

УДК 621.73

Николаев В. А.

### РАСЧЕТ СИЛЫ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА В ШТАМПАХ ОТКРЫТОГО ТИПА

Для расчета силы при горячей открытой штамповке металла известны несколько теоретических методов [1–4], в которых полную силу деформации определяют как сумму составляющих сил на отдельных элементах штампа. Известно также, что максимальная сила деформации соответствует конечному моменту штамповки, то есть при полном заполнении полости инструмента металлом (момент доштамповки) и образовании заусенца. При этом, например, при изготовлении бочкообразной поковки (рис. 1) силу, необходимую для деформации в конечный момент штамповки, представляют в виде [3]:  $P = P_3 + P_n$ , где  $P_3$  – доля силы деформации металла в заусенце;  $P_n$  – доля силы деформации металла в полости штампа. Рассмотрим наиболее часто встречающийся случай получения поковки в открытом штампе (рис. 1).

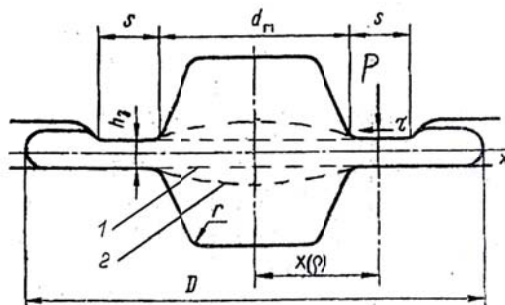


Рис. 1. Изготовление поковки в открытом штампе

Область деформации (1) по [2] и (2) по [3] ( $p$  – нормальное контактное напряжение;  $\tau$  – касательное напряжение трения;  $r$  – радиус перехода;  $D$  – общий диаметр поковки).

Сила  $P_3$  деформации металла в заусенце определяется интенсивностью трения на контактных поверхностях, а сила  $P_n$  в полости штампа обусловлена размерами области, в которой происходит пластическое течение металла. В обоих случаях для определения сил в первую очередь рассчитывают средние нормальные контактные напряжения, действующие на рабочую поверхность штампа.

Целью данной работы является расчет силы при горячей деформации металла в штампах открытого типа при изготовлении бочкообразной детали.

В работе М. В. Сторожева и Е. А. Попова [3] предложено выражение для расчета среднего нормального контактного напряжения  $p_{cp}$  (СНКН), полученное с учетом влияния контактного трения по ширине мостика (заусенца) и пластической деформации на участке штампа, имеющем линзообразную форму (рис. 1, кривая 2). Получено следующее выражение для расчета коэффициента напряженного состояния  $n_\sigma$  (или СНКН) поковки круглой или приближающейся к ней формы:

$$n_\sigma = p_{cp}/\sigma_{m1} = [n + f_2 \cdot S/h](F_2/F) + [2f_2 \cdot S/h + 1,25 \ln(d/h) - 0,375](F_1/F), \quad (1)$$

где  $\sigma_{T1}$  – среднее напряжение течения металла в полном очаге деформации;

$f_2$  – показатель трения (из условия Э. Зибеля) на поверхностях мостика и металла;

$F_2$  и  $F_1$  – соответственно горизонтальная проекция площади контакта заусенца с мостиком и площадь проекции ступицы;

$F$  – полная горизонтальная проекция поковки с учетом заусенца;

$n$  – коэффициент, отражающий граничные условия.

В выражении (1) первое слагаемое получено на основании решения плоской задачи, а второе слагаемое – осесимметричной. Уравнение (2) рекомендуется Е. И. Семеновым [4] для теоретического и практического использования. В формуле (2) в первом слагаемом коэффициент  $n = 1,5$  учитывает влияние на СНКН облоя за мостиком (при отсутствии этого облоя коэффициент  $n = 1,0$ ), вторая составляющая учитывает влияние трения на мостике штампа при заполнении его металлом. Во втором слагаемом первая составляющая отражает влияние напряжения подпора со стороны заусенца при течении металла на участке 2 (граничные условия), а две последующие отражают степень деформации металла в ступице. Причем, если предположить, что высота области деформации равна толщине заусенца, то коэффициент (0,375) исчезает [3]. Как следует из структуры формулы (2) напряжение течения металла определяется для усредненного очага деформации.

В работе И. Я. Тарновского и др. [7] для осесимметричной деформации с заусенцем при открытой штамповке детали по рис. 1 при коэффициенте трения  $f = 0,5$  (максимальном значении) получена следующая формула для одинаковых значений напряжения течения металла в различных элементах штампа:

$$n_{\sigma} = 1 + 0,17d/h_3 - 0,013(d/h_3)^{1,5} \cdot (d_{II}/d)^{3,5}; \quad (2)$$

$$d = d_n + 2S.$$

В работе Э. Томсена и др. [2] средние нормальные контактные напряжения