

В. А. Николаев /д. т. н./

Запорожская государственная инженерная академия

Оценка методов расчета контактных напряжений при осадке поковок в плоских бойках

Выполнен анализ точности формул для расчета среднего нормального контактного напряжения при осадке поковок плоскими плитами по экспериментальным данным. Предложен метод оценки точности теоретических формул. Определены значения коэффициента и показателя трения при осадке алюминиевых и свинцовых поковок. Показано различное влияние смазки на условия трения при деформации поковок из указанных металлов. Получены зависимости характеристик интенсивности трения от фактора формы, обеспечивающие получение точных результатов расчета СНКН. (Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.).

Ключевые слова: деформация, осадка, коэффициент трения, напряжение, цилиндрическая заготовка, опыт, формулы

The analysis of exactness of formulas is executed for the calculation of middle normal contact tension at sinking of metals by flat flags from experimental data. The method of estimation of exactness of theoretical formulas is offered. The values of coefficient and index of friction are certain at sinking of aluminium and leaden metals. Different influence of greasing on the terms of friction is rotined during deformation of metals from the indicated metals. Dependences of descriptions of intensity of friction are got on a factor forms, providing the receipt of exact results of calculation of tensions.

Key words: deformation, sinking, coefficient of friction, tension, cylindrical purveyance, experience, formulas

Известны различные подходы к определению зависимостей для расчета среднего нормального контактного напряжения (СНКН) при осадке [1-3]. Одним из способов определения СНКН для конечной стадии осадки является применение дифференциального уравнения равновесия всех сил, действующих на какой-либо выделенный элемент поковки, совместно с уравнением пластичности. Для случая осадки цилиндрической заготовки Э. Зибель [1-3] получил следующее выражение для расчета среднего нормального контактного напряжения при условии контактного трения в виде $\tau = f_{\Pi} \cdot \sigma_T$:

$$p_{CP} = \sigma_T \left(1 + 0,33 f_{\Pi} \frac{d}{h} \right); n_{\sigma} = p_{CP} / \sigma_T \quad (1)$$

где d и h – диаметр и высота поковки; f_{Π} – показатель трения; σ_T – напряжение течения металла; p_{CP} – среднее нормальное контактное напряжение; n_{σ} – коэффициент напряженного состояния металла в очаге деформации.

Е. П. Унксов [1; 2] решил задачу расчета СНКН с использованием приближенного решения уравнений равновесия напряжений и пластичности. Так, для осадки цилиндрической заготовки при наличии на контакте только зон скольжения и условия трения Г. Амонтона ($\tau = f \cdot p_{CP}$) Е. П. Унксов получил следующее выражение:

$$p_{CP} = 2\sigma_T \frac{h^2}{f^2 d^2} \left(e^{\frac{f \cdot d}{h}} - \frac{f \cdot d}{h} - 1 \right), \quad (2)$$

где f – коэффициент трения.

В случае, если при осадке цилиндрической заготовки использовать условие трения Э. Зибеля ($\tau = f_{\Pi} \cdot \sigma_T$), то из общего выражения Е. П. Унксовым получена более простая формула для расчета СНКН в виде:

$$p_{CP} = \sigma_T \left(1 + 0,25 f_{\Pi} \frac{d}{h} \right), \quad (3)$$

которая отличается от формулы (1) значением числового коэффициента перед вторым слагаемым. Однако в известной литературе отсутствует систематизированный анализ точности указанных формул относительно практических данных по СНКН и условий их применения.

Постановка задачи

Представляет теоретический и практический интерес выполнение оценки точности указанных формул. Формулы (1)–(3) для расчета СНКН в условиях осадки цилиндрической заготовки могут обеспечить качественные результаты расчета при наличии фактических значений f и f_{Π} , то есть если эти характеристики соответствуют фактическим контактными касательным напряжениям трения. Однако возникает вопрос, какая из теоретических формул (1) или (3)

в большей степени отвечает тем или иным условиям деформации металла при осадке? Каким образом определить коэффициент и показатель трения и соотношение между указанными характеристиками трения при осадке цилиндрической поковки для выполнения объективного анализа?

