

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ НА ТОЛЩИНУ ЖИДКОСТНОГО СЛОЯ В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ПАРЕ ТРЕНИЯ ТОРМОЗНОГО ДИСКА

Вольченко А.И.¹, Поляков П.А.², Голиков А.А.², Тагиев, Р.С.², Задаянчук Н.А.³

¹*Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г.Ивано-Франковск, Украина;*

²*Кубанский государственный технологический университет, г.Краснодар;*

³*Кубанский государственный университет, г.Краснодар*

Ключевые слова: пара трения, тормозной диск, жидкостной слой, скорость скольжения, вязкость.

Аннотация. Критическая нагрузка, разрушающая жидкостной слой, должна зависеть главным образом от соотношения механических свойств покрытия и базового материала, толщины слоя, геометрических характеристик контактирующих поверхностей и температурно-скоростных режимов нагружения. Известно, что структурные факторы, температурно-скоростные условия, схема напряженного состояния в большей степени влияют на поведение материала при деформации. В непосредственном силовом контакте в паре трения жидкостная пленка сохраняет сплошность, уменьшаясь по толщине с ростом нагрузки и внедрения, что определяется по величине омического сопротивления в контакте, а смазка, не вошедшая в зону силового контакта, отторгается. Таким образом, жидкостное покрытие способно пластически деформироваться вместе с металлической основой.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF SLIDING SPEED ON THE THICKNESS OF THE LIQUID LAYER IN THE NEAR-SURFACE LAYERS OF THE FRICTION PAIR OF THE BRAKE DISC

Volchenko A.I.¹, Polyakov P.A.², Golikov A.A.², Tagiev, R.S.², Zadayanchuk N.A.³

¹*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine;*

²*Kuban State Technological University, Krasnodar;*

³*Kuban State University, Krasnodar*

Keywords: friction pair, brake disc, fluid layer, sliding speed, viscosity.

Abstract. The critical load that destroys the liquid layer should mainly depend on the ratio of the mechanical properties of the coating and the base material, the layer thickness, the geometric characteristics of the contacting surfaces, and the temperature-rate loading conditions. It is known that structural factors, temperature and velocity conditions, and the stress state diagram to a greater extent affect the behavior of a material during deformation. In direct force contact in a friction pair, the liquid film retains its continuity, decreasing in thickness with increasing load and penetration, which is determined by the value of the ohmic resistance in the contact, and the lubricant that has not entered the force contact zone is rejected. Thus, the liquid coating is able to plastically deform along with the metal substrate.

Введение

Согласно исследованиям тепловое состояние пар трения фрикционных узлов оказывает влияние как геометрические [1-4], так и эксплуатационные параметры [5-9]. Немаловажным фактором являются внутренние процессы,

которые происходят при контакте пар трения. Согласно исследованиям [10-13] в материалах рабочих поверхностей происходят структурные изменения, которые влияют на тепловое состояние фрикционного узла. Одним из неисследованных направлений является влияние эксплуатационных параметров на структурные изменения трибоконтакта. Зависимость коэффициента трения скольжения от скорости скольжения в общем случае имеет вид, показанный на рисунке 1.

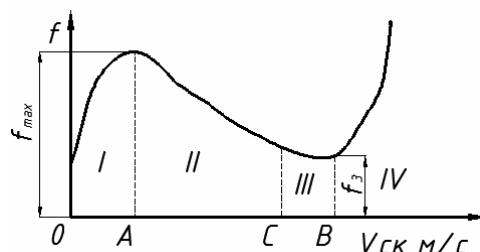


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения скольжения от скорости скольжения ($v=\text{const}$; $p=\text{const}$; $v_{\Sigma k}=\text{const}$)

