

# Определение фактора трения методом последовательного приближения

## Краткие теоретические сведения

### 1 Законы контактного трения

Большинство операций обработки давлением происходит в условиях, когда деформируемый металл контактирует с инструментом. Частицы металла скользят по контактными поверхностям, в результате чего возникает трение.

Величина сил, возникающие в процессе трения, оказывает влияние на следующие параметры:

- Величина деформирующей силы;
- шероховатость и поверхностные дефекты поковки;
- износ инструмента;
- формоизменение заготовки.

Трение называется сухим, если между металлом и инструментом отсутствуют третьи тела (воздух, смазка, окислы). В чистом виде при обработке давлением не используется. Часто сухим трением называют трение при отсутствии смазки, однако в реальности на контактных поверхностях всегда есть следы окислов и загрязнений.

При чисто сухом трении возможно схватывание поверхностей металла и заготовки – т.е. образование поверхностей, по которым вследствие адгезии образуются металлические соединения контактирующих тел.

Жидкостное трение – трение при котором заготовка и инструмент разделены смазочной пленкой толщиной не менее  $10^{-4}$  мм. Для этого вида трения контактное касательное напряжение пропорционально скорости относительного скольжения. Силы трения при таком виде трения минимальны, но реализовать этот вид трения в условиях обработки давлением довольно сложно.

Наиболее распространенный вид трения при обработке давлением – граничное трение, при котором толщина смазочной пленки мала. Неровности контактирующих поверхностей прорывают смазочную пленку, образуя узлы схватывания. Обычно для граничного трения считают касательное напряжение на контакте пропорциональным нормальному (т.н. закон Амонтона – Кулона).

$$\tau_k = \mu \sigma_n$$

Коэффициент пропорциональности  $\mu$ , называемый коэффициентом трения, в общем случае переменен и зависит от многих факторов, в числе которых скорость относительного скольжения, давление на контакте, свойства смазочного слоя и др.

Исследования показывают, что увеличение скорости снижает коэффициент трения. Так, при штамповке на молоте трение обычно ниже, чем

при штамповке на прессе. Опыты также показывают, что вибрации значительно снижают коэффициент контактного трения.

Все эти факторы обычно меняются в процессе обработки даже одной заготовки, поэтому пользуются некоторым осредненным значением коэффициента трения за время деформирования.

Закон Амонтона – Кулона можно использовать при анализе операций обработки давлением только с некоторой оговоркой. Закон Амонтона – Кулона ничем не ограничивает максимальную силу трения: чем больше нормальные напряжения, тем больше величина силы трения. В действительности, и это подтверждается экспериментальными данными, при пластическом деформировании с ростом нормальных напряжений касательные контактные напряжения возрастают первоначально по закону, близкому к линейному, а затем по кривой, асимптотически приближаясь к некоторому постоянному значению.

Трение на контактной поверхности может быть рассмотрено как внешняя нагрузка. Для удовлетворения граничным условиям внутренние силы должны уравновешивать внешние силы на границе. Удельные силы трения, таким образом, должны уравновешиваться касательными напряжениями в деформируемом материале. Однако касательные напряжения, не могут превосходить величины постоянной пластичности  $k$ .

$$\tau_k \leq k = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$$

Следовательно, пользоваться законом Амонтона – Кулона можно только до тех пор, пока удельные силы трения не приблизятся к максимальному значению. Это создает трудности при анализе, поскольку часто заранее сложно предугадать, какова величина удельных сил трения.

Поэтому часто удельное трение при анализе операций обработки давлением задают в долях от максимальной величины касательных напряжений либо в долях от напряжения текучести.

$$\tau_k = mk \quad \text{или} \quad \tau_k = \mu_s \sigma_s$$

Величину  $m$  называют фактором трения. Она изменяется в пределах  $0 \leq m \leq 1$ . Поскольку постоянная пластичности отличается от напряжения текучести на величину постоянного коэффициента, то обе записи закона трения эквивалентны. Следует иметь ввиду, что коэффициент  $\mu_s$  (который также часто называют фактором трения) изменяется в других пределах  $0 \leq \mu_s \leq \frac{1}{\sqrt{3}}$ .