Очевидно, ответы на эти вопросы могут быть получены путем анализа формул (2) и (3), которые выведены из одних исходных положений, с привлечением экспериментальных данных по коэффициенту напряженного состояния металла в очаге деформации (n_σ), например, из работы [4, рис. 14.6]. Принимаем во внимание следующее. Поскольку при одинаковых значениях фактора формы очага деформации опытный коэффициент напряженного состояния $n_\sigma = p_{CP} / \sigma_T$ из табл. 1 для формул (2) и (3) одинаковый, то и правые части выражений, полученных из одного общего уравнения, должны обеспечивать получение одинаковых результатов или результатов, близких между собой.

В первую очередь определяем коэффициент трения итерационным методом с использованием формулы (2) (базовой) и опытных значений коэффициента n_σ . Необходимо иметь в виду, что при данном методе определения коэффициента трения последний учитывает не только контактные касательные напряжения, но и влияние некоторых допущений, принятых при выводе уравнения (2). Поэтому полученные значения коэффициента трения следует считать условными. Однако иные методы определения коэффициента трения, без нарушения процесса деформации металла, нам не известны. Затем, при известных опытных величинах коэффициента трения f и коэффициента n_σ определяем показатель трения f_{II} и выполняем анализ формул (1) и (3).

Основная часть

Для выполнения анализа приведенных выше формул воспользуемся опытными данными из работы [4, рис.14.6] при различных величинах фактора формы очага деформации d/h , которые представлены в табл. 1. В табл. 1 для обр. 1с-4с - осадка со смазкой; обр. 5-7 - без смазки (обр. 1-7 - из алюминия с исходной толщиной $H = 25,7$ мм); обр. 8-10 - осадка без смазки; 11с-13с - осадка со смазкой (обр. 8-13 - из свинца толщиной $H = 13...40$ мм). По опытным данным коэффициента n_σ (табл. 1) с использованием формулы (2) методом итераций определили коэффициент трения (а затем и показатель трения).

Расчетами установлено, что в условиях эксперимента при деформации на сухих плитах коэффициент трения оказался рав-

ным $f = 0,142...0,265$, а на смазанных плитах $f = 0,07...0,152$. Во всех случаях коэффициент трения заметно снижается с увеличением фактора формы очага деформации d/h . Очевидно, такой характер изменения коэффициента трения обусловлен увеличением скорости скольжения и более интенсивным ростом напряжений течения металла и СНКН, по сравнению с увеличением контактных касательных напряжений. Коэффициент трения при осадке со смазкой существенно меньше, чем на сухих плитах. При этом степень уменьшения коэффициента трения происходит интенсивнее в случае осадки на сухих плитах, нежели на смазанных. Кроме того, при осадке на сухих плитах материал поволоков (алюминий или свинец) практически не оказывает влияния на коэффициент трения.

Условия на контакте	Коэффициент трения	
	Алюминий	Свинец
Сухие	0,16...0,25	0,142...0,265
Со смазкой	0,105...0,152	0,07...0,10

При деформации свинцовых поволоков со смазкой коэффициент трения заметно меньше (примерно в 1,15...1,5 раза), чем в случае осадки алюминиевых поволоков. С увеличением фактора d/h различие в величинах коэффициента трения при осадке алюминиевых и свинцовых образцов уменьшается. Меньшие величины коэффициента трения при осадке свинца обусловлены, очевидно, меньшими нормальными контактными напряжениями, что обеспечивает большую толщину слоя смазки.

Таблица 1

Опытные (n_σ) и расчетные (f, f_{II}, C_H) данные

№ обр.	d/h	n_σ	f	f_{II}	C_H
1с	10	1,70	0,152	0,268	0,262
2с	15	2,35	0,146	0,345	0,248
3с	20	2,87	0,13	0,374	0,250
4с	30	3,73	0,105	0,391	0,230
5	5	1,6	0,25	0,40	0,30
6	10	2,33	0,21	0,486	0,283
7	20	3,91	0,16	0,628	0,240
8	5	1,54	0,265	0,40	0,263
9	15	3,8	0,21	0,798	0,235
10	30	6,52	0,142	0,93	0,20
11с	10	1,43	0,10	0,143	0,30
12с	30	3,0	0,092	0,275	0,25
13с	50	4,54	0,07	0,319	0,26

Кроме того, поскольку свинец имеет существенно меньшее значение напряжения течения, чем алюминий, то срез неровностей металла при контактном скольжении происходит при меньших значениях контактных касательных напряжений.

