**Коэффициент трения при качении со скольжением.**

Геккер Л.В.

Фрикционные свойства (зависимости коэффициента трения от контактных параметров и реологических характеристик используемых масел) являются необходимыми исходными данными при проектировании зубчатых и фрикционных передач, кулачковых механизмов и подшипников. КПД, надежность машин и механизмов зависят от износофрикционных характеристик силовых контактов деталей, существенное влияние на изнашивание которых оказывают силы трения. В зубчатых зацеплениях месту возникновения максимальных сил трения соответствует зона минимальной контактной прочности зубьев, а изменение предела контактной прочности (по усталости) при качении со скольжением поверхностей зависит от изменения максимальных коэффициентов трения. При расчетах бесступенчатых фрикционных передач выяснение фрикционных свойств в основном силовом контакте является исключительно важным. Отклонение от истинных коэффициентов трения в любую сторону при проектировании механизма затягивания фрикционных тел ведет к нежелательным результатам: заниженные результаты приведут к перегрузке рабочих тел, снижению КПД и долговечности передачи, а завышенные сделают ее неработоспособной (передача будет буксовать). В связи с тем, что для условий работы зубчатых и фрикционных передач, подшипников качения и скольжения и других механизмов характерен контактно-гидродинамический режим смазки, теоретической основой широких экспериментальных исследований катящихся со скольжением в масляной среде тел является эластогидродинамическая теория смазки.

Бесступенчатое и независимое регулирование скоростей вращения каждого образца в экспериментах позволило установить значения коэффициента трения во всем диапазоне изменения скоростей скольжения от равного нулю до критического значения, при котором происходило заедание поверхностей.

На графике зависимости коэффициента трения скольжения от скорости скольжения можно выделить четыре области: область малых скоростей скольжения, характеризующуюся возрастанием коэффициента трения с ростом скорости скольжения; область уменьшения коэффициента трения при уве личении скорости скольжения; область малого изменения коэффициента трения при изменении скорости сколь жения и область катастрофического разрушения смазочного слоя и контактирующих поверхностей (заедания), быстрого роста коэффициента трения. Узлы трения, работающие в условиях качения со скольже нием деталей, могут функционировать без внезапного аварийного износа в диапазоне скольжений до возникновения заедания.Анализ результатов экспериментов показал, что характер зависимости коэффициента трения от скорости скольжения определяется главным образом вязкостью масла на поверхностях тел, вступающих в контакт. Увеличение вязкости приводит к более резкому росту коэффициента трения в области малых скольжений и его резкому падению при дальнейшем увеличении скорости скольжения. С увеличением вязкости масла, вступающего в контакт, растет предельная скорость скольжения, соответствую щая катастрофическому разрушению масляной пленки. Характер зависимости сохраняется при точечном и линейном начальном касаниях образцов. Установленные зависимости коэффициента трения от суммарной скорости качения при начальном касании Тел в точке и по линии можно характеризовать следующим образом: с увеличением суммарных скоростей качении коэффициент трения уменьшается; степень влияния скоростей качения зависит от уровня давлений; уменьшение коэффициента трения со скоростью качения более значительно при меньших абсолютных значениях скоростей качения (до vΣk = 1,5-2 м/с).

При низких скоростях качения и вязкости масла коэффициент трения с увеличением давлений сначала уменьшается и затем, в области высоких давлений, перестает от них зависеть. Для высоких скоростей качения и больших значений вязкости масла с ростом контактных давлении было установлено начальное увеличение коэффициента трения; при высоких σн коэффициент трения практически не изменялся. При некоторых сочетаниях вязкости масла и суммарных скоростей качения коэффициент трения те зависит от давления в контакте. Факторы, способствующие установлению контактно-гидродинамического режима смазки, увеличению толщины масляной пленки, приводят к незначительному росту коэффициента трения f с увеличением контактных давлении. При высоких напряжениях, характерных особенно для точечного начального касания тел, было установлено малое влияние давлений на коэффициент трения. Снижение размера масляного слоя и увеличение шероховатости поверхностей приводит к уменьшению f с ростом контактных давлений. В области высоких контактных давлений коэффициент трения изменяется незначительно.

С ростом приведенного радиуса кривизны твердых тел коэффициент трения скольжения уменьшается. Эта зависимость проявляется особенно четко в области малых значений радиуса кривизны. При постоянной нагрузке увеличение приведенного радиуса кривизны приводит к уменьшению контактных напряжений, увеличению толщины смазочного слоя и площадки контакта, однако одновременно растет время пребывания частичек масла в контакте, что способствует появлению деструкции и полимеризации смазочной среды.

Для нелегированных нефтяных масел влияние температуры на коэффициент трения проявляется через изменение вязкости масла. Для масел с присадками такая непосредственная связь может нарушаться и закономерности будут иметь более сложный характер. Экспериментально установлено, что характер и степень влияния вязкости масла зависит от других контактных параметров и прежде всего от контактного давления и скорости скольжения. Увеличение скорости скольжения до значении, превышающих соответствующих максимальному коэффициенту трения, приводило всегда к тому, что с уменьшением вязкости маета коэффициент трения увеличивался. Большим скоростям скольжения соответствовала большая степень изменения коэффициента трения при вариации вязкости масла. Увеличение контактного давления несколько уменьшало влияние вязкости маета на коэффициент трения. В области максимальных коэффициентов трения это влияния было незначительным. На хорошо приработанных поверхностях с увеличением температуры масла максимальный коэффициент трения снижается. Увеличение скоростейкачения приводит к некоторому уменьшению влияния вязкости на коэффициент трения.Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что при контактно-гидродинамическом режиме трения основным показателем, характеризующим влияние масла на коэффициенты трения, является его вязкость и пьезокоэффициент вязкости. Правильность этих выводов подтверждена проведенными экспериментами на двух маслах, изготовленных по одинаковой технологии, но с присадками разных заводов и из нефти различных месторождений. Масла отличались только по химическому составу и технологии изготовления присадок. При эксплуатации на одном масле был зафиксирован в несколько раз больший износ зубчатых передач (истирание зубьев), чем на другом, однако одинаковые вязкостно-температурные характеристики этих масел обусловили равные силы трения в экспериментах.

