

ТРЕНИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ И РЕЗАНИЕМ

Л. М. СЕДОКОВ

(Представлена научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

Характерной особенностью большинства исследований по обработке металлов давлением является отсутствие органического изучения взаимосвязи между деформациями и усилиями, той взаимосвязи, которая имеет место в реальных процессах пластической деформации. Отмечая сказанное, И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев и О. А. Ганаго [1] указывают, что во многих книгах и статьях по обработке металлов давлением следствие рассматривается в отрыве от причин, вызвавших его.

Подобное положение можно отметить и по многим исследованиям пластической деформации при резании металлов. В. Д. Кузнецов [2] писал: «В области зависимости характеристик резания от физических свойств металлов мы имеем почти белое пятно и исследование в этой области нужно проводить с самого начала».

Основная причина создавшегося положения заключается в том, что на величину усилий, осуществляющих пластическую деформацию, весьма существенно сказывается трение между инструментом и обрабатываемым металлом. Поэтому рассмотрение работы трения и соотношения составных частей всей работы, затрачиваемой на осуществление пластической деформации, является интересным как с теоретической, так и с практической стороны.

Работа трения при осадке цилиндра

При осадке цилиндра на его торцах возникает трение, внешним проявлением которого является искажение формы. Однако отсутствие заметной бочкообразности деформированного цилиндра еще не означает отсутствие значительной работы трения.

Рассмотрим два варианта вывода формулы для расчета работы трения. На рис. 1 показана схема процесса осадки цилиндра. Элементарная площадка $2\pi r dr$ в результате деформации увеличится по толщине на величину $e_r dr$ (рис. 1, б), где e_r — относительная радиальная деформация. Тем самым она раздвинет внешнюю заштрихованную часть цилиндра, на торце которой действует сила

$$\tau \pi (R^2 - r^2),$$

где τ — касательные напряжения на торце.

Тогда элементарная работа трения

$$dA_{\text{тр}} = \tau \pi (R^2 - r^2) e_r dr.$$

Вся работа на обоих торцах

$$A_{\text{тр}} = 2\pi \int_0^R e_r \tau (R^2 - r^2) dr.$$

Принимая равномерность деформации по радиусу торца, $|e_r| = 0,5 e_3$ и постоянство касательных напряжений, получим

$$A_{\text{тр}} = \frac{2}{3} \pi e_3 \tau R^3. \quad (1)$$

Вывод формулы (1) можно сделать иначе. На элементарной площадке $2\pi r dr$ действуют касательные напряжения τ . За определенный период деформации эта площадка переместится на расстояние re_r и сила трения, действующая на элементарной площадке, совершит работу

$$dA_{\text{тр}} = 2\pi r dr \tau re_r.$$

Полная работа трения на обоих торцах при тех же допущениях

$$A_{\text{тр}} = 4\pi \int_0^R \tau e_r r^2 dr =$$

$$= \frac{2}{3} \pi e_3 \tau R^3.$$

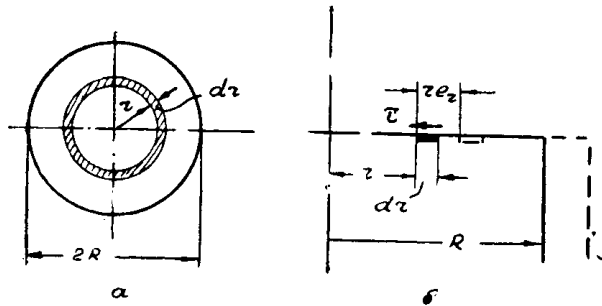


Рис. 1. К расчету работы трения при осадке цилиндра

Общая удельная работа деформации при осадке цилиндра a будет равна произведению среднего давления на торце q на величину деформации. Удельная работа деформации без трения $a_{\text{деф}}$ будет равна произведению среднего нормального напряжения, действующего в поперечном сечении цилиндра на величину деформации e_3 ,

$$a = qe_3 = \sigma e_3 + a_{\text{тр}}.$$

Для получения удельной работы трения необходимо разделить общую работу трения на деформированный объем. Тогда получим широко известную формулу [3]

$$q = \sigma \left(1 + \frac{\mu}{3} \frac{2R}{h} \right), \quad (2)$$

здесь μ — средний коэффициент трения на торцах.

