

## ОЦЕНКА НАПРЯЖЕНИЙ ВО ФРИКЦИОННОМ УЗЛЕ ДИСКОВО-КОЛОДОЧНОГО ТОРМОЗА

*Тагиев Р.С., Сизов В.О.*

*Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар*

**Ключевые слова:** дисковый тормоз, тормозной диск, тормозные колодки, теплоемкость, температура, износ, перфорация, исследование.

**Аннотация.** В статье рассматриваются процессы изнашивания при их оценке в тормозной системе. Рассматривается в том числе особый случай экстренного торможения (от высокой скорости до полной остановки), в котором задействована система ABS (антиблокировочная тормозная система) и без этой системы. Теоретически доказано, что при загрузке автомобиля увеличивается его инерционность и сложность, его торможение, с одной стороны, сильнее прижимаем колеса к дороге, увеличиваем сцепление шин с дорожным покрытием и увеличиваем тормозные возможности автомобиля, с другой стороны. Показываем, что эти два явления нейтрализуют друг друга в равной степени, и, как следствие, масса не влияет на длину тормозного пути.

## EVALUATION OF STRESSES IN A FRICTIONAL KNOT OF DISK-PIP BRAKE

*Tagiev R.S., Sizov O.V.*

*Kuban State University of Technology, Krasnodar*

**Keywords:** disc brake, brake disc, brake pads, heat capacity, temperature, wear, perforation, research.

**Abstract.** The article talks about the wear processes of their assessment in the brake system. A special case of emergency braking (from high speed to a complete stop) is also considered, in which the ABS system (anti-lock braking system) is involved without this system. Theoretical evidence was given that, when loading a car, we increase its inertia and complication, its braking on the one hand, we press the wheels harder to the road, increase the adhesion of tires to the road surface and increase the braking capabilities of the car on the other hand. We show that these two phenomena neutralize each other equally, and, as a result, the mass does not affect the length of the braking distance.

Дисковые гидравлические тормоза являются одной из разновидностей тормозных механизмов фрикционного типа. Их вращающаяся часть представлена тормозным диском, а неподвижная – суппортом с тормозными колодками [7].

Несмотря на достаточно распространенное применение тормозов барабанного типа, дисковые тормоза все же приобрели наибольшую популярность вследствие ряда причин:

- тормозная способность дисковых систем не снижается из-за перегрева, так как они лучше охлаждаются;
- техническое обслуживание тормозных механизмов требуется гораздо реже;
- поверхность трения дисковых тормозов при одинаковой массе больше, чем у барабанных.

Многие тяжелые и спортивные автомобили оснащены вентилируемыми тормозными дисками, при этом могут иметь место различия в толщине их

боковых стенок. Чтобы температура на каждой стороне тормозного диска была одинаковой, на многих тормозах болидов ближайшая к колесу сторона тормозного диска тоньше, чем противоположная. Колесо автомобиля является препятствием для поступающего охлаждающего воздуха к наружной рабочей поверхности тормозного диска, что делает ее более горячей, чем внутренняя сторона, поэтому большая толщина плохо охлаждаемой наружной поверхности тормозного диска способствует выравниванию температур их нагрева [1].

Однако при частом интенсивном торможении на тормозных дисках появляются трещины. Причина этого – термические напряжения и давление тормозных колодок на тонкие металлические стенки в каждом охлаждающем канале. Термические напряжения в литом тормозном диске вызываются в переходной области ротора и ступицы из-за того, что температура ротора в этом месте выше, чем температура ступицы.

Наружная часть тормозного диска при его нагреве расширяется сильнее, чем центральная часть. Это приводит к тому, что тормозной диск деформируется и изгибается, появляется его конусность, которая приводит к неравномерному износу тормозных накладок. Постоянно повторяясь, расширение и стягивание тормозного диска вызывают появление трещин.

#### **Анализ износа дисково-колодочных тормозов в зависимости от массы автомобиля**

Как принято считать, чем больше масса автомобиля, тем сложнее его остановить. Но это не совсем так. С одной стороны масса автомобиля играет большую роль как инерция, препятствующая торможению, а с другой стороны эта же масса и повышает гравитационную силу автомобиля, которая в свою очередь повышает прижимную силу покрышек автомобиля с дорогой. Попробуем это доказать прибегнув к физическим законам

В данном случае речь идет об экстренном торможении (с большой скорости до полной остановки). В современных автомобилях при таком торможении срабатывает АБС (антиблокировочная система тормозов), а классические автомобили либо срываются в «юз», либо остаются на границе «юза», в зависимости от действий водителя.

