УДК 621.891

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОСВЯЗИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ ЗИБЕЛЯ И КУЛОНА

В. Г. Барсуков[1], В. В. Воропаев[1], Е. Т Воропаева[1]. В. М. Голуб[2]
[1]Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь
[2]Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь

Трение играет существенную роль не только в механике машин и механизмов, но также и при обработке давлением твердых и дисперсных материалов. В последнем случае оно определяет силовые и энергетические параметры процессов деформирования, неоднородность напряженно- деформированного состояния и влияет на неравномерность распределения показателей физико-механических свойств получаемых изделий. Несмотря на важность проблемы трения, многие ее аспекты изучены недостаточно. Это обусловлено сложностью протекающих в зоне фрикционного контакта явлений, что затрудняет возможность ведения триботехнических или триботехнологических расчетов. Например, широко применяемый закон трения Амонтона – Кулона устанавливает линейную зависимость удельных сил трения τ от давления p в зоне контакта [1,2]

$$\tau = fp\,, \qquad (1)$$

где f – коэффициент трения, называемый в дальнейшем коэффициентом трения Кулона.

Вместе с тем, имеющиеся экспериментальные данные по полимерным материалам и металлам [3,4] свидетельствуют о существенном снижении коэффициента трения Кулона с ростом давления. Кроме того, закон трения Амонтона – Кулона допускает неограниченный рост удельных сил трения в зоне контакта, в то время как классические положения теории пластичности ограничивают эту величину сдвиговой прочностью τ_s деформируемого материала

$$\tau = \tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}\,, \qquad (2)$$

где σ_s – предел текучести деформируемого материала.

Более тщательный анализ, выполненный Зибелем при изучении процессов объемной штамповки металлов, показал [3], что при высоких давлениях удельные силы трения составляют некоторую долю от сдвиговой прочности τ_s деформируемого материала

$$\tau = m\tau_s\,, \qquad (3)$$

где m – так называемый «фактор трения» Зибеля [3,4].

Переходя от сдвиговой прочности τ_s к пределу текучести σ_s, формула (3) с учетом (2) может быть преобразована к следующему виду

$$\tau = \frac{m}{\sqrt{3}}\sigma_s = \mu_s\sigma_s\,, \qquad (4)$$

где μ_s – коэффициент пластического трения Зибеля, рассчитываемый по формуле

$$\mu_s = \frac{m}{\sqrt{3}} \approx 0,577m. \tag{4а}$$

Кроме рассмотренных выше простейших схем предложены и более сложные аналитические зависимости, связывающие удельные силы трения с контактным давлением. Например, в работе [4] применительно к прессованию древесно-полимерных композитов получено следующее уравнение для расчета удельных сил трения:

$$\tau = \mu_s \sigma_s \left(1 - e^{-\frac{fp}{\mu_s \sigma_s}}\right). \tag{5}$$

Применительно к обработке металлов давлением Левановым предложена аналитическая зависимость [3]

$$\tau = m\tau_s \left(1 - e^{-\frac{1,25p}{\sigma_s}}\right) = \frac{\mu_s \sigma_s}{\sqrt{3}} \left(1 - e^{-\frac{1,25p}{\sigma_s}}\right). \tag{6}$$

Приведенные выше зависимости (5) и (6) теоретически могли бы быть использованы в широком диапазоне рабочих давлений, поскольку они удовлетворяют закону трения Зибеля при высоких давлениях ($p \to \infty$) и согласуются с законом трения Амонтона – Кулона при низких давлениях ($p \to 0$). Вместе с тем не ясно, в какой мере коэффициент (или фактор) трения Зибеля связан с коэффициентом трения Кулона. К тому же имеется противоречие законов трения Амонтона – Кулона (линейная зависимость удельных сил трения от давления) и Зибеля (независимость удельных сил трения от давления) в процессах пластического деформирования.