На рис. 2 дана зависимость отношения работы деформации с трением к работе деформации без трения от текущего соотношения диаметра образца к его высоте по формуле (2) для $\mu = 0,1$ и $\mu = 0,25$. Экспериментальные данные в виде отдельных точек даны по опытам М. А. Большаниной и Менделеева [4] при сжатии медных образцов. Напряжения были взяты по эффективным кривым сжатия.

Хотя разброс данных весьма значителен, коэффициент трения укладывается для всех случаев в пределах от 0,1 до 0,25. При рас-

чете принято, что при $h_0:d_0 = 2,0$ осуществляется деформация без существенного влияния трения на усилие деформации, что, очевидно, привело к некоторому занижению работы трения.

Пользуясь изложенной методикой, можно получить формулу для расчета деформирующего напряжения при осадке кольцевых заготовок

$$q = \sigma \left(1 + \frac{\nu}{2} \frac{R - R_0}{h} \right). \quad (3)$$

Здесь R и R_0 — соответственно наружный и внутренний радиус кольцевой заготовки.

Из формулы (3) следует, что при уменьшении толщины заготовки $(R - R_0)$ деформирующее напряжение уменьшается. На рис. 3 приведены результаты опытов А. С. Жибинова, Е. С. Гитмана и А. А. Чапковича, выполненных под руководством автора, по сжатию νq

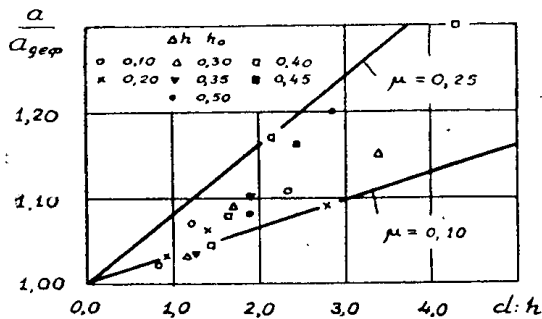


Рис. 2. Зависимость между отношением всей работы к работе деформации без трения и текущими геометрическими размерами деформирующегося цилиндра

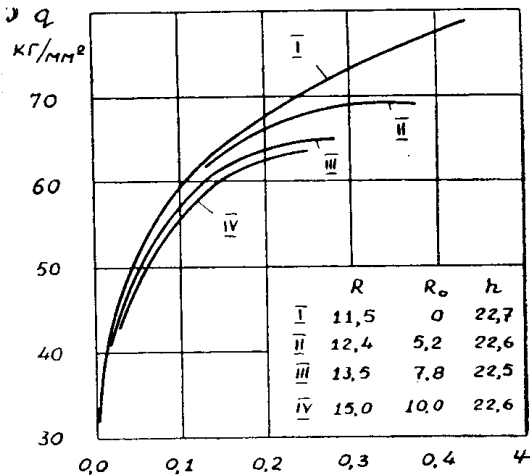


Рис. 3. Кривые сжатия кольцевых образцов из стали 3

трубчатых образцов одинаковой высоты и одинаковой площади поперечного сечения из стали 3, которые подтверждают зависимость [3]. Формула (3) значительно проще предложенной Л. А. Шофманом [6].

Работа трения при осадке прямоугольных призм

При выводе формул для расчета деформирующих напряжений в случае осадки прямоугольных призм всегда принимают так называемую нормальную кинематическую схему течения металла, согласно которой горизонтальная проекция траекторий перемещения любой точки деформированного тела представляет собой нормаль к боковой поверхности тела [3, 5, 6]. И. Я. Тарновский теоретически и экспериментально доказал, что в реальных процессах действительные перемещения не совпадают с законом нормального течения так же, как они не совпадают с законом радиального течения [7].

Пользуясь изложенным выше принципом определения работы трения и схемой, представленной на рис. 4, получим

$$dA_{тр} = e_x x \tau b dx,$$

Тогда вся работа на обоих торцах при тех же допущениях:

$$A_{\text{тр}} = 4 \int_0^{l/2} \tau b e_x x dx + 4 \int_0^{b/2} \tau l e_y y dy,$$

$$A_{\text{тр}} = \frac{1}{2} \tau b^2 l \left(e_x \frac{l}{b} + e_y \right).$$

Удельная работа трения

$$a_{\text{тр}} = \frac{A_{\text{тр}}}{bhl} = \frac{1}{2} \tau \frac{b}{h} \left(e_x \frac{l}{b} + e_y \right). \quad (4)$$

