

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРА ТРЕНИЯ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВА ВТ6 ПРИ ПОМОЩИ ИНВЕРСНОГО АНАЛИЗА

А.И. Алимов

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, Россия, г. Москва

Конечное формоизменение и энергосиловые параметры при горячей деформации металлов существенно зависят от контактных сил трения. Влияние трения особенно важно при горячей деформации титановых сплавов из-за их низкой теплопроводности, что приводит к образованию резко неоднородного температурного поля и неоднородной деформации заготовки. Чаще всего для учета трения в процессах горячей деформации металлов используют закон Прандтля-Зибеля, который связывает удельные силы трения с напряжением текучести материала через коэффициент пропорциональности, называемый фактором трения. Непосредственно из эксперимента фактор трения рассчитать невозможно, поэтому для его определения используется инверсный анализ. В работе определялся фактор трения титанового сплава ВТ6 при температуре 920 °С без смазки, а также со смазкой пластинчатым графитом и дисульфидом вольфрама.

## Законы контактного трения

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

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

- а) величина деформирующей силы;
- б) шероховатость и поверхностные дефекты поковки;
- в) износ инструмента;
- г) формоизменение заготовки.

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):

$$\tau_k = \mu \sigma_n \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности  $\mu$ , называемый коэффициентом трения, в общем случае переменен и зависит от многих факторов, в числе которых скорость относительного скольжения, контактные давления, свойства смазочного слоя, шероховатость поверхности 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  $k$ :

$$\tau_k \leq k = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

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 сложно заранее 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.

$$\tau_k = mk \quad \text{или} \quad \tau_k = \mu_s \sigma_s \quad (3)$$

Величину  $m$  называют фактором трения. Он изменяется в пределах  $0 \leq m \leq 1$ . Поскольку постоянная пластичности меньше напряжения текучести в  $\sqrt{3}$  раз, то обе записи закона трения эквивалентны. Следует иметь в виду, что коэффициент  $\mu_s$  (который также часто называют фактором трения) изменяется в пределах  $0 \leq \mu_s \leq \frac{1}{\sqrt{3}}$ .

Закон трения, в котором удельные силы трения зависят от максимального касательного напряжения, был впервые введен немецким механиком и физиком Людвигом Прандтлем, однако часто в литературе носит название закона Э. Зибеля, поскольку он часто им использовался.

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 Амонта – 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:

$$\tau_k = mk \left( 1 - e^{-\beta \frac{\sigma_n}{\sigma_s}} \right) \quad (4)$$

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 Прандтля.

### 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 [ГОСТ 11629-75, ГОСТ 27640-88]. Для определения коэффициента трения используют приборы, называемые трибометрами.

Сложнее обстоит ситуация 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 [Zhang Q., Felder E., Bruschi S., 2009].

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

### 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 1). 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.

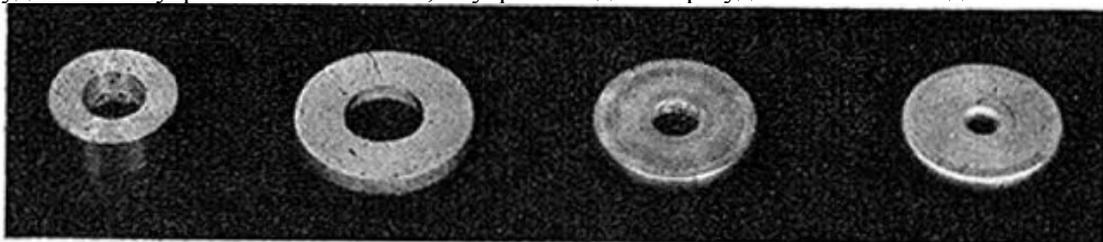


Рисунок 1 – Исходный кольцевой образец и деформированный на 50% при низком, среднем и высоком факторе трения [Male A. T., Depierre V., 1970]

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. Существующие номограммы для определения фактора трения строились методом верхней оценки или методом линий скольжения [Wanheim T., Bay N., Petersen A. S., 1974]. Так как при решении данными методами принимают множество допущений (например, не учитывают искажение формы цилиндра), то точность определения фактора трения невысока. Более точно определить фактор трения можно при помощи инверсного анализа, который заключается в варьировании фактором трения при расчете задачи каким-либо теоретическим методом до тех пор, пока геометрические размеры (или другие параметры) не совпадут с полученными экспериментально. Чем адекватнее будет теоретический расчет, тем более точное значение фактора трения может быть получено. В настоящее время широко применяется метод конечных элементов, который позволяет учитывать нелинейный характер зависимости сопротивления деформации от температуры, деформации и скорости деформации, тепловой эффект деформации, неоднородность деформации и т.д.

