

УДК 621.7.011

Лаптев А. М.
Ткаченко Я. Ю.
Жабин В. И.

ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ В ФОРМУЛЕ ЛЕВАНОВА ПО МЕТОДУ ОСАДКИ КОЛЬЦА

Трение играет важную роль в процессах обработки металлов давлением. Во многих случаях эта роль является негативной. Так наличие трения приводит к неоднородности деформации и искажению формы изделий. Трение увеличивает усилие и работу деформирования. Вместе с тем трение является необходимым условием для захвата заготовок валками в процессах прокатки. Присутствие трения позволяет стабилизировать положение поковок на бойках. При выдавливании путем специальной конструкции штампов удается использовать силы трения для уменьшения усилия деформации. Поэтому изучению закономерностей трения в процессах обработки металлов давлением уделяется большое внимание.

В настоящее время в теории обработки металлов давлением применяются в основном закон трения Кулона и формула Зибеля. Закон трения Кулона предполагает, что напряжение трения τ_f прямо пропорционально нормальной компоненте напряжения σ_n , действующего на контактной поверхности инструмента и заготовки. Этот закон выражается формулой:

$$\tau_f = \mu \cdot \sigma_n, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения. Закон трения Кулона целесообразно применять при небольших значениях контактных напряжений, характерных, например, для процессов листовой штамповки. В этих процессах напряжение σ_n существенно меньше напряжения текучести обрабатываемого материала σ_s . В процессах объемной штамповки и прессования контактные напряжения соизмеримы или даже превышают величину σ_s . В этом случае физический характер трения изменяется, а закон Кулона дает завышенные значения напряжения трения τ_f . Поэтому для описания трения в таких процессах чаще применяют формулу, впервые предложенную Зибелем. Эта формула предполагает, что напряжение трения пропорционально напряжению текучести обрабатываемого материала при чистом сдвиге k :

$$\tau_f = m \cdot k. \quad (2)$$

Величина k пропорциональна напряжению текучести обрабатываемого материала и равна $\sigma_s / \sqrt{3}$. Коэффициент m в формуле (2) называется фактором трения и теоретически может изменяться от 0 до 1.

На практике, однако, часто бывает неясно, какой из двух приведенных выше формул следует пользоваться для анализа того или иного процесса обработки металлов давлением. Кроме того, при компьютерном моделировании этих процессов для описания влияния трения технически целесообразно пользоваться одной универсальной зависимостью. Такая зависимость была предложена А. Н. Левановым в виде [1]:

$$\tau_f = m_l \cdot k \cdot \left(1 - e^{-1.25 \cdot \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_s} \right)} \right), \quad (3)$$

где m_l – аналог коэффициента или фактора трения. Формула Леванова была использована при написании программы QForm, разработанной для компьютерного моделирования процессов объемной штамповки по методу конечных элементов [2].

Целью данной работы является определение коэффициента трения по законам Зибеля, Кулона, Леванова методом осадки кольца и выявление соотношения между полученными значениями.

Рассмотрим соотношение между формулами (1), (2) и (3) более подробно. Для этого преобразуем сначала зависимости (1)–(3) следующим образом:

$$\frac{\tau_f}{\mu \cdot \sqrt{3} \cdot k} = \frac{\sigma_n}{\sigma_s}; \quad (4)$$

$$\frac{\tau_f}{m \cdot k} = 1; \quad (5)$$

$$\frac{\tau_f}{m_l \cdot k} = 1 - e^{-1.25 \cdot \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_s}\right)}. \quad (6)$$

В формуле (4), отвечающей закону трения Кулона, введем обозначение $\mu_k = \mu \cdot \sqrt{3}$. С учетом этого данная формула принимает вид:

$$\frac{\tau_f}{\mu_k \cdot k} = \frac{\sigma_n}{\sigma_s}. \quad (7)$$

На рис. 1 показаны графики, построенные по формулам (5), (6) и (7). Сравнение этих графиков показывает, что при малых значениях относительного контактного напряжения σ_n/σ_s , примерно до величины 0,5, формула Леванова соответствует закону Кулона, если принять в ней $m_l = \mu \cdot \sqrt{3}$. При больших значениях относительного контактного напряжения, примерно от величины 3,0 и выше, формула Леванова соответствует формуле Зибеля, если принять в ней $m_l = m$. В диапазоне значениях относительного контактного напряжения от 0,5 до 3,0 формула Леванова описывает переходной режим от механизма трения по Кулону к механизму трения по Зибелю.