Принимая эмпирическую зависимость И. Я. Тарновского [7]

$$\frac{e_y}{e_z} = \frac{1}{1 + \left(\frac{b}{l}\right)^{4\mu}}, \quad (5)$$

получим

$$a_{\text{тр}} = \frac{1}{2} \tau \frac{b}{h} \frac{1 + \left(\frac{b}{l}\right)^{4\mu-1}}{1 + \left(\frac{b}{l}\right)^{4\mu}} e_z. \quad (6)$$

Если $b:l \rightarrow 0$ или $b:l \rightarrow 1$, то удельная работа трения будет одной и той же

$$a_{\text{тр}} = \frac{1}{2} \tau \frac{b}{h} e_z. \quad (7)$$

Вывод о том, что удельная работа трения не зависит от длины осаживаемой призмы, можно доказать несколько иначе.

Известно, что средняя часть призмы будет находиться в условиях плоской деформации. Поэтому работа трения на этой части призмы может быть определена так:

$$A_{\text{тр}} = 4 \int_0^{b/2} \tau (l-b) y e_y dy = \frac{1}{2} (l-b) e_z \tau b^2.$$

Удельная работа трения на средней части призмы

$$a_{\text{тр}} = \frac{A_{\text{тр}}}{(l-b)bh} = \frac{1}{2} e_z \tau \frac{b}{h}.$$

Оставшаяся часть призмы будет деформироваться как квадратная призма. В этом случае

$$A_{\text{тр}} = 8 \int_0^{b/2} \tau b y e_y dy = e_y \tau b^3,$$

$$a_{\text{тр}} = \frac{1}{2} \tau e_z \frac{b}{h}.$$

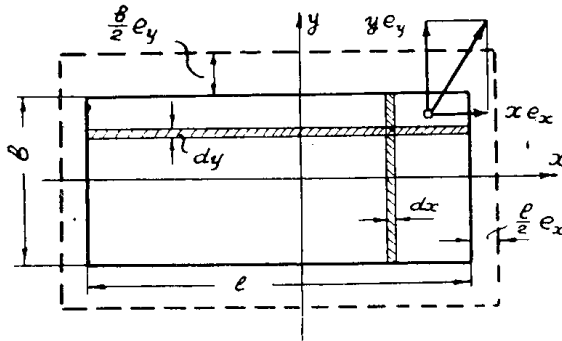


Рис. 4. К расчету работы трения при осадке прямоугольной призмы

Следовательно, удельная работа трения на обеих частях призмы будет равна.

Тогда отношение работы деформации с трением к работе деформации без трения

$$\frac{a}{a_{\text{деф}}} = 1 + \frac{\mu}{2} \frac{b}{h} \quad (8)$$

и рабочее напряжение деформации для любых призм

$$q = \beta \sigma \left(1 + \frac{\mu}{2} \frac{b}{h} \right). \quad (9)$$

Здесь β — коэффициент, учитывающий изменение усредненного деформированного состояния. По условию пластичности Мизеса-Генки он изменяется от 1,0 до 1,15. По условию П. О. Пашкова [8] — от 1,0 до 1,33.

Принимая обычное положение о том, что средняя часть осаживаемой призмы ($l - b$) находится в условиях плоской деформации, а крайние деформируются осесимметрично [3, 5, 6], на основании условия П. О. Пашкова [8] получим

$$\beta = \frac{2}{3} \frac{2l + b}{e + b}. \quad (10)$$

Формула (9) отличается от общеизвестных формул для расчета деформирующего напряжения при осадке призм [1, 3, 5, 6] численным коэффициентом во втором слагаемом. Для квадрата он обычно [5] берется таким же, как и для цилиндра. Из простого сопоставления ясно, что доля работы трения в общем балансе работы деформации при осадке квадратной призмы будет больше, чем при осадке вписанного цилиндра ($2R = b$), что и учитывает формула (2).

Соотношение составных частей работы резания

Как показывают исследования [9], коэффициент трения является кинематическим параметром стружкообразования, однозначно связанным со степенью пластической деформации снимаемого слоя металла

$$\mu = 1 - \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma). \quad (11)$$

Здесь β_1 — угол сдвигов и γ — передний угол режущего инструмента.

