Рис. 1. Конструкция дискового тормоза с фиксированной скобой

Когда тормозные колодки и тормозной диск соприкасаются друг с другом, между ними возникает трение, что приводит к выделению тепла. При нормальном торможении величина давления, создаваемого в поршне суппорта, очень мала, поэтому количество выделяемого тепла незначительно. Таким образом, работа дискового тормоза не сильно нагружена, и нет никакого существенного износа диска и тормозной колодки. В случае возникновения экстренного торможения, нагрузка на тормозные механизмы резко возрастает. Это приводит к выделению большого количества тепла между диском и колодками. Возрастание температуры негативно влияет на эффективность работы тормозной системы [1]. Таким образом, рассеивание выделяющегося тепла имеет важное значение для стабильной работы тормозной системы [2].

Тепло рассеивается с поверхности в трех режимах теплопередачи, таких как конвекция, теплопроводность, проводимость и излучение (рис. 2). В случае дискового тормоза теплопроводность происходит от диска к ступице, а также через колодки. Происходящий нагрев полностью зависит от теплопроводности материала и площади, нормальной к тепловому потоку. Поскольку теплопроводность различна для разных материалов, скорость теплопередачи зависит от материала тормозного диска [2].

В конвекции тепло передается между твердой поверхностью и воздухом, через теплопроводность, а затем тепло рассеивается в окружающую среду путем конвекции [3]. В случае дискового тормоза воздух, соприкасающийся с тормозным диском, рассеивает тепло и снижает температуру диска. При

движении автомобиля вблизи тормозного диска возникает турбулентность. Что увеличивает скорость теплопередачи. Мощность теплопередачи зависит от коэффициента конвекции и площади диска. Коэффициент конвекции различен для различных материалов.

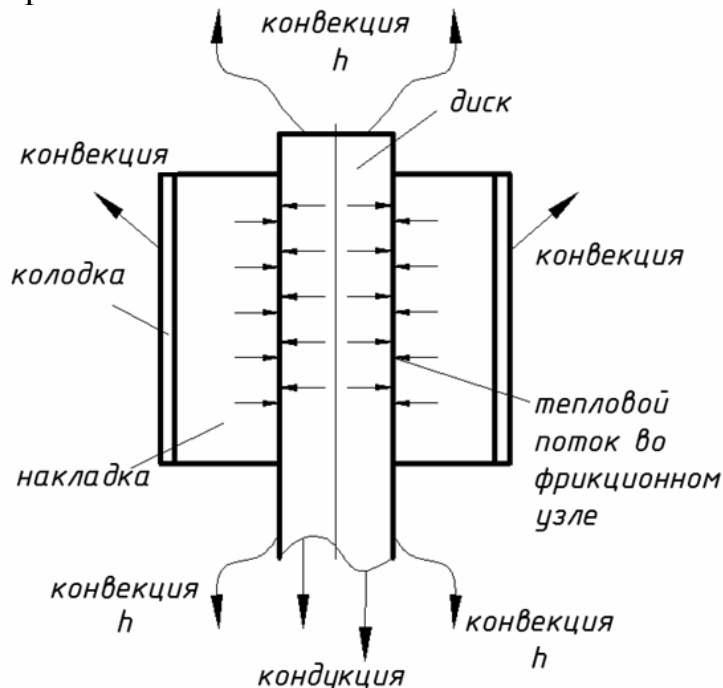


Рис. 2. Отвод тепла от пары трения диск-колодка

### Образование точек перегрева на тормозном диске

Развитие автомобилестроения привело к увеличению скоростного режима, повышению мощности и веса автомобиля. Для обеспечения безопасности передвижения тормозная система подверглась серьезным изменениям. При нормальном тормозном усилии диск и колодки взаимодействуют при температуре до  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , давлении до 5 МПа и скорости трения до 22 м/с. В некоторых условиях, например при затяжном торможении или экстренном торможении, перегрев приводит к образованию горячих точек, что увеличивает риск растрескивания и разрушения тормозного диска [4]. Термический анализ может выявить одну заметную причину наличия горячих точек на тормозном диске через равные промежутки времени.

Тепловизионные измерения показывают, что тепловыделение ограничено узкими полосами, представляющими собой наличие локализованного распределения давления (рис. 3).

Температура, развиваемая вблизи горячих точек, слишком высока и составляет около  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  [5]. Быстрые колебания температуры от  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , приводят к постоянному фазовому переходу от перлита к мартенситу. Это также может привести к искажению и изменению толщины диска из-за того, что объем мартенсита выше, чем перлита. Вблизи горячих точек из-за высокой температуры окружающие напряжения, также известные как кольцевые напряжения, которые развиваются в виде полос. Их можно объяснить образованием и распространением трещин на тормозном диске. Такая неисправность возникает в серийных автомобилях. По мере изменения формы исходных компонентов и изменения их толщины в диске нормальная сила может изменяться. Таким

образом, отклонения в нормальном усилии вызваны изменением толщины диска, что приводит к изменению тормозной силы, а также изменению тормозного момента вместе с развитием тепловых колебаний [6].