### **Определение фактора трения при горячей деформации сплава ВТ6 при помощи инверсного анализа**

Экспериментальные исследования проводились на кольцевых образцах, изготовленных из прутков диаметром 12 мм из сплава ВТ6, произведенных ВСМПО «Ависма». Кольцевые образцы имели наружный диаметр 12 мм, внутренний диаметр 6 мм и высоту 4 мм. Образцы после точения не обрабатывались, поверхность бойков шлифовалась. Внешний вид образцов представлен на рисунке 2.

Определение массовой доли алюминия и ванадия в материале проводилось методом атомно-эмиссионного спектрального анализа на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 с системой элементного анализа Oxford Instruments X-Max 80, а других химических элементов – методом лазерной эмиссионной спектроскопии на спектрометре Спекс Лаэс Матрикс Континуум. Фактический химический состав приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав сплава ВТ6, использованного в исследовании

Fe	C	Si	V	Al	Zr	Ti
0,13	0,05	0,03	4,35	5,90	0,04	основа

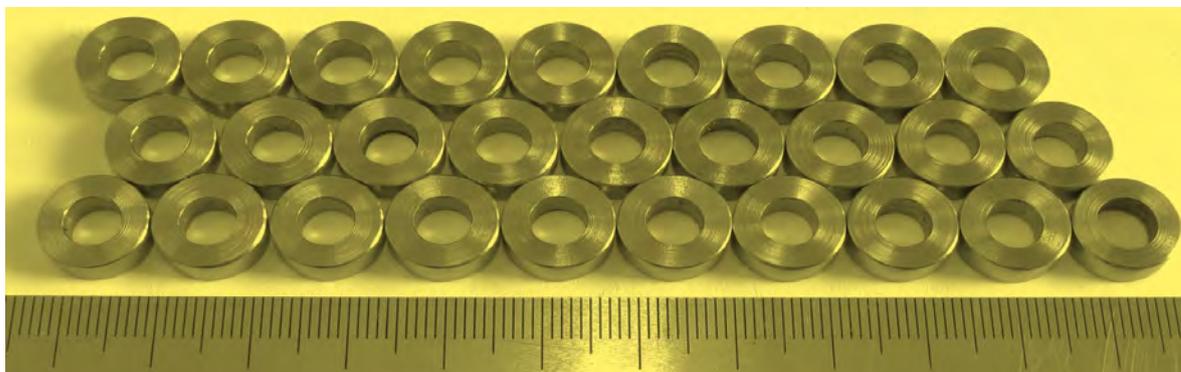


Рисунок 2 – Внешний вид кольцевых образцов до деформации

Осадка образцов осуществлялась на универсальной испытательной машине Zwick Z050, оборудованной печью сопротивления для проведения испытаний при температурах до 1200 °С. Перед испытанием торцы образцов и бойков обезжиривались (образцы 1, 2), либо на них наносился слой смазочного вещества в виде порошка: пластинчатого графита (образцы 3, 4) или дисульфида вольфрама (образцы 5, 6). Далее осуществлялся нагрев до 920 °С со скоростью нагрева 60 °С в минуту. После выдержки в 10 минут осуществлялось деформирование со скоростью 5 мм в минуту до конечной высоты 2 мм. Далее измеряли внутренний диаметр образцов и рассчитывали среднее арифметическое значение для каждой смазки. Внешний вид деформированных образцов представлен на рисунке 3.