Наличие опытных данных параметров f и n_σ позволяют определить показатель трения для всех факторов формы d/h , указанных в табл. 1. Ранее было установлено [5,6], что между показателем трения f_{Π} , коэффициентом трения f и коэффициентом n_σ существует тесная связь, между условиями трения Г. Амонтона и Э. Зибеля, имеющая вид

$$n_\sigma = p_{CP} / \sigma_T = f_{\Pi} / f, \quad (4)$$

где n_σ – фактическое (опытное) значение коэффициента напряженного состояния.

Следовательно, отношение f_{Π} / f , определенное из экспериментальных данных, отражает величину фактического коэффициента напряженного состояния. Если установлены опытным путем параметры n_σ и, например, f , то из выражения (4) можно определить показатель трения f_{Π} из условия [5, 6]:

$$f_{\Pi} = f \cdot n_\sigma. \quad (5)$$

Выполним, в качестве примера, расчет параметров для обр. 10 при $d/h = 30$ и $n_\sigma = 6,52$ (табл. 1). В первом расчете в формулу (2) вводим коэффициент трения $f = 0,20$, но в итоге после итераций для $n_\sigma = 6,52$ и заданных параметров деформации получили значение коэффициента трения равное $f = 0,142$:

$$n_\sigma = 2 \cdot \left(\frac{0,033}{0,142} \right)^2 (e^{4,2} - 5,2) = 0,107(66,7 - 5,2) = 6,52.$$

Далее, из формулы (5) находим величину показателя трения f_{Π} :

$$f_{\Pi} = 0,142 \cdot 6,52 = 0,93.$$

Обратим внимание, что для расчета СНКН при осадке цилиндрической поковки применяют формулы Э. Зибеля (1) и Е. П. Унксова (3), которые отличаются числовым коэффициентом перед вторым слагаемым. В первом случае коэффициент равен $C_H = 0,33$, а во втором коэффициент равен $C_H = 0,25$, что обусловлено разными исходными положениями при выводе указанных формул. В практических условиях расчета СНКН, как правило, пользуются формулой (1), которая обеспечивает, как утверждается, несколько завышенные результаты, повышая, тем самым, запас прочности оборудования.

При полученном значении показателя трения $f_{\Pi} = 0,93$ коэффициент напряженного состояния из формулы (3) будет равен:

$$n_\sigma = 1 + 0,25 \cdot 0,93 \cdot 30 = 6,98,$$

что на 8,3% больше опытного, а по формуле (1) получим:

$$n_\sigma = 1 + 0,33 \cdot 0,93 \cdot 30 = 9,25,$$

что существенно превышает опытное значение n_σ . Существенное отличие (на 32,3 %) значений коэффициента n_σ обусловлено, как полагаем, несоответствием числового коэффициента (0,33) во втором слагаемом выражения (1) реальным условиям контактного трения. Следовательно, при коэффициенте $C_H = 0,33$ значения n_σ не соответствуют действительным.

Тем не менее, обе формулы теоретически обоснованы и в определенных условиях осадки каждая из них может иметь высокую сходимость с опытными данными. Однако для конкретного случая деформации, вследствие различия коэффициента C_H , формулы (1) и (3) могут давать значения СНКН с расхождением в 25–35 % и не совпадать с опытными величинами СНКН. Дело в том, что в практических условиях деформации коэффициент C_H может иметь иную величину, отличную от 0,25 и 0,33 (табл. 1). Таким образом, для возможности расчета СНКН по формулам (1) и (3) необходимо предварительно определить не только коэффициент (показатель) трения и напряжение течения металла, но и числовой коэффициент C_H .

В условиях продольной прокатки полос при расчете СНКН (коэффициента n_σ) используют следующую формулу [6,7].

$$n_\sigma = 1 + C_H \cdot f_{\Pi} \cdot l_d / h_{CP}, \quad (6)$$

в которой коэффициент C_H отражает интенсивность влияния контактных касательных напряжений, численно изменяется в пределах $C_H = 0,32 \dots 0,48$ и зависит от показателя трения. При показателе трения $f_{\Pi} < 0,125$ коэффициент $C_H < 0,48$, а при показателе трения $f_{\Pi} \geq 0,125$ коэффициент $C_H = 0,48$ (l_d – длина очага деформации при прокатке; h_{CP} – средняя толщина полосы).