Рис. 3. Образование горячих точек на тормозном диске

### **Причины возникновения деформации диска**

Поскольку толщина тормозного диска изменяется, это приводит к плохому контакту между диском и колодками, что вызывает изменение нормальных сил между ними. Следовательно, частота прямо пропорциональна скорости вращения колеса, а следовательно, и скорости движения транспортного средства вперед. Таким образом, обычно связывают частоту колебаний с частотой вращения колеса. Вибрация при выделении тепла имеет частоты, как правило, от 6 до 20 циклов на оборот [4]. Низкочастотные вибрации передаются от дискового тормоза к кузову в виде колебаний кузова и рулевого управления. Поскольку выделяются низкие частоты, они практически ощущаются, а не слышимы. На этапе проектирования транспортного средства важно подходить к ситуации, когда тормоз и другие смежные компоненты не имеют критической собственной частоты или гармоника, соответствующей рабочим частотам, генерируемым изменениям толщины диска или нестабильной тепловой деформацией. Вибрации также классифицируются как горячие вибрации и холодные вибрации. Некоторыми из распространенных причин их появления являются:

Износ тормозов, иногда называемый "холодной эрозией", связан с изменением толщины диска и может привести к "холодной вибрации". Тормозные диски неравномерно изнашиваются, поскольку колодки в слегка касаются тормозного диска в некоторых его частях, что и приводит к неравномерному износу. Износ тормозного механизма может быть вызван выбегом диска и может быть уменьшен путем увеличения расстояния, на которое возвращается поршень суппорта после торможения.

Термическая же деформация диска состоит из следующих составляющих:

- волнистость или деформация диска;
- неравномерное тепловое расширение;
- изменение фазы материала;
- наслоение нагретого материала на диск.

С увеличением радиуса трения теплота и скорость трения возрастают, что может в последствии привести к образованию горячих точек.

Вибрации при торможении сильно зависят от условий применения тормоза, как в краткосрочном, так и в долгосрочном масштабе. Существуют три временных отрезка:

- время вращения колеса;
- время торможения или время между двумя торможениями;
- срок службы тормозных элементов.

Одним из показателей, влияющих на эффективность торможения является неровность фрикционной пленки. Этот слой толщиной в несколько микрометров на поверхностях тормозного диска и колодки. Железистые частицы (продукты износа), образующиеся при износе чугунного диска, окисляются кислородом и осаждаются в виде серо-черного слоя на тормозной поверхности диска. Этот слой, вместе с соответствующими слоями на колодках, определяют фрикционные возможности тормозного механизма. В случае, когда нагретые тормозные диски зажаты тормозными колодками на неподвижном транспортном средстве, колодки могут прилипнуть к тормозному диску. При очень высоких температурах, порой превышающих 500 °С, расплавленный фрикционный материал может быть сожжен об диск [7,8].

Изменение трения со скоростью приводит к вызванным торможением вибрациям, в том числе к разрушению тормозов. Для достижения заданного тормозного момента материалу колодки с более низким коэффициентом трения требуется более высокий уровень тормозного давления. Это вызывает более равномерно распределенные поля давления и температуры на контактной поверхности. Аналогично, уменьшение уровня коэффициента трения уменьшает проблемы с разрушением и в то же время уменьшает вероятность возникновения трещин. На соотношение между изменением тормозного момента и изменением тормозного давления влияет абсолютный уровень трения. Это объясняется тем, что изменение тормозного момента пропорционально коэффициенту трения, в то время как изменение тормозного давления не зависит от трения.

На термическую стабильность формы диска влияет качество материала и термическая обработка перед механической обработкой, а также конструкция тормозного диска. Выбор высокоуглеродистых дисковых материалов и проведение термической обработки для снятия напряжений в процессе производства позволяет свести к минимуму проблемы термической нестабильности.

Вентилируемые тормозные диски широко используются для снижения веса и дополнительной конвективной теплоотдачи. Тем не менее, они могут способствовать вибрациям, вызвав неравномерное температурное поле вокруг диска. Поскольку минусом материала является низкая теплоемкость, его можно использовать только для относительно легких легковых автомобилей, скажем, ниже 1000 кг. Введение алюминиевых композитных дисков или чистого алюминия, покрытого композитным слоем, вероятно, увеличит проблемы с вибрациями из-за высокого коэффициента теплового расширения и низкой теплоемкости. Поэтому высокая теплопроводность оказывает относительно небольшое влияние на горячие точки. Однако есть композитные материалы, которые могут уменьшать вибрации, например керамические материалы. Вибрации не возникают из-за низкого коэффициента теплового расширения и

низкого износа. Кроме того, низкий модуль упругости способствует равномерному контакту и уменьшению тепловых и горячих точек. Превосходная стойкость материала к термическим изменениям делает его пригодным для дисковых тормозов тяжелых транспортных средств, где обычно появление трещин является проблемой. Однако данный материал не находит широкого применения в промышленности из-за своей высокой стоимости.