В аналитических расчетах для выбора закона трения исходят из физической сущности задачи или из эксперимента. Если известно экспериментальное распределение удельных сил трения, то его используют при расчетах. Если экспериментальных данных нет, то при ожидаемых малых значениях нормальных контактных давлений (а, следовательно, и малых удельных сил трения) пользуются законом Амонтона – Кулона. Так, в частности, поступают при анализе операций листовой штамповки. При анализе операций горячей и холодной объемной штамповки, где величина контактных давлений и сил трения велика, используют закон Прандтля.

Иногда используют комбинированные законы трения, в частности, закон трения, предложенный А.Н. Левановым на основе обработки большого числа экспериментальных данных:

$$\tau_k = mk \left( 1 - e^{-\beta \frac{\sigma_n}{\sigma_s}} \right)$$

Анализ этой формулы показывает, что при малых значениях отношения нормального напряжения к напряжению текучести закон Леванова близок к закону Кулона, а при больших – к закону Зибеля.

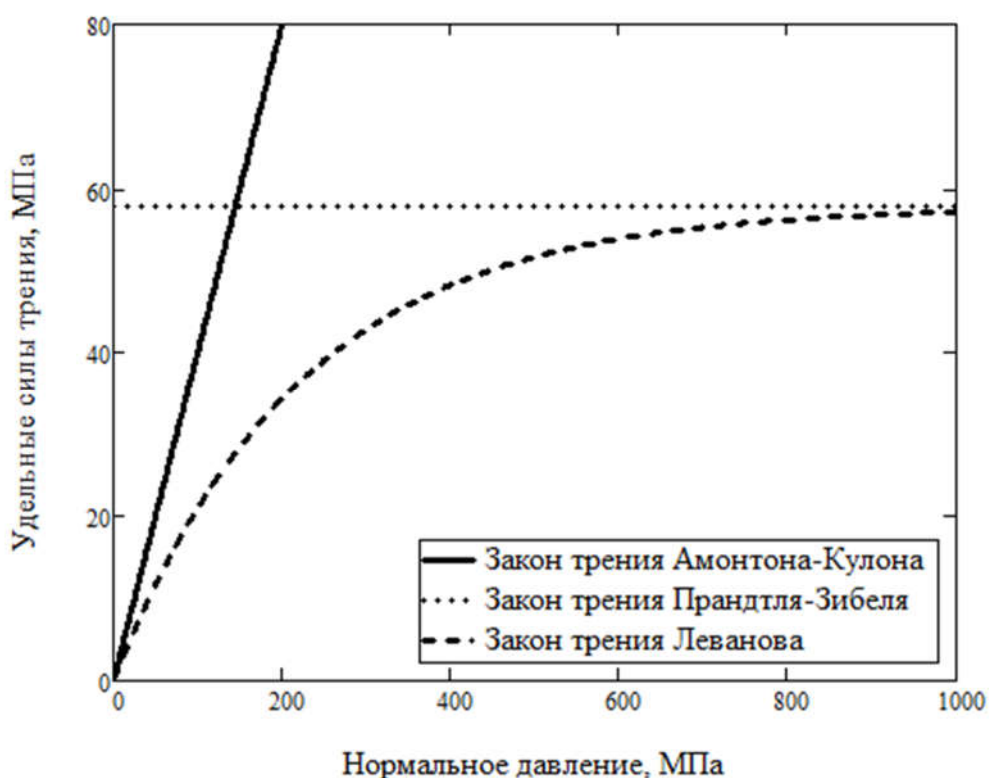


Рисунок 1 – Сравнение различных законов трения

## 2 Методы определения коэффициента и фактора трения

Методы определения коэффициента трения достаточно широко развиты. Существуют стандарты, описывающие методику определения коэффициентов трения и применяемое для этого оборудование. Для определения коэффициента трения используют приборы, называемые трибометрами. Простейший трибометр представлен на рисунке 2. При помощи динамометра измеряется сила тяги, которая по абсолютному значению равна силе трения, таким образом, зная вес бруска, можно определить коэффициент трения.