На этой зависимости можно выделить две характерные точки А и В. Точка А характеризует максимальное значение коэффициента трения скольжения и определяет область возможной устойчивой работы фрикционного узла. Величины f_{max} являются исходными при проектировании механизмов тормозного механизма. Месту возникновения максимальных сил трения в парах трения соответствует зона минимальной контактной прочности тормоза, а изменение предела контактной прочности (по усталости) при скольжении поверхностей зависит от изменения максимальных коэффициентов трения. В точке В происходит катастрофическое разрушение жидкостной пленки и контактирующих поверхностей, поэтому данная точка определяет предел несущей способности контакта по условию возникновения задира. Если механизм, работающий с жидкостным слоем, спроектирован так, что силовое и термодинамическое состояние рабочего контакта создает условие для возникновения точки В, то произойдет заедание поверхностей. Наиболее частый вид зависимости $f=f(v_{ск})$ при скольжении ($v_{\Sigma k}=\text{const}$; $p_{max}=\text{const}$; $v=\text{const}$) (рис.1) можно разделить на четыре участка: *I* – участок малых скольжений, характеризующийся возрастанием коэффициентов трения с ростом скорости скольжения; к нему относится максимальный коэффициент трения скольжения; *II* – участок уменьшения коэффициента трения с увеличением скорости скольжения; *III* – участок малого изменения коэффициента трения со скоростью скольжения; *IV* – участок катастрофического разрушения жидкостной пленки и контактирующих поверхностей, быстрого роста коэффициента трения. При высоких скоростях скольжения ($v_{ск} \geq 30 \text{ м/с}$) коэффициент трения в момент разрушения жидкостного слоя не увеличивается.

Таким образом, механизмы, работающие в условиях качения со скольжением, могут функционировать без внезапного катастрофического износа и заедания в диапазоне скольжений от 0 до точки В или в областях *I*, *II*, *III*. Характер зависимости коэффициента трения от скорости скольжения определяется в основном величиной вязкости воды на поверхностях тел, вступающих в контакт. Увеличение вязкости приводит к более резкому росту f на

участке *I* и уменьшению на участке *II* с ростом скорости скольжения. Увеличение суммарной скорости скольжения практически не сказывается на характере зависимости $f=f(v_{ck})$. Момент заедания поверхностей существенным образом зависит от суммарной скорости скольжения в контакте. В случае малых $v_{\Sigma k}$ заедание наступает при незначительных скоростях скольжения. С увеличением вязкости воды, вступающего в контакт, катастрофическое разрушение жидкостной пленки наступает при более высокой скорости скольжения.

Тенденция к уменьшению габаритов, массы механизмов, повышению энергоемкости приводит к высоким контактным напряжениям. Максимальное давление по Герцу во фрикционных узлах достигают значений $p_{max} \geq 2,0$ МПа; отдельные тормозные механизмы при $p_{max} \geq 4,0$ МПа. Фрикционные узлы высоких контактных давлений, имеющих начальное контактное давление в точке $p_{max} = 2,0 \div 3,0$ МПа. Установлена сложная зависимость коэффициента трения, особенно при его максимальном значении f_{max} , от контактного давления. При низких скоростях скольжения и вязкости воды коэффициент трения с увеличением контактных давлений перестает от них зависеть. Для высоких скоростей скольжения и больших значений вязкости воды характерно начальное увеличение коэффициента трения. При высоких p_{max} коэффициент трения практически остается постоянным. При некоторых сочетаниях вязкостей воды и суммарных скоростей скольжения коэффициент трения не зависит от давления в контакте. Факторы, способствующие установлению контактно-гидродинамического режима, увеличению толщины жидкостной пленки, приводят к незначительному росту f с ростом контактных давлений. На рис. 2 показана область изменения максимального коэффициента трения с ростом контактных давлений при различных вязкостях воды и суммарных скоростях скольжения образцов. Верхней границы соответствует f при малых v и $v_{\Sigma k}$, нижней – при больших значениях вязкости и скорости.

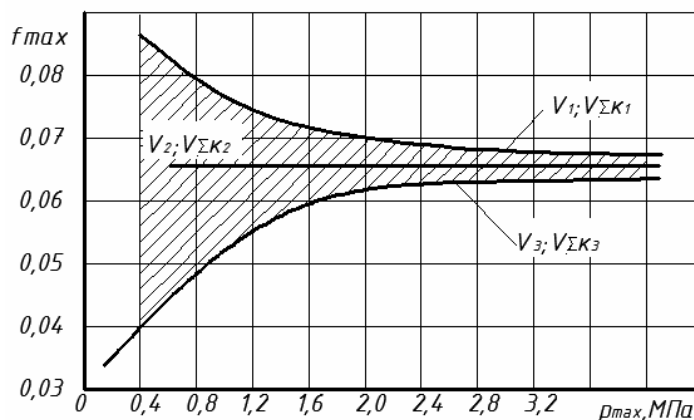


Рис. 2. Влияние контактного давления на максимальный коэффициент трения скольжения ($v_{\Sigma k 3} > v_{\Sigma k 2} > v_{\Sigma k 1}$; $v_3 > v_2 > v_1$)

Наиболее типичные параметры вязкости воды находятся в диапазоне $0,2 \div 1,8 \cdot 10^6$ м²/с при температурных режимах работы фрикционных узлов. Влияние вязкости воды на коэффициент трения зависит от средней температуры поверхностей рабочих тел, вступающих в контакт, от контактного давления и скорости скольжения.