Дисковые тормоза подвергаются большим тепловым нагрузкам при нормальном торможении и очень высоким тепловым нагрузкам при резком торможении. Даже в серийных автомобилях температура тормозных дисков достигает  $800^{\circ}\text{C}$ . Последствиями высокотемпературных нагрузок являются: поверхностные трещины, возникающие из-за термических напряжений; и/или пластическая деформация в тормозном диске. При отсутствии теплового удара обнаружено, что относительно небольшое количество циклов высокого торможения приводит к образованию макроскопических трещин, проходящих по толщине тормозного диска и по его радиусу (рис. 4).



Рис. 4. Термическое растрескивание в дисковых тормозах

### **Вывод**

Дисковые тормоза используются для остановки транспортных средств или для снижения скорости движения транспортного средства. В этом процессе при торможении тормозные колодки соприкасаются с диском так, что создается трение и выделяется тепло.

Чтобы достичь эффективного торможения и избежать выхода из строя диска, требуется надлежащее рассеивание тепла. Тепло может рассеиваться в форме проводимости, конвекции или излучения. Если тепло не рассеивается в достаточном количестве, то это приводит к образованию горячих точек и тепловому толчку, что в конечном итоге приводит к образованию трещин.

Чтобы уменьшить это отрицательное влияние, необходимо выбрать подходящий материал для изготовления диска. Правильная вентиляция, если она предусмотрена в диске, может увеличить поток воздуха и улучшить скорость конвекции [9-11]. Таким образом, рассеивание тепла может происходить гораздо быстрее.

### Список литературы

1. Федотов Е.С. Проблемы современных дисковых тормозов автомобилей и пути их решения / Е.С. Федотов, П.А. Поляков, Р.С. Тагиев, С.В. Харьков, К.Г. Кузнецов // Сборник по материалам международной научно-практической конференции «Механика, оборудование, материалы и технологии». Краснодар, 2019. С. 779-783.
2. Вольченко Н.А. Исследование конструкции системы охлаждения фрикционных узлов тормозных механизмов / Н.А. Вольченко, П.А. Поляков, Е.А. Полякова, Е.С. Федотов // Сборник по материалам международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» «Механика, оборудование, материалы и технологии». Краснодар, 2018. С. 147-160.
3. Федотов Е.С. Изучение процесса теплопередачи в паре трения дисково-колодочного тормоза / Е.С. Федотов, П.А. Поляков, Р.С. Тагиев, Н.Е. Сукач, Н.Е. Слесарев // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО "Кубанский государственный технологический университет": «Механика, оборудование, материалы и технологии». – Краснодар, 2019. – С.773-778.
4. Тагиев Р.С., Поляков П.А., Федотов Е.С., Дурапов А.Н. Исследование напряжений во фрикционном узле дисково-колодочном тормозе // Механика, оборудование, материалы и технологии: электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. Краснодар, 2019. С. 747-752.
5. Поляков П.А., Тагиев Р.С., Федотов Е.С., Полякова Е.А., Москаленко М.Б. Разработка тепловой модели тормозного диска фрикционного узла // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24, №1(150). С. 64-76.
6. Polyakov P.A., Volchenko D.A., Fedotov E.S., Krasin P.S., Evchenko A.S., Volchenko N.A. Pulse-contact frictional interaction of microprotrusions of friction pairs of brake devices // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 012194.
7. Поляков П.А. Разработка термомеханических моделей дисково-колодочных тормозов автомобилей / П.А. Поляков, Е.С. Федотов, Е.Ф. Скляренко, А.А. Голиков // Сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции «Механика, оборудование, материалы и технологии». 2019. С. 262-268.
8. Федотов Е.С. Моделирование температурного поля дискового тормоза / Е.С. Федотов, Н.А. Вольченко, П.А. Поляков, Р.С. Тагиев // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО "Кубанский государственный технологический университет": «Механика, оборудование, материалы и технологии». – Краснодар, 2019. – С. 758-763.
9. Поляков П.А. Разработка модели вентиляционного аппарата дисково-колодочных тормозов автомобилей / П.А. Поляков, Н.А. Вольченко, Е.С. Федотов, Р.С. Тагиев, В.А. Денисенко // Сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции «Механика, оборудование, материалы и технологии». 2019. С. 252-261.
10. Федотов Е.С. Исследование способов снижения нагрузки тормозных механизмов / Е.С. Федотов, Н.А. Вольченко, П.А. Поляков, М.Б. Москаленко // Сборник по материалам международной научно-практической конференции «Механика, оборудование, материалы и технологии». Краснодар, 2019. С. 753-757.
11. Поляков П.А., Полякова Е.А., Федотов Е.С., Тагиев Р.С., Голиков А.А., Москаленко М.Б. Классификация систем охлаждения фрикционных узлов и критерии оценки // Современные проблемы теории машин. 2019. № 8. С. 72-76.

### Сведения об авторах:

*Федотов Евгений Сергеевич* – старший преподаватель кафедры автосервиса и материаловедения, КубГТУ, г.Краснодар;

*Харьков Сергей Владимирович* – студент КубГТУ, г. Краснодар;

*Москаленко Максим Борисович* – студент КубГТУ, г. Краснодар.