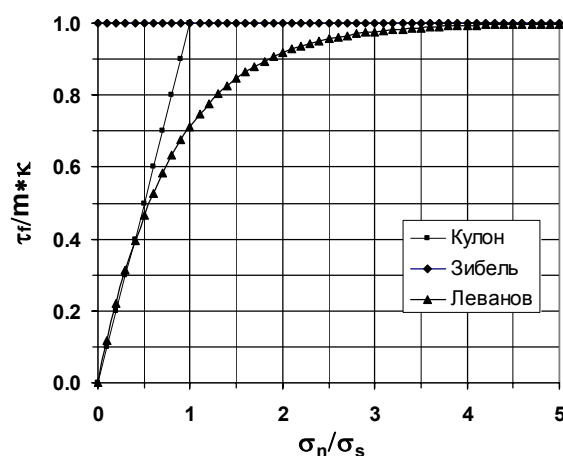


Рис. 1. Зависимости относительного напряжения трения от величины относительного контактного давления, построенные по формулам (5)–(7)

Для экспериментального определения коэффициента m_l в формуле Леванова можно использовать известную методику осадки кольцевых образцов [3]. Метод основан на чувствительности изменения внутреннего диаметра кольца к условиям контактного трения. При незначительном трении внутренний диаметр кольца увеличивается, а при большом трении он уменьшается.

Согласно данному методу кольцевой образец фиксированных размеров (обычно $20 \times 10 \times 7$ мм³) подвергается ступенчатой осадке. После каждой ступени осадки измеряется внутренний диаметр кольца и его высота. Вычисляются относительное изменение величины внутреннего диаметра кольца и относительная деформация по высоте образца. Полученные данные наносятся на тарировочную диаграмму, и после этого определяется коэффициент или фактор трения. Тарировочные диаграммы строятся по результатам теоретического анализа процесса осадки кольцевых образцов. В литературе приведены тарировочные диаграммы для определения коэффициента трения в законе Кулона и фактора трения в формуле Зибеля [4]. Вместе с тем, нам не известны литературные источники, в которых были бы приведены тарировочные диаграммы для определения коэффициента m_l в формуле Леванова. Чтобы восполнить этот пробел, нами было проведено моделирование осадки кольцевых образцов по методу конечных элементов. Для моделирования применялась программа QForm 4.3 [2]. В качестве объекта моделирования рассматривался кольцевой образец из стали 3 с указанными выше начальными размерами. В процессе моделирования применялись различные условия трения, которые характеризовались коэффициентом m_l . На рис. 2 показаны расчетные контуры образцов при относительной деформации 0,6 для различных условий трения и соответствующие им сетки линий Лагранжа. Из рисунка наглядно видно как трение влияет на характер течения металла и изменение внутреннего диаметра кольца. Так при отсутствии трения ($m_l = 0$), линии сетки Лагранжа остаются прямыми и внутренний диаметр кольца значительно увеличивается. При $m_l = 0,2$ линии сетки Лагранжа изгибаются в сторону наружной поверхности кольца, а его внутренний диаметр остается практически неизменным. При $m_l = 0,7$ часть линий сетки Лагранжа изгибается в сторону наружной поверхности кольца, а другая часть в сторону внутренней поверхности кольца. Внутренний диаметр кольца при этом уменьшается.

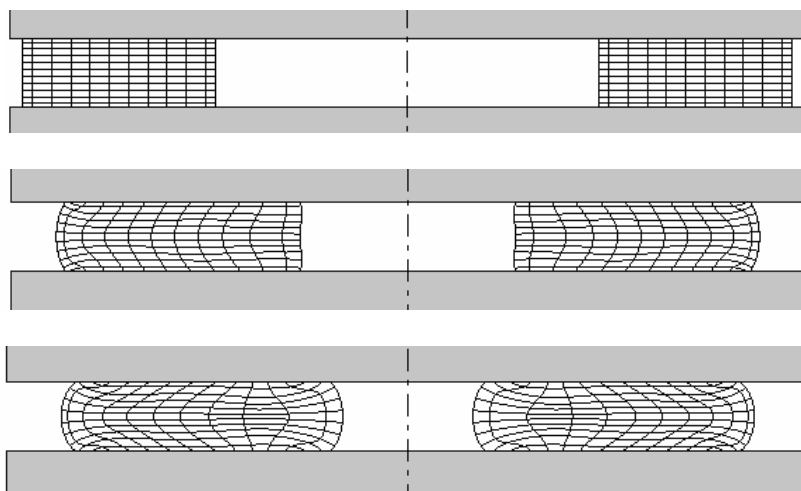


Рис. 2. Контурные кольцевых образцов, полученные моделированием по методу конечных элементов при деформации $m_l = 0; 0,2$ и $0,7$