Приближенный расчет коэффициента трения скольжения можно осуществить по формуле:

,

где А — размерный коэффициент, численно равный 4,5·105; σн — максимальное контактное давление по Герцу, МПа; HB — твердость по Бринеллю менее твердого из контактирующих материалов, МПа, Rа — среднее арифметическое отклонение профиля шероховатостей поверхности более твердого тела, м; Е' — приведенный модуль упругости . материалов, МПа; Rпр — приведенный радиус кривизны, м; v — вязкость масла при температуре вступающих в контакт поверхностей, м2/с; vΣк — суммарная скорость качения, м/с; vs — скорость скольжения, м/с. Формула применима при V > 10-6 м2/с; σн >300 МПа; НВ > 500 МПа; Rпр >0,005 м и скоростях скольжения, больших соответствующих максимальному значению коэффициента трения.

Разработанная зависимость для определения коэффициента трения от контактных параметров и реологических свойств используемого масла нашла применение в расчетах на прочность, при проектировании зубчатых и фрикционных передач, кулачковых механизмов, при определении оптимальных конструктивных параметров быстроходных опор качения.Коэффициент трения в экспериментах изменялся в диапазоне 0,01— 0,1, что характерно для условий работы силовых локальных контактов при качении со скольжением в среде различных масел.При анализе сил трения необходимо учитывать неньютоновские (в частности, вязкоупругие) свойства жидкости, которые слабо влияют на толщину смазочного слоя, поскольку толщина последнего определяется в основном зоной входа его в контакт, где давления и скорости сдвига в смазочном материале малы, но в то же время такие свойства могут оказывать существенное влияние на касательные напряжения в смазочном слое, определяющие силу трения. Большое значение имеют реологические характеристики смазочного материала, находящегося в контакте в условиях высоких контактных давлений, больших скоростей сдвига и высоких температур. Получение таких реологических характеристик масел в вискозиметрах, невозможно, так как, по-видимому, нельзя создать весь комплекс условий, в которых находится смазочный материал в контакте. Например, полученные вискозиметрические данные по временам релаксации будут заметно отличаться от действительных, поскольку не учитывается вся сложность происходящих в контакте процессов: частичной полимеризации, взаимодействия масла с контактирующими поверхностями, разложения молекул смазочного материала и т. д. Поэтому характеристик масел нужен совместный анализ как теоретических, так и экспериментальных исследований состояния смазочного материала в зоне контакта.

**Коэффициент трения при скольжении тел.**

В расчетах энергопотерь, износостойкости, динамических характеристик механизмов с парами скольжения существенное значение имеет правильный учет сил трения. Коэффициент трения скольжения зависит от большого числа факторов, поэтому принятие его в расчетах постоянной величиной может привести к значительным погрешностям результата.

Наибольшее влияние на изменениекоэффициента трения оказывает скорость скольжения, увеличение которой приводит к его снижению. В зоне приближения условий трения к возникновению заедания влияние скорости скольжения уменьшается. Нагрузка в контакте несколько увеличивает коэффициент трения при различных сочетаниях скоростей скольжения тел и вязкости масел. С ростом вязкости масла коэффициент трения уменьшается, причем влияние вязкости более значительно при повышенных скоростях скольжения. Увеличение твердости трущихся тел приводит к росту-коэффициента трения. Влияние твердости более значительно при меньших значениях вязкости масла.

Формула для расчета коэффициента трения скольжения с безразмерным обобщенным фактором имеет следующий вид :

,

где A, B — постоянные числа; N —нагрузка; μ— динамическая вязкость при средней температуре трущихся тел; Rпр – исходный приведенный радиус кривизны (или характерный размер); R1, R2 — соответственно радиусы ролика и сферы ползуна; HВ — твердость по Бринеллю более твердого тела; Е' — приведенный модуль упругости материалов.

При возвратно-поступательном скольжении эксперименты показали существование различных режимов смазки и изменение коэффициента трения в пределах одного цикла движения. Наибольшее значение f соответствует области вблизи мертвой точки, моменту выхода из этого положения, а наименьшее значение — в месте максимальной толщины смазочного слоя, в условиях гидродинамической смазки. Рост нагрузки может качественно изменять режим смазки, но коэффициент трения, как правило, увеличивается Влияние температуры аналогично влиянию нагрузки, так как с ростом температуры область существования гидродинамического режима смазывания уменьшается. Увеличение числа двойных ходов в минуту способствует резкому уменьшению коэффициента трения и увеличению области с гидродинамическим режимом смазки. Например, с увеличением числа двойных ходов с 100 до 500 средний коэффициент трения уменьшился в 2 раза. Существенное влияние оказывает и шероховатость поверхностей трения. При выборе оптимальной шероховат тости необходимо принимать во внимание величину площадки контакта, условия эксплуатации и сорт используемого масла.