Сначала докажем это на теории. Нагружая машину, мы, с одной стороны, увеличиваем ее силу инерции и усложняем торможение. С другой стороны, мы сильнее прижимаем колеса к дороге, увеличиваем сцепление покрышек с дорожным покрытием и повышаем тормозные возможности автомобиля. Эти два явления нейтрализуют друг друга в равной степени, и, в итоге, масса не влияет на длину тормозного пути.

Для того, чтобы понять всю суть данной теории, детально разберем все силы, действующие на автомобиль.

Для начала разберем понятие «масса» автомобиля. Массы в природе две: инертная и гравитационная.

Инертная масса  $m_i$  – масса, которая ответственна за сопротивление движению тела. Чем больше масса тела, тем больше его сила инерции, следовательно его труднее привести в движение и остановить.

В механике об этом говорит 2-й закон Ньютона:

$$a = F/m_u, \quad (1)$$

то есть ускорение (или замедление) тела прямо пропорционально действующей на него силе и обратно пропорционально инертной массе тела. Или в более просто формулировке это выглядит так:

$$F = m_u \cdot a. \quad (2)$$

Исходя из этого видно, что инертная масса действительно играет негативную роль, как при разгоне, так и при торможении, но, так как мы рассматриваем экстренное торможение автомобиля, то в нем будет играть роль и другая сила, которая называется гравитационной массой [5].

Гравитационная масса  $m_z$  – масса, которая ответственна за взаимное притяжение тел, в частности, за притяжение тел к Земле. Чем больше масса тела, тем больше его притяжение к Земле, и следовательно большее давление на опору.

А об этом в механике говорит закон всемирного тяготения Ньютона:

$$F = G m_{z1} m_{z2}/r_2. \quad (3)$$

Или сила притяжения двух тел пропорциональна массам (гравитационным) этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Эта формула упрощается для тела в поле тяготения Земли:

$$F = m_z \cdot g. \quad (4)$$

где  $m_z$  – гравитационная масса тела, а  $g$  – ускорение свободного падения, равное  $9,81 \text{ м/с}^2$

Применимо к торможению автомобиля это означает что чем больше масса автомобиля, тем сильнее она давит на колеса и лучше прижимает покрышки автомобиля к дорожному полотну и, тем самым повышая коэффициент сцепления шин с дорогой. Ведь, согласно закону Кулона, сила трения покоя (в нашем случае – сила сцепления шин с дорогой, она же – «держак» на гоночном жаргоне) пропорциональна весу тела  $N$ :

$$F_{mp} = k N = k m_z g, \quad (5)$$

где  $m_z$  – гравитационная масса автомобиля,  $k$  – коэффициент сцепления шин с дорожным полотном,  $g$  – ускорение свободного падения.

Тогда, чем больше масса автомобиля, тем выше сила сцепления шин с дорогой и тем сложнее тормозам заблокировать колеса и пустить машину в «юз» (ну или включить АБС, если она есть).

В итоге, инертная масса увеличивает инерцию автомобиля, а гравитационная масса улучшает сцепление шин с дорогой и тормозной потенциал автомобиля. Здесь применим закон сохранения энергии.

Законы физики гласят, что процесс торможения выглядит как закон сохранения энергии:

$$m_u v^2/2 = F_{mp} s, \quad (6)$$

т.е. кинетическая энергия автомобиля с инертной массой  $m_u$  и скоростью  $v$  при торможении переходит в тепло за счет работы силы трения  $F_{mp}$ , которая затрачивается на замедление автомобиля на участке пути длиной  $s$  (тормозной путь).

Сила трения  $F_{mp}$  равна  $km_z g$  – произведение коэффициента трения  $k$ , гравитационной массы  $m_z$  и ускорения свободного падения  $g$ . И сразу вопрос: о какой силе трения идет речь? О силе трения тормозных колодок о тормозной

диск? Или о силе трения покрышек о дорожное полотно, о «держаке»? Первопричина торможения – сила трения колодок о диски. Но она не может превышать силу трения между покрышкой и дорогой: в этом случае покрышки начинают скользить, и, либо включается АБС, либо автомобиль идет в «юз». После чего любое усиление нажатия на тормоз не дает выигрыша в торможении, и автомобиль продолжает тормозить за счет трения покрышек о дорожное полотно. Поэтому для случая экстренного торможения нужно считать, что сила трения тормозных колодок о диски равна силе сцепления покрышек с дорогой. И тогда  $k$  – коэффициент сцепления покрышки с дорогой, если покрышки на грани скольжения, или это коэффициент скольжения покрышек о дорогу, если колеса заблокированы, и машина тормозит юзом.