Зависимость (11) позволяет получить аналитическое выражение для полной удельной работы стружкообразования

$$a = \tau \left[\operatorname{ctg} \beta_1 + \frac{1}{1 - \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma) + \operatorname{tg}^2(\beta_1 - \gamma)} \right].$$

Учитывая, что в процессе резания работа пластической деформации без трения равна [10]

$$a_{\text{деф}} = \tau \varepsilon,$$

где τ — касательные напряжения в плоскости сдвигов;

ε — относительный сдвиг,

$$\varepsilon = \operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma),$$

получим

$$a_{\text{тр}} = \tau \left[1 - \frac{\operatorname{tg}^3(\beta_1 - \gamma)}{1 - \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma) + \operatorname{tg}^2(\beta_1 - \gamma)} \right]. \quad (12)$$

Во многих случаях второе слагаемое в уравнении (12) близко к нулю. Тогда можно получить весьма простое выражение для соотношения составных частей работы резания:

$$\frac{a_{\text{тр}}}{a_{\text{деф}}} = \frac{1}{\varepsilon}, \quad (13)$$

$$\frac{a_{\text{деф}}}{a} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 1}. \quad (14)$$

На рис. 5 сплошной линией нанесена зависимость (14) и отдельными точками результаты экспериментов А. М. Розенберга [11].

Как показывает проверка по экспериментальным данным, зависимость (14) является общей для всех материалов, дающих в заданных условиях резания сливную стружку, и для любой обычной геометрии режущего инструмента.

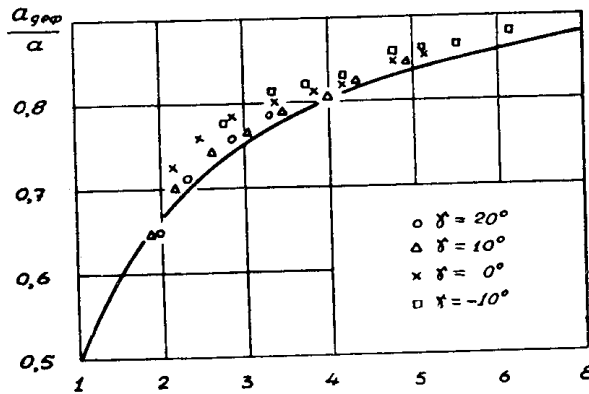


Рис. 5. Зависимость отношения работы деформации (без трения) ко всей работе резания от относительного сдвига

Отношение работы трения ко всей работе, затраченной на осуществление пластической деформации, при обработке металлов давлением зависит от геометрических размеров деформируемого тела [8]. Работа трения совершается на торцах образца и является функцией только поперечных размеров тела. Работа, затрачиваемая только на деформацию тела, является функцией всех трех его размеров.

Отношение работы трения ко всей работе пластической деформации в этом случае не зависит от степени деформации (рис. 2). Так как поперечные деформации жестко связаны с продольной, а составные части работы пропорциональны соответствующим деформациям.

В процессе резания трение изменяет степень пластической деформации [11]. Увеличение усадки стружки сокращает относительное перемещение металла по передней грани, уменьшает долю работы трения в общем балансе работы резания.

Зная соотношение составных частей работы в процессах пластической деформации при обработке металлов давлением и резанием и характер изменения этого соотношения, можно изучать закономерности пластической деформации в полной взаимосвязи с напряжениями и усилиями, осуществляющими эту деформацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго. Деформации и усилия при обработке металлов давлением. Машгиз, 1959.
2. В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела. Т. III, Материалы по физике резания металлов, Томск, «Красное знамя», 1944.
3. С. И. Губкин. Пластическая деформация металлов. Т. III, Теория пластической обработки металлов, Металлургиздат, 1961.

4. В. Д. Кузнецов, М. А. Большанина. Физика твердого тела. Т. II, Томск, «Красное Знамя», 1941.
 5. М. В. Сторожев, Е. А. Попов. Теория обработки металлов давлением. Машгиз, 1957.
 6. Л. А. Шофман. Основы расчета процессов штамповки и прессования. Машгиз, 1961.
 7. И. Я. Тарновский. Формоизменение при пластической обработке металлов. Металлургиздат, 1954.
 8. П. О. Пашков. Пластичность и разрушение металлов. Судпромгиз, 1950.
 9. Л. М. Седоков. Напряжения и деформация в процессе резания металлов. Проблемы резания металлов, Материалы конференции, М., 1963.
 10. А. М. Розенберг, А. М. Еремин. Элементы теории процесса резания металлов. Машгиз, 1956.
 11. А. М. Розенберг. Составные части работы резания при скоростной обработке сталей. Изв. ТПИ, т. 85, 1957.
-