По результатам этого анализа и с использованием формулы Леванова была построена диаграмма, включающая графические зависимости между деформацией при осадке и внутренним диаметром образца для разных значений коэффициента трения Леванова, которая приведена на рис. 2. Нанося точки, полученные экспериментально, на эту диаграмму, можно определить коэффициент трения. В качестве примера, на диаграмме приведены точки, полученные нами в результате испытания образца с обезжиренными ацетоном контактными поверхностями и образца, торцы которого были смазаны солидолом. Как следует из диаграммы, коэффициент трения в формуле Леванова в первом случае равен 0,5, а во втором случае около 0,07.

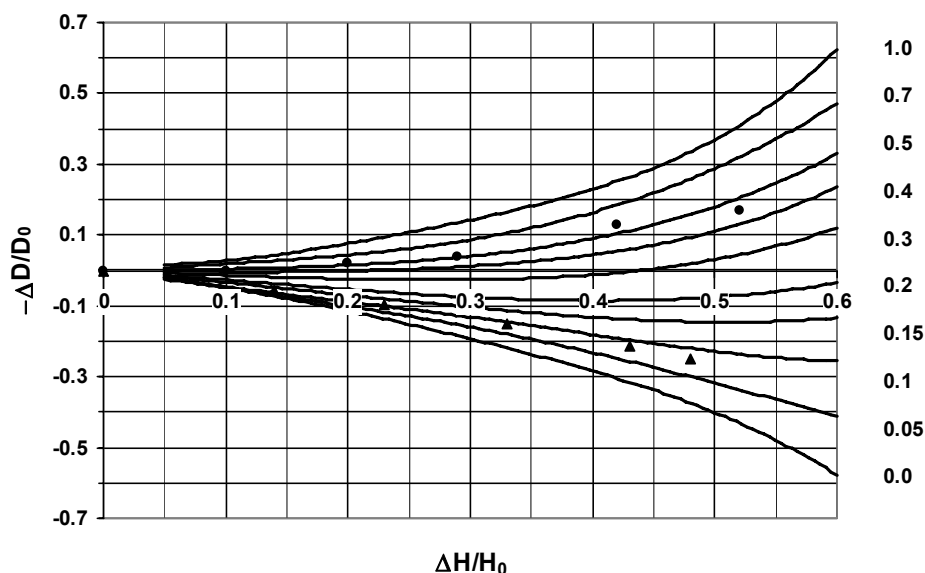


Рис. 3. Диаграмма для определения коэффициента трения m_l в формуле Леванова. Последовательность значений коэффициента m_l в легенде соответствуют порядку кривых на диаграмме. Точки соответствуют экспериментальным данным, полученным для обезжиренных стальных образцов (●) и для стальных образцов, смазанных солидолом (▲)

ВЫВОДЫ

Теоретический анализ показал, что в диапазоне относительного контактного давления от 0 до 0,5 формула Леванова соответствует закону трения Кулона. При относительном контактном давлении выше 3,0 формула Леванова соответствует формуле Зибеля. При промежуточных значениях относительного контактного давления формула Леванова описывает переходной режим от механизма трения по Кулону к механизму трения по Зибелю.

Путем моделирования осадки кольцевого образца фиксированных размеров с помощью программы QForm 4.3 построена диаграмма для экспериментального определения коэффициента трения в формуле Леванова. Построенная диаграмма может быть использована для определения параметров трения для различных материалов и условий нагружения с целью последующего использования полученных данных для моделирования процессов обработки давлением, в частности в среде QForm.

ЛИТЕРАТУРА

1. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А. Н. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин, Б. Р. Картак, Ю. В. Ашпур, Ю. И. Спаский. – М. : Металлургия, 1976. – 416 с.
2. Qform-2D/3D. Программа моделирования объемной штамповки. Версия 4.3. 2D расчет. – ООО «КванторФорм», 1991–2008. – 152 с.
3. Male A. T. Method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation / A. T. Male, M. G. Cockroft // Journal of the Institute of Metals. – 1964. – V. 93. – P. 38–46.
4. Wagoner R. H. Fundamentals of Metal Forming / R. H. Wagoner, J-L. Chenot. – NY: John Wiley, 1997. – 389 p.

Лаптев А. М. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой МТиТОМ ДГМА;

Ткаченко Я. Ю. – аспирант ДГМА;

Жабин В. И. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: laptev@dgma.donetsk.ua