При скоростях скольжения в контакте меньше значений, соответствующих максимальному коэффициенту трения, изменение вязкости воды не вызывает существенного изменения коэффициента трения: обычно большей исходной вязкости соответствует большее значение коэффициента трения. Увеличение скорости скольжения до значений, превышающих соответствие максимальному коэффициенту трения, приводит всегда к тому, что с уменьшением вязкости воды коэффициент трения увеличивается. Большим скоростям скольжения соответствует большая степень изменения коэффициента трения

Увеличение контактного давления несколько уменьшает влияние вязкости на коэффициент трения. В области максимальных коэффициентов трения влияние вязкости воды обычно незначительно. На хорошо приработанных поверхностях f снижается с увеличением температуры воды. Увеличение скоростей скольжения приводит к некоторому уменьшению влияния вязкости на коэффициент трения. При контактно-гидродинамическом режиме трения основными показателями воды, характеризующими его влияние на коэффициент трения, являются вязкость и пьезокоэффициент вязкости.

Установлена идентичность закономерностей изменения коэффициентов трения для тел с начальным точечным и линейным контактом. При достижении предельного значения напряжения сдвига в жидком слое, зависящего от давления и температуры, происходит срез внутри этого слоя. Максимальные коэффициенты трения скольжения при качении тормозного диска возникают при малых абсолютных значениях скоростей скольжения. Максимум коэффициента трения в функции скорости скольжения рельефно выступает при повышенных вязкостях воды. На малых вязкостях за точкой максимума при увеличении скорости скольжения следует незначительное снижение коэффициента трения. Абсолютное значение скорости скольжения при f_{max} зависит главным образом от вязкости воды при температуре вступающих в контакт поверхностей рабочих тел и от контактных давлений: чем больше вязкость и контактное давление, тем меньше скорость скольжения, соответствующая возникновению f_{max} . С увеличением нагрева тел точка максимума смещается в сторону больших скольжений.

Для тел с начальным контактом по линии максимальный коэффициент трения имеет место при скорости

$$v_{ск} = \frac{K_1}{p_{max} \lg \left(\frac{v_k}{v_{ок}} \right)}, \quad (1)$$

где $v_{ск}$ – скорость скольжения, соответствующая f_{max} , м/с;

$K_1=2 \cdot 10^5$ – размерный коэффициент, МПа/(м·с);

p_{max} – максимальное контактное давление по Герцу, МПа;

v_k – вязкость воды при температуре поверхностей тел, м²/с;

$v_{ок}=1 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Формула охватывает диапазон изменения контактных давлений $5,0 \leq p_{max} \leq 30,0$ МПа и вязкостей $0,2 \leq v_k \leq 10^{-5}$ м²/с. Если вязкость воды на поверхности тел $v_k < 0,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с, то в формулу следует подставлять $v_k < 0,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

В случае точечного начального контакта тел, формула для расчетов скоростей скольжения, соответствующих возникновению максимального коэффициента трения, имеет такую структуру, как и для линейного касания:

$$v_{ск} = \frac{K_2}{p_{max} \lg \left(\frac{v_{к}}{v_{ок}} \right)}, \quad (2)$$

где $K_2=10^6$ – размерный коэффициент, МПа/(м·с);

Формула справедлива, если входящие в нее величины изменяются в следующих пределах: $10,0 \leq p_{max} \leq 45,0$ МПа и вязкостей $1 \leq v_{к} \leq 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. При вязкости воды менее $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, следует подставлять $v_{к} < 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Изменение скоростей скольжения, соответствующих возникновению максимальных коэффициентов трения при различных вязкостях воды и контактных давлениях показано на рис. 3.