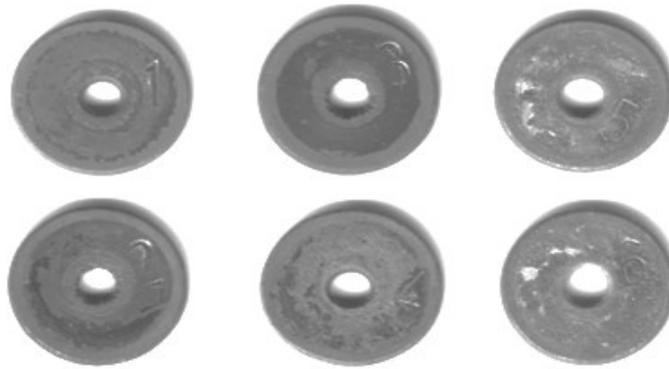


Рисунок 3 – Внешний вид кольцевых образцов после деформации

Математическое моделирование осадки кольцевых образцов осуществлялось методом конечных элементов в программном комплексе Deform 2D. Кривые течения сплава ВТ6 брались из встроенной базы данных материалов. Заданные размеры образцов и режим деформирования совпадали с экспериментальными. Проводилась серия расчетов с различными значениями фактора трения от 0 до 1 с шагом 0,025. Путем измерения внутреннего диаметра деформированного образца и вычисления его отношения к исходному был построен график зависимости относительного изменения внутреннего диаметра от фактора трения (рисунок 4). В расчете учитывалась неоднородность деформации, явления упрочнения (разупрочнения) материала, тепловой эффект деформации.

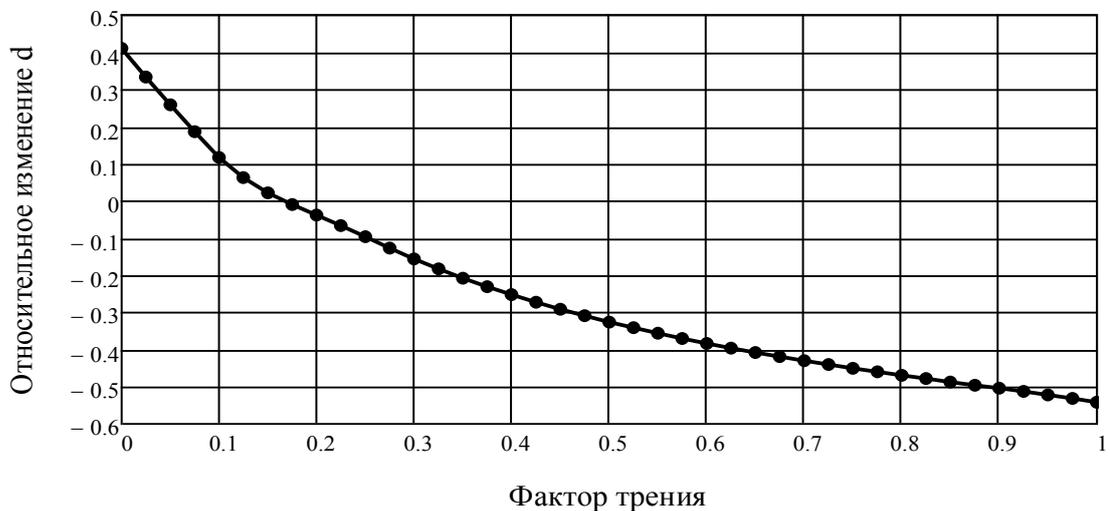


Рисунок 4 – График зависимости относительного изменения внутреннего диаметра от фактора трения при осадке кольцевого образца

Далее путем сравнения относительного изменения внутреннего диаметра экспериментальных образцов с результатами моделирования определялся фактор трения, реализуемый при использовании той или иной смазки. Полученные результаты факторов трения при горячей деформации сплава ВТ6 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Факторы трения при горячей деформации сплава ВТ6

Смазка	Фактор трения
Обезжиривание	1,00
Пластинчатый графит	0,92
Дисульфид вольфрама	0,82

#### Список литературы

- ГОСТ 11629-75 Пластмассы. Метод определения коэффициента трения.  
 ГОСТ 27640-88 Материалы конструкционные и смазочные. Методы экспериментальной оценки коэффициента трения.  
 Male A. T. A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation // J. Inst. Metal. – 1964. – Т. 93. – С. 38-46.  
 Male A. T., Depierre V. The validity of mathematical solutions for determining friction from the ring compression test // Journal of Tribology. – 1970. – Т. 92. – №. 3. – С. 389-395.  
 Wanheim T., Bay N., Petersen A. S. A theoretically determined model for friction in metal working processes // Wear. – 1974. – Т. 28. – №. 2. – С. 251-258.  
 Zhang Q., Felder E., Bruschi S. Evaluation of friction condition in cold forging by using T-shape compression test // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Т. 209. – №. 17. – С. 5720-5729.