Принимая во внимание изложенное, при осадке цилиндрической поковки между плоскими плитами, очевидно, для расчета коэффициента n_σ (СНКН) можно также использовать обобщенную формулу в виде:

$$n_\sigma = \left(1 + C_H \cdot f_{\Pi} \cdot \frac{d}{h} \right), \quad (7)$$

учет переменного значения коэффициента C_H , в которой обеспечит повышение точности расчета. Значение коэффициента C_H при осадке можно определить, используя опытные и расчетные данные работы [4], представленные в табл. 1.

После преобразования формулы (7) относительно коэффициента C_H , получим:

$$C_{\Pi} = \frac{n_{\sigma} - 1}{f_{\Pi} \cdot d / h'} \quad (8)$$

где n_{σ} - здесь **опытный** коэффициент напряженного состояния; f_{Π} - показатель трения, определенный из выражения (5) по опытным значениям коэффициентов f и n_{σ} .

Опытные данные в табл. 1 позволяют определить коэффициент C_H и отношение характеристик трения f_{Π}/f в зависимости от фактора формы очага деформации. Путем обработки опытных и расчетных данных табл. 1 получены следующие выражения для расчета параметров C_H и f_{Π}/f , необходимые для определения коэффициента напряженного состояния по формуле (7):

$$C_H = 0,2 + 0,031(4,4 - f \cdot d / h)^{0,95}; \quad (9)$$

$$\frac{f_{\Pi}}{f} = 1,13(f \cdot d / h) \text{ при } f \cdot \frac{d}{h} < 3,0; \quad (10)$$

$$\frac{f_{\Pi}}{f} = [2,3(f \cdot d / h) - 3,4] \text{ при } f \cdot \frac{d}{h} \geq 3,0. \quad (11)$$

Анализ формул (3), (9)–(11) показывает, что расчет СНКН по формуле Э. Зибеля (1) целесообразно выполнять при $f \cdot (d/h) \leq 2$, когда коэффициент $C_H \rightarrow 0,33$. Во всех остальных случаях расчета СНКН следует применять формулу Е. П. Унксова.

Пример (обр. 7). Практические данные: $d/h = 20$, $f = 0,16$, $n_{\sigma} = 3,91$, $(f \cdot (d/h)) = 3,2$. При расчете по формулам (7), (9)–(11) имеем:

$$C_H = 0,2 + 0,031 \cdot (4,4 - 3,2)^{0,95} = 0,236;$$

$$\frac{f_{\Pi}}{f} = 2,3 \cdot 3,2 - 3,4 = 3,95;$$

$$f_{\Pi} = 0,16 \cdot 3,95 = 0,633;$$

$$n_{\sigma} = (1 + 0,236 \cdot 0,633 \cdot 20) = 3,98.$$

Как следует, несовпадение расчетного и опытного коэффициентов n_{σ} составляет всего 1,8 %. Зависимости (9)–(11) позволяют уточнить расчеты СНКН по выражениям (1) и (3).

Выводы

Таким образом, установлена возможность определения коэффициента трения по опытным значениям силы (коэффициента n_{σ}) при осадке цилиндрических поковок. Предложен метод оценки точности расчетных формул, предложен метод расчета параметров C_H и f_{Π}/f , обеспечивающих повышение точности определения СНКН по известным формулам.

Библиографический список

1. Унксов Е. П. Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением / Е. П. Унксов. – М.: Машгиз, 1955. – 280 с.
2. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – Изд. 4-е. – М.: Машгиз, 1977. – 318 с.
3. Теория обработки металлов давлением / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго [и др.]. – М.: Металлургия, 1963. – 664 с.
4. Томсен Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
5. Николаев В. А. О расчете удельного давления / В. А. Николаев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1964. – № 6. – С. 77–80.
6. Николаев В. А. Теория прокатки полос / В. А. Николаев. – Запорожье: ЗГИА, 2014. – 259 с.
7. Николаев В. А. Оценка методов расчета нормальных контактных напряжений при прокатке полос / В. А. Николаев // Производство проката. – 2013. – № 9. – С. 20–26.

Поступила 06.02.2015