Проанализируем возможность устранения этого противоречия с использованием адгезионной теории трения, которая основана на выдвинутом Ф. П. Боуденом и Д. Тейбором положении о том, что вступающие в контакт неровности образуют «мостики сварки» благодаря адгезии на пятнах контакта [1]. В зависимости от свойств контактирующих материалов срез «мостиков сварки» может происходить по границе раздела неровностей или по более мягкому материалу. С увеличением нормальной нагрузки растут пластическая деформация контактирующих выступов и сближение тел трения. В результате увеличиваются размеры и число «мостиков сварки», что сопровождается ростом силы трения F_T. Следовательно, сила трения растет пропорционально площади фактического контакта (ФПК) и определяется произведением удельных сил адгезионного сцепления τ_a на величину A_r ФПК [1]:

$$F_T = \tau_a \cdot A_r = \tau_a \cdot \eta \cdot A_н, \tag{7}$$

где $\eta = A_r / A_н$ – относительная ФПК; $A_н$ – номинальная площадь касания.

Откуда для удельных сил трения τ можно записать

$$\tau = \frac{F_T}{A_н} = \tau_a \cdot \eta \,. \tag{8}$$

При использовании формулы (8) необходимо знать закон изменения относительной ФПК η как функции прикладываемого давления *p*. В простейшем случае, для малых пластических деформаций, зависимость ФПК от давления *p* имеет линейный характер [4]:

$$\eta = \frac{p}{c\sigma_s}\,, \tag{9}$$

где $c \approx 3$ – коэффициент.

Приняв, что на ФПК выполняется закон трения Зибеля в форме (4), из аналитической зависимости (9) получаем

$$\tau = \frac{F_T}{A_н} = \frac{\mu_s}{c}\,p\,. \tag{10}$$

В формуле (10) удельные силы трения τ прямо пропорциональны прикладываемому давлению *p*. Таким образом, при малых пластических деформациях, когда ФПК мала в сравнении с номинальной, из закона трения Зибеля на микроплощадках следует закон трения Кулона на макроплощадках. Такой подход может описывать начальную стадию процесса нагружения.

В более общей теоретической постановке вопрос взаимосвязи ФПК и действующих давлений при пластическом деформировании материала с шероховатой поверхностью рассмотрен Е. М. Макушком [5]. Взаимное влияние деформируемых неровностей при течении приводит для шаровых неровностей к следующему решению:

$$p = \beta\sigma_s \ln\frac{A_н}{A_н - A_r}\,, \tag{11}$$

где β = 1,15 – коэффициент, учитывающий объемный характер нагружения.

Решив уравнение (11) относительно отношения $A_r/A_н$, получаем

$$\frac{A_r}{A_н} = 1 - \exp\left(-\frac{p}{\beta\sigma_s}\right). \tag{12}$$

Подстановка (12) в (8) приводит к следующей функции, связывающей удельные силы трения τ с контактным давлением *p:*

$$\tau = \mu_s\sigma_s\left(1 - \exp\left(-\frac{p}{\beta\sigma_s}\right)\right). \tag{13}$$

Уравнения (12) и (13) показывают стремление к насыщению контактных поверхностей ($A_r/A_н$) $\to$ 1 при $p \to \infty$ и приближению удельных сил трения к некоторым предельным значениям ($\mu_s\sigma_s$).

Проанализируем взаимосвязь коэффициента μ_s (или фактора *m*) трения Зибеля с коэффициентом трения *f* Кулона.

В формуле (10) удельные силы трения τ прямо пропорциональны прикладываемому давлению p. Соответственно, коэффициент трения Кулона f связан с коэффициентом пластического трения Зибеля μ_s следующей зависимостью

$$f = \frac{\mu_s}{c}. \tag{14}$$

Поскольку $c \approx 3$ [4], то из формулы (14) с учетом (3) следует, что коэффициент пластического трения Зибеля μ_s в три раза больше коэффициента трения Кулона f, а максимальное значение коэффициента трения Кулона f составляет треть от максимального значения μ, т. е. около f_{max}= 0,19 для всех видов контактирующих материалов. Этот вывод близок к имеющимся экспериментальным данным для сухого трения металлов по стали. Вместе с тем, формула (9) является приближенной, поскольку она получена в предположении об идеальном пластическом контакте без учета стадий упругого и стесненного упругопластического деформирования, а также взаимного влияния микронеровностей при пластическом деформировании.