Условие возникновения максимальных коэффициентов трения (или касательных напряжений) на сломе жидкостного слоя можно выразить в критериальной форме:

$$\lg \left(\frac{v_{к}}{v_{ок}} \right)^{\frac{v_{ск} p_{max}}{K}} = 1, \quad (3)$$

где $K=K_1=2 \cdot 10^5$ – коэффициент для начального контакта тел по линии и $K=K_2=10^6$ – для точечного контакта, МПа/(м с).

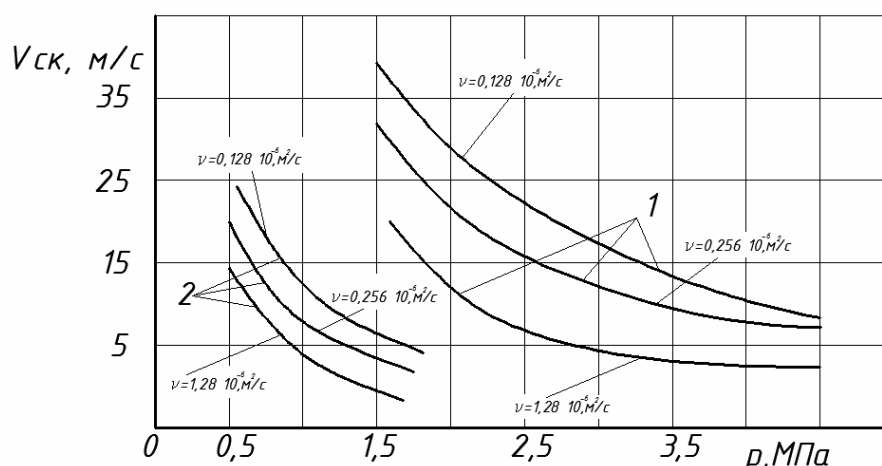
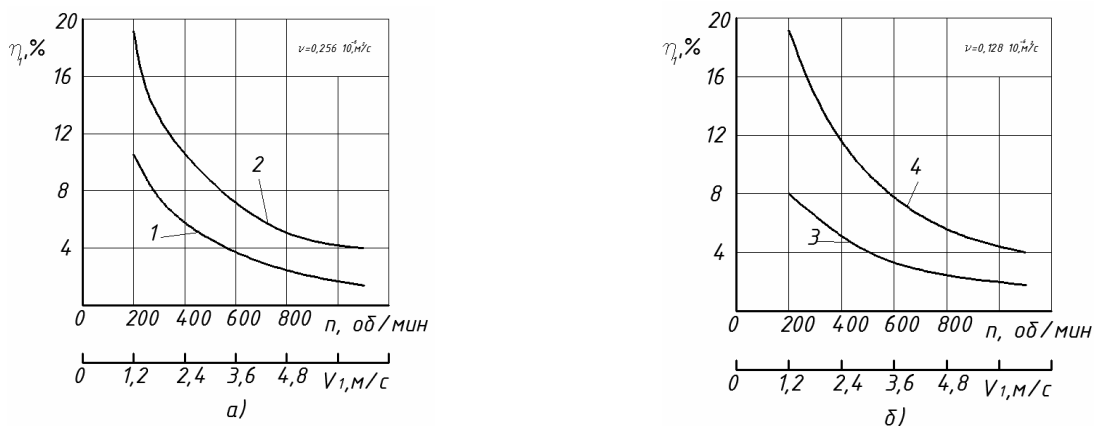


Рис. 3. Зависимость скорости скольжения при f_{max} от контактного давления

На рис. 4 а, б указана область изменения экспериментальных значений при разных контактных давлениях и фиксированной вязкости как функции скорости

опережающего образца (v_1): $\eta_1 = \frac{v_{ск}}{v_1} 100\%$, (4)

Причина возникновения экстремума на кривой $f=f(v_{ск})$ в зависимости от принятых предпосылок может быть объяснена по-разному; так, например, рассматривается ли жидкостной слой в контакте как вязкопластичное тело или срез в жидкостном слое в точке А (рис. 1) объясняется тепловым эффектом – следствием диссипации механической энергии внутри жидкостного слоя.