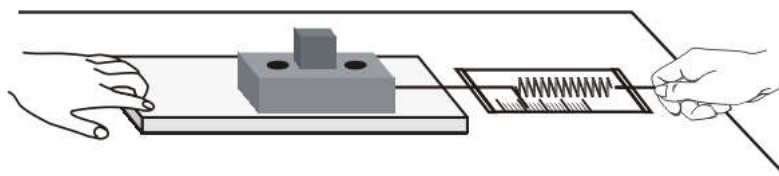


Рисунок 2 – Устройство трибометра

Сложнее обстоит дело с определением фактора трения. Измерение силы трения, а также нормального давления на контактной поверхности представляет собой непростую техническую задачу. Стандартных испытаний для определения фактора трения не существует, однако учеными был предложен ряд методов. Наиболее известными среди них являются методы осадки кольца, прямого выдавливания, выдавливания двойного колпачка, высадки скольжением, высадки с выдавливанием, высадки Т-образного образца (рисунок 3).

Множество исследований показали, что метод осадки кольца, предложенный Мейлом и Кокрофтом в 1964 г., является наиболее простым и надежным для определения фактора трения.

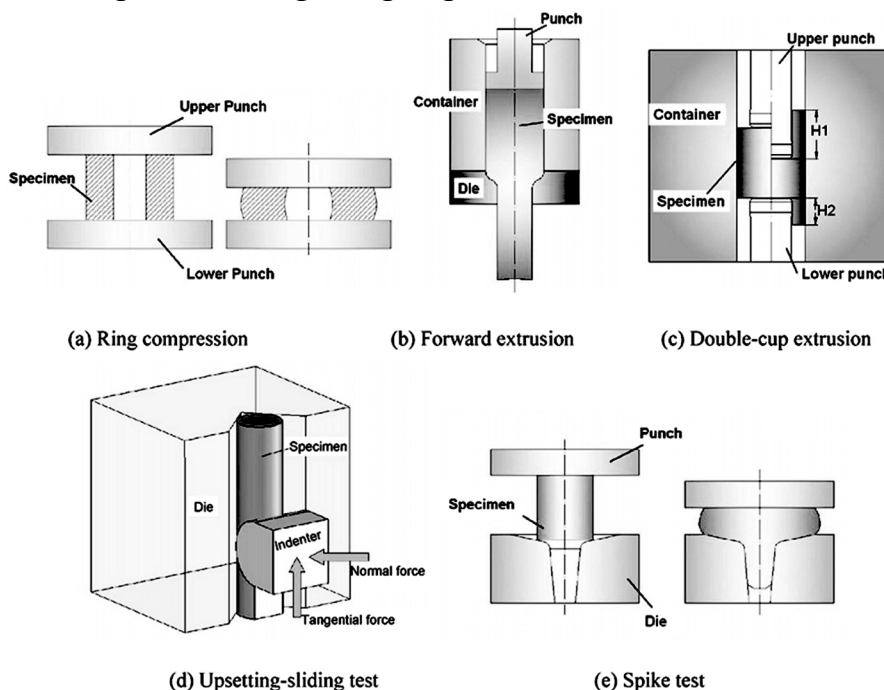


Рисунок 3 – Методы определения фактора трения

### 3 Испытание на осадку кольцевого образца

Метод осадки кольцевого образца заключается в сжатии образца кольцевой формы плоскими бойками. Изменение внутреннего диаметра при заданной степени деформации определяется фактором трения между поверхностью заготовки и инструмента (рисунок 4). Если фактор трения равен нулю, кольцо будет деформироваться без искажения формы, и радиальная скорость каждой точки кольца будет пропорциональна расстоянию от оси. При малом факторе трения будет наблюдаться искажение формы на внутренней и наружной боковой поверхности кольца, при этом при той же степени деформации наружный и внутренний диаметры будут меньше, чем без трения. Если фактор трения значителен, энергетически более выгодно только части металла течь наружу, оставшаяся часть будет течь внутрь. Соответственно, внутренний диаметр будет меньше исходного.