Формулы (6) и (13) также позволяют оценивать в первом приближении возможное значение коэффициента трения Кулона f для начальной стадии деформирования, когда контактное давление мало. Так, разложив функцию (13) в ряд Маклорена с удержанием линейных слагаемых от p, после преобразований получаем

$$\tau \approx \frac{\mu_s}{\beta} p. \tag{15}$$

Коэффициент μ_s/β перед p представляют собой по физическому смыслу коэффициент трения Кулона f. Рассуждая аналогично, из формулы Леванова (6) путем разложения ее в ряд Маклорена и удержания линейных членов можно записать

$$\tau \approx \frac{m}{\sqrt{3}} \cdot 1,25 p = 1,25 \mu_s p. \tag{16}$$

Коэффициент трения Кулона, на основании (16), будет

$$f = 1,25 \frac{m}{\sqrt{3}} = 1,25 \mu_s. \tag{17}$$

Недостатком приведенных выше формул (15) и (17) являются существенные завышенные расчетные значения коэффициента трения Кулона, что видно из простейших оценочных расчетов при значении коэффициента μ_s в реализуемом на практике диапазоне μ_s = 0,45 – 0,577.

Заключение.

Результаты выполненных исследований позволили осуществить теоретическое обоснование взаимосвязи коэффициентов трения Зибеля и Кулона на основе адгезионной теории трения и моделей пластического деформирования шероховатых поверхностей. При этом модель идеального пластического контакта дает расчетные значения, приближающиеся к экспериментальным. Для повышения точности расчетов необходимо разрабатывать более строгие модели, учитывающие особенности стесненного упругопластического деформирования на начальной стадии нагружения. Результаты исследований могут быть использованы в учебном процессе при изучении триботехнических дисциплин, а также в инженерной и научно-исследовательской практике.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Боуден, Ф. П. Трение и смазка твердых тел. / Ф. П.Боуден, Д. Тейлор; пер. с англ. Н. М.Михина и А. А.Силина; Под ред. И. В.Крагельского. – М. : Машиностроение, 1968. – 544 с.

2. Свириденок, А. И. Механика дискретного фрикционного контакта / А. И. Свириденок, С. А. Чижик, М. И. Петроковец – Минск : Наука и техника, 1990. – 272 с.

3. Леванов, А. Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А. Н. Леванов [и др.]. – М. : Металлургия, 1975. – 416 с.

4. Барсуков, В. Г. Трибомеханика дисперсных материалов. Технологические приложения / В. Г. Барсуков, Б. Крупич. – Гродно: - ГРГУ, 2004. – 240 с.

5. Макушок, Е. М. Механика трения / Е. М. Макушок – Минск : Наука и техника, 1974. – 256 с.

УДК 621

ДИАГНОСТИКА СТАРЕНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ С ПОМОЩЬЮ КАПЕЛЬНОГО ТЕСТА (МЕТОД BLOTTER SPOT)

В. М. Голуб[1], Д. В. Теслюк[1], В. В.Колодич[2], Ю .А.Добрияник[2], А.В. Мартынов[2]

[1]Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь

[2]ОАО «ЦВЕТОТРОН», г. Брест, Республика Беларусь

Качество смазывающего материала имеет колоссальное значение в любой отрасли машиностроения. Моторное масло защищает детали двигателя от износа и обеспечивает слаженную работу механизмов, смазывая рабочие узлы и снижая силу трения между сопряженными элементами. Также оно охлаждает мотор и очищает его от продуктов сгорания топлива.

Моторное масло, изготовленное из непригодного и дешевого сырья или с допущением других нарушений, не только хуже выполняет свои функции, но и наносит вред двигателю. Оно сокращает срок эксплуатации механизмов и может привести к поломке и их последующему дорогостоящему восстановлению.

Сейчас некачественное и поддельное или, как его еще называют, контрафактное моторное масло выпускается в огромных количествах. От подделок страдают не только потребители, но и сами производители смазочных материалов, теряющие свою прибыль.