1) $p_{max}=4,5\text{МПа}$; 2) $p_{max}=2,5\text{МПа}$; 3) $p_{max}=1,5\text{МПа}$; 4) $p_{max}=0,5\text{МПа}$

Рис. 4. Зависимость относительного скольжения от скорости опережающего образца при начальном контакте: а – в точке; б – по линии

Выводы. Разрушение несущего жидкостного слоя в тяжело нагруженном контакте приводит к возрастанию коэффициента трения, износа, а в условиях глубокого вакуума – к свариванию. В связи с этим возникает необходимость в изучении условий, приводящих к потере несущей способности жидкостного слоя и определению характерных факторов, влияющих на разрушающую нагрузку. Минимальное усилие, приводящее к интенсивному разрушению жидкостного слоя и непосредственному контакту трущихся поверхностей, принимается за показатель, определяющий предельную несущую способность контакта.

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Поляков П.А. Разработка критериев для оценки теплового равновесного состояния фрикционных узлов тормозных устройств / П.А. Поляков, Е.А. Полякова, Р.С. Тагиев, Н.А. Задаянчук // Фундаментальные основы механики. 2020. №5. С. 51-55.
4. Поляков П.А. Разработка термомеханических моделей дисково-колодочных тормозов автомобилей / П.А. Поляков, Е.С. Федотов, Е.Ф. Складенко, А.А. Голиков // Сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции «Механика, оборудование, материалы и технологии». 2019. С. 262-268.
5. Литвинов А.Е. Определение объема воздуха, омывающего пары трения барабанно-колодочного тормозного механизма при их вынужденном охлаждении / А.Е. Литвинов, П.А. Поляков, Е.С. Федотов, Е.А. Полякова, Р.С. Тагиев, А.А. Голиков // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. №4 (153). С.740-755.
6. Литвинов А.Е. Управление энергонагруженностью барабанно-колодочного тормоза / А.Е. Литвинов, П.А. Поляков, Е.А. Полякова // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2020. №5. С.74-78.
7. Литвинов А.Е. Разработка методики оценки системы охлаждения тормозных дисков / А.Е. Литвинов, П.А. Поляков, Е.А. Полякова, Р.С. Тагиев, Е.С. Федотов, А.А. Голиков // Вестник ИжГТУ им. Калашникова. 2020.Т. 23. №1(153). С. 14-22.

8. Поляков П.А. Управление ресурсом дисково-колодочного тормоза / П.А. Поляков, Е.А. Полякова, Р.С. Тагиев, А.А. Голиков, М.Б. Москаленко // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2020. №5. С. 79-86.
9. Поляков П.А. Аналитический метод определения средних температур рабочих поверхностей обода тормозного барабана // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2012. № 4 (159) С. 173-177.
10. Вольченко Н.А. Нанотрибология при взаимодействии поверхностных слоев пар трения барабанно-колодочных тормозов / Н.А. Вольченко, П.А. Поляков // Вестник Саратовского технического университета. 2012. Т.1. №1(63). С. 41-47.
11. Вольченко Н.А. Влияние влаги на триботехнические параметры фрикционных узлов тормозных устройств и ее удаление с их поверхностей трения / Н.А. Вольченко, П.А. Поляков // Вестник Саратовского технического университета. 2012. Т.1, №1(63). С. 82-87.
12. Вольченко А.И. Энергонагруженность трибосопряжений дисково-колодочных тормозов транспортных средств / А.И. Вольченко, А.В. Возный, О.Б. Стадник, П.А. Поляков, П.С. Красин // Сборник «Сфера знаний: вопросы современного этапа развития научной мысли». Казань, 2018. С. 396-410.
13. Патент №2460913 РФ. Барабанно-колодочный тормоз / Вольченко А.И., Павлиский В.М., Вольченко Н.А., Вольченко Д.А., Сторож Я.Б., Поляков П.А. – Оpubл. 10.09.2012, Бюл. №25.

Сведения об авторах:

Вольченко Александр Иванович – д.т.н., профессор кафедры механики машин, ИФНТУНГ, г.Ивано-Франковск;

Поляков Павел Александрович – к.т.н., доцент кафедры автосервиса и материаловедения, КубГТУ, г.Краснодар;

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

Голиков Алексей Александрович – ассистент кафедры систем управления и технологических комплексов, КубГТУ, г.Краснодар;

Задаянчук Нина Александровна – преподаватель кафедры информационных образовательных технологий, КубГУ, г.Краснодар.