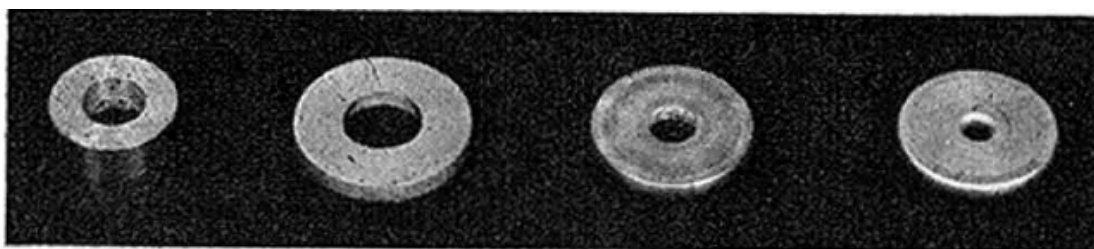


Рисунок 4 – Исходный кольцевой образец и деформированный на 50% при низком, среднем и высоком факторе трения

Таким образом, нейтральная поверхность скоростей может находиться на диаметре меньшем диаметра отверстия кольца, внутри кольца или снаружи (рисунок 5).

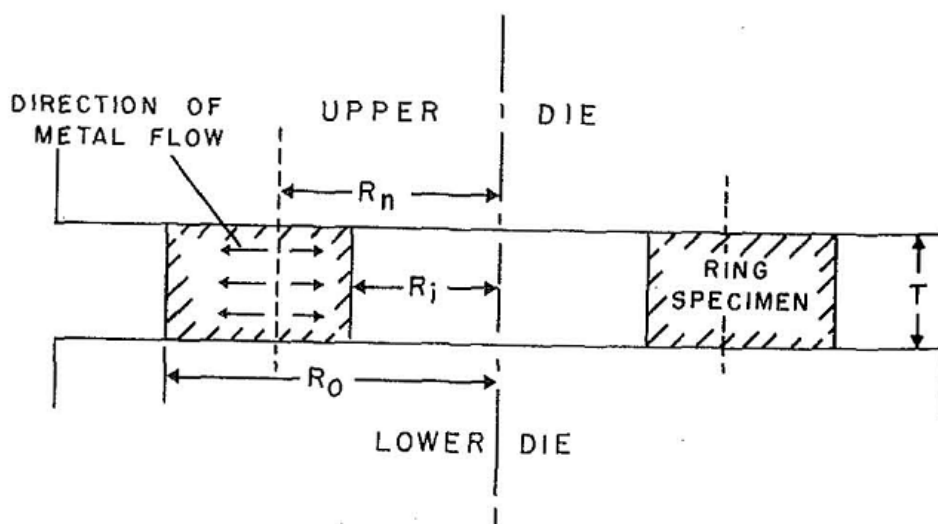


Рисунок 5 – Направление течения металла при осадке кольца

Для определения фактора трения обычно сравнивают внутренний диаметр деформированного на 50% кольца с эталоном, полученным тем или иным образом. Широкое применение нашли номограммы для различных

соотношений начальных размеров колец. Например, номограмма для колец с соотношением наружного диаметра к внутреннему и к высоте 6:3:2, полученная методом верхней оценки, представлена на рисунке 6. Для того, чтобы определить фактор трения, необходимо вычислить относительное изменение внутреннего диаметра и по нему определить  $m$ .

Так как при решении методом верхней оценки принимают множество допущений (например, не учитывают искажение формы), то точность определения фактора трения невысока. Более точно определить фактор трения можно при помощи инверсного анализа (также его называют методом последовательных приближений, методом итераций, методом Ньютона).