Тогда подставим значения силы сцепления  $F_{mp} = k m_2 g$  в закон сохранения энергии:

$$m_u v^2/2 = k m_2 g S. \quad (7)$$

И исходя из этого, как в свое время доказали Ньютон и Эйнштейн, инерционные и гравитационные массы равны. На сегодняшний день это проверено множественными экспериментами с высокой степенью точности. Эти массы имеют совершенно разный физический смысл, но в килограммах это всегда одно и то же [2].

И тогда заменяем инертную и гравитационную массы на «просто массу»:

$$m v^2/2 = k m g S. \quad (8)$$

Теперь массы можно сократить, и останется:

$$v^2/2 = k g S. \quad (9)$$

Отсюда получаем тормозной путь, не зависящий от массы:

$$S = v^2/(2 k g). \quad (10)$$

где  $v$  – скорость движения автомобиля до начала торможения,  $k$  – коэффициент сцепления покрышек с дорогой,  $g$  – ускорение свободного падения.

Отсюда видим, что эти две массы компенсируют друг друга в равной степени, и, в итоге, масса не влияет на длину тормозного пути.

Скорость зависит только от водителя,  $g$  – постоянна, а коэффициент сцепления  $k$  зависит от состава резины протектора покрышки и от качества дорожного покрытия. Выходит, тормозной путь зависит от скорости, качества покрышки и качества дороги. При этом под качеством покрышки понимается именно состав резины. А от ширины профиля шины и площади пятна контакта сила сцепления шины с дорогой не зависит, как и не зависит тормозной путь.

Исходя из описанного выше, масса автомобиля не влияет на длину тормозного пути, но влияет на тормозные усилия, прилагаемые к тормозным механизмам во время торможения, и как следствие возникает повышенное трение, нагрев и износ тормозных механизмов.

Для эксперимента был взят автомобиль Lada Priora (с новыми дисковыми тормозами и шинами) и на автополигоне проверим экстренное торможение автомобиля 100-0 км/ч на нагрузке автомобиля с 1 человеком в машине (водителем) (+80 кг), 3 человека в машине (+ 200 кг) и на полном нагрузке автомобиля 4 человека в машине и багаж (+ 300 кг).

Цель данного эксперимента – доказать, что износ дисков прямо пропорционален повышенной силой трения тормозных колодок о тормозной диск, и как следствие большее выделение тепла (нагрев тормозных дисков и колодок).

При первом эксперименте на нагрузке 1 человек в машине с температурой тормозных дисков в начале равной температуре окружающего воздуха (+30 градусов) длина тормозного пути составила 42 метра и температура тормозных дисков на выходе 101,4 °С.

При втором эксперименте на нагрузке 3 человека в машине (+200 кг) с температурой тормозных дисков в начале равной температуре окружающего воздуха (+30 градусов) длина тормозного пути составила 43 метра и температура тормозных дисков на выходе 139,6 °С.

При третьем эксперименте на нагрузке 4 человека в машине (+300 кг) с температурой тормозных дисков в начале равной температуре окружающего воздуха (+30 градусов) длина тормозного пути составила 42 метра и температура тормозных дисков на выходе 197,3 °С.

В результате экспериментов видно что тормозной путь в зависимости от нагруженности автомобиля не меняется, а вот нагрев тормозных дисков прямо пропорционален нагруженности автомобиля. Чем больше масса автомобиля, тем больше усилий требуется приложить тормозной системе для торможения. Большой нагрев дисков связан с увеличенным трением и как следствие более быстрому износу тормозных дисков и колодок [4].

#### **Оценка износа дисково-колодных тормозов в зависимости от стиля вождения**

В данной главе рассмотрим характер износа дисково-колодочных тормозов в зависимости от стиля и характера вождения автомобилем.

Как и описывали выше, повышенный нагрев тормозных дисков свидетельствует об увеличенной силе трения в дисково-колодочных тормозах (увеличенная сила трения колодок о тормозной диск).

Исходя из этого, мы рассмотрим несколько режимов вождения автомобилем.

1. Спокойный городской режим (плавный разгон и плавное торможение).
2. Интенсивный городской режим (интенсивное ускорение и интенсивное торможение).
3. Трассовый режим.

Для этих 3 пунктов мы будем рассматривать стандартные городские автомобили с простыми тормозами.

Детально рассмотрим каждый из режимов вождения.

