

**МИКРОКОНТАКТНАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОСВЯЗИ  
КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ ЗИБЕЛЯ И КУЛОНА**

*Барсуков<sup>1</sup> В. Г., Веремейчик<sup>2</sup> А. И.*

*<sup>1</sup> Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиноведения  
и технической эксплуатации автомобилей УО «Гродненский государственный  
университет имени Янки Купалы», г. Гродно, Республика Беларусь  
v.g.barsukov@grsu.by*

*<sup>2</sup> Кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой  
теоретической и прикладной механики УО «Брестский государственный технический  
университет», г. Брест, Республика Беларусь, vai\_mrtm@bstu.by*

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, что обусловлено сложностью протекающих в зоне фрикционного контакта явлений. Все это затрудняет возможность выполнения триботехнических или триботехнологических расчетов.

В литературе используется достаточно большое количество расчетных моделей, которые с тех или иных позиций устанавливают взаимосвязь между нормальным и тангенциальным напряжением в зоне контакта, площадью фактического контакта и свойствами материала [1–3]. Теоретические исследования основаны преимущественно на законе трения Амонтона – Кулона, который устанавливает линейную (через коэффициент  $f$ , называемый далее коэффициент трения Кулона) зависимость удельных сил трения  $\tau$  от давления  $p$  в зоне контакта. В обработке металлов давлением применяется также подход, основанный на законе пластического трения Зибеля, согласно которому удельные силы трения не зависят от контактного давления, а составляют некоторую часть (вычисляемую через коэффициент  $m$ , называемый также фактором трения) от предела текучести материала на сдвиг. Известны также нелинейные зависимости удельных сил трения от давления, согласующиеся в области низких давлений с законом трения Амонтона – Кулона, а в области высоких давлений – с моделью пластического трения Зибеля. Обзор этих исследований приведен в работе [1]. Вместе с тем, из опубликованных работ не ясно, существует ли взаимосвязь коэффициента (или фактора) трения Зибеля с коэффициентом трения Кулона.

Цель работы – на основе микромеханического моделирования параметров упругопластического контактного взаимодействия выступов шероховатости поверхностей с использованием адгезионной теории трения установить взаимосвязь коэффициентов трения Зибеля и Кулона. Методика исследований включала теоретическое обоснование взаимосвязи коэффициентов трения Зибеля и Кулона с использованием микроконтактной модели упругопластического деформирования шероховатых поверхностей и адгезионной теории трения, основанной на выдвинутом Ф. П. Боуденом и Д. Тейбором положении о том, что вступающие в контакт неровности образуют «мостики схватывания» благодаря адгезии на пятнах контакта [4]. Шероховатости моделировались сферическими микровыступами. На основе принятой модели микроконтактного взаимодействия определены силовые параметры перехода от стесненного упругопластического деформирования к свободному пластическому течению с учетом действия закона трения Зибеля на модельных пятнах касания. Выполнен переход от контактных давлений и удельных сил трения на единичных пятнах касания к осредненным номинальным давлениям и удельным силам трения. Получена аналитическая зависимость, связывающая коэффициенты трения Зибеля и Кулона, а также коэффициент Пуассона наиболее мягкого материала пары трения.

На примере углеродистых и легированных сталей, а также цветных металлов и сплавов произведена расчетная оценка взаимосвязи коэффициентов трения Зибеля и Кулона для широкого диапазона изменения коэффициента Пуассона. Выполнены оценочные расчеты коэффициентов трения Кулона для широкого диапазона изменения коэффициентов пластического трения Зибеля и коэффициента Пуассона. Диапазон изменения коэффициентов Пуассона принят в соответствии с имеющимися в литературе данными для углеродистых ( $\nu = 0,24 - 0,28$ ) и легированных ( $\nu = 0,25 - 0,30$ ) сталей, а также меди и бронзы ( $\nu = 0,31 - 0,35$ ). Для оценочных расчетов коэффициента пластического трения Зибеля  $\mu_s$  выбран диапазон  $\mu_s = 0,45 \dots 0,577$ , верхнее значение которого ( $\mu_s = 0,577$ ) соответствует идеальному контакту ювенильных поверхностей, когда реализуется условие сдвига по Прандтлю. Меньшие значения  $\mu_s$  соответствуют условию существования на контактной поверхности окисных пленок и адсорбированных слоев. Рассчитанные оценочные значения коэффициентов трения Кулона для сталей и цветных металлов находятся в диапазоне, который согласуется с имеющимися экспериментальными данными для сухого трения гладко обработанных (полированных) поверхностей. Так, для сухого трения сталей конструкционных коэффициенты трения скольжения гладко обработанных (полированных) несмазанных поверхностей составляют  $f = 0,16 - 0,20$ , а для трения пары сталь-бронза этот коэффициент находится в диапазоне  $f = 0,10 - 0,14$ . Согласование экспериментальных и расчетных оценочных значений свидетельствует о корректности принятой расчетной схемы и полученных на ее основе результатов. Проведенные исследования позволяют решать другую трудоемкую и методически сложную для иных расчетных схем обратную задачу – производить расчетную оценку коэффициента и «фактора» трения Зибеля по известным значениям коэффициентов трения Кулона и коэффициента Пуассона.

Результаты исследований могут быть использованы в учебном процессе при изучении триботехнических дисциплин, а также в инженерной и научно-исследовательской практике.

#### **Список использованных источников**

1. Барсуков, В. Г. Трибомеханика дисперсных материалов. Технологические приложения / В. Г. Барсуков, Б. Крупич. – Гродно : ГрГУ, 2004. – 240 с.
2. Mroz, Z. Constitutive model of adhesive and ploughing friction in metal - forming processes / Z. Mroz, and S. Stupkiewicz – Int. J. Mech. Sci. – 1998. – Vol. 40. – pp. 281–303.
3. Wagoner R.H., Chenot J-L. Fundamentals of Metal Forming, – NY: John Wiley, 1997 – 389 p.
4. Bowden F. P. and Tabor D. Friction and Lubrication of Solids / F. P. Bowden and Tabor D. – London : Oxford University Press, 1954. – 424 p.