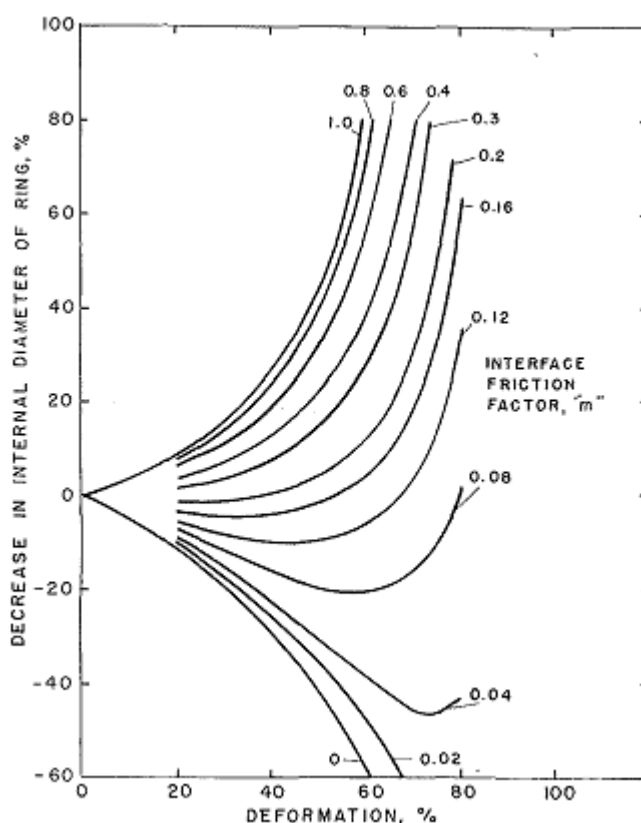


Рисунок 6 – Номограмма для определения  $m$ ,  $D:d:H = 6:3:2$

#### 4 Метод последовательного приближения

Метод последовательного приближения заключается в пошаговом уточнении величины фактора трения. Алгоритм метода представлен на рисунке 7. Вначале необходимо произвольно задаться первым приближением. Далее производится расчет тем или иным методом и сравнивается с полученными экспериментальными данными. В зависимости от полученных результатов величина фактора трения корректируется и последовательность шагов повторяется. Решение считается найденным, когда разница расчетного и измеренного внутреннего диаметра не превышает 0,05 мм.



Рисунок 7 – Алгоритм метода последовательных приближений

### Порядок выполнения работы

1. Измерить заготовку.
2. Обезжирить торцы заготовки и бойков, смазать их при необходимости исследуемой смазкой. Следить, чтобы не было излишней смазки.
3. Установить оснастку в универсальную испытательную машину и осуществить деформирование.
4. Очистить заготовку от смазки и провести замеры.
5. Повторить пункты 1-4 для других видов смазки.
6. При помощи моделирования методом последовательных приближений определить фактор трения.

## Содержание отчета

В отчете приводятся цель и задачи работы, краткие теоретические сведения, последовательность проведения работы, необходимые зависимости, выводы по работе. Также в отчете необходимо отразить процесс итерационного уточнения фактора трения с иллюстрациями.

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу:

№	Смазка	$D_0$ , мм	$d_0$ , мм	$H_0$ , мм	$D_k$ , мм	$d_k$ , мм	$H_k$ , мм	$m$
1								
2								

В выводах по работе следует проанализировать полученные экспериментальные данные и сопоставить их с известными сведениями из теории.

## Контрольные вопросы

1. Чем отличается фактор трения от коэффициента трения?
2. Какие значения могут принимать коэффициент и фактор трения?
3. Имеет ли ограничение удельная сила трения? Если да, то чем она ограничена и почему?
4. От чего зависит величина фактора трения? Как можно управлять фактором трения?
5. В каких технологических операциях формоизменение заготовки сильно зависит от фактора трения?



### **Используемая литература**

1. ASTM D1894-14 Standard Test Method for Static and Kinetic Coefficients of Friction of Plastic Film and Sheeting.
2. ГОСТ 11629-75 Пластмассы. Метод определения коэффициента трения
3. ISO 8295:1995 Plastics – Film and sheeting – Determination of the coefficients of friction