Для определения степени нагрева тормозов проведем эксперимент на том же автомобиле Lada Priora. Для оценки нагрева данный автомобиль проехал 20 км по городу в спокойном и интенсивном режиме вождения и 50 км в трассовом режиме. Во время пробега тормозные диски замерялись несколько раз – 5, 10, 20 километров пробега для города и 10,25, 35, 50 км для трассы

При первом эксперименте на спокойном городском режиме вождения при 3х промежуточных измерениях на пробегах 5, 10, 20км температура тормозных

дисков не поднималась больше 71 градусом (температура воздуха на улице +30 градусов).

При втором эксперименте на интенсивном режиме вождения при 3х промежуточных измерениях на пробегах 5,10, 20 км замеры показали, что максимальная температура тормозных дисков достигла 108,5 градуса (температура воздуха на улице +30 градусов).

При третьем эксперименте автомобиль проехал по трассе 50 км (ограничение скорости 90км/ч) с промежуточными измерениями на 10, 25, 35, 50 км пробега. Замеры показали, что максимальная температура дисков не повышалась больше 101,4 градусов.

Проведенные эксперименты показали, что спокойный и трассовый режим вождения положительнее сказываются на износ дисково-колодочных тормозов, нежели интенсивный городской режим. Спокойный городской режим показал самую минимальную температуру нагрева. Связанно это с тем, что водитель в плавной езде меньше усилий прилагает на тормозные механизмы (заранее оттормаживается) и как следствие возникает меньшая сила трения фрикционных накладок о дисковый тормоз. При таком режиме вождения на автомобиле Lada Priora (как показывает практика) тормозные диски и колодки служат больше среднего на 25-35%. (замена тормозных колодок в среднем 15 т.км., замена тормозных дисков в среднем 30 т.км) [6].

Интенсивный городской режим показал большую температуру нагрева в отличие от спокойного режима вождения. Связанно это с тем, что водитель в интенсивном движении применяет большее количество усилий и число торможений, и как следствие возникает увеличенная сила трения фрикционных накладок о тормозной диск. Максимальная температура нагрева в интенсивном движении 71 градус по Цельсию.

И трассовый режим. Если рассмотреть городские режимы в сравнении с трассовым, есть одна отличительная особенность – это скорость движения автомобилей. Охлаждение диска в городе практически реализуется гораздо хуже, нежели на трассе (60км/ч- город, 90км/ч- трасса). Объясняется это тем, что количество воздуха, проходящего через вентиляционные каналы тормозного диска, на трассе в разы выше в отличии от города, и как следствие охлаждение дискового тормоза на трассе реализуется гораздо лучше. Данный фактор позволяет сохранять температуру диска в определенном температурном режиме, что положительно сказывается на износе. Еще один фактор это количество торможений на определенный километраж. Если в городе количество торможений на 10 км. Пути достигает 15-25 раз, то на трассе эта цифра колеблется около 5-10 торможений.

Исходя из всех экспериментов, можно сделать вывод, что нагрев дисково-колодочных тормозов происходит на одном автомобиле при одной и той же тормозной системе и наиболее рациональный износ будет достигаться в спокойном и трассовом режиме [3].

В данной статье были рассмотрены термические напряжения во фрикционном узле дискового тормоза, методики расчета тепловых напряжений. В ходе исследования тепловых напряжений было выдвинуто предположение о

том, что изменение конструкции в силу составного диска с плавающим ротором является самым эффективным способом снижения термического напряжения в переходной области ротора и ступицы и как следствие – деформаций.

### Список литературы

1. Поляков П.А., Полякова Е.А. Повышение тормозных свойств спортивных автомобилей // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса. Сборник статей IX Международной научно-производственной конференции. 2016. С. 41-44.
2. Федотов Е.С., Поляков П.А., Тагиев Р.С., Харьков С.В., Кузнецов К.Г. Проблемы современных дисковых тормозов автомобилей и пути их решения // Механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. 2019. С. 779-783.
3. Поляков П.А., Тагиев Р.С., Мищенко В.А., Голиков А.А. Разработка математической модели фрикционного узла дисково-колодочного тормоза автомобиля // Механика, оборудование, материалы и технологии. электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. 2019. С. 245-251.
4. Тагиев Р.С., Башук Р.П. Углеродные тормоза // Сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО "Кубанский государственный технологический университет". Изд-во: ООО «Принттерра», 2018. С. 725-728.
5. 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. 2019. С. 747-752.
6. 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.
7. Тагиев Р.С., Башук Р.П. Углеродные тормоза // Механика, оборудование, материалы и технологии. Сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО "Кубанский государственный технологический университет". 2018. С. 725-728.

### Сведения об авторах:

*Тагиев Руслан Суфудинович* – старший преподаватель кафедры автосервиса и материаловедения, КубГТУ, г. Краснодар;

*Сизов Владислав Олегович* – студент, КубГТУ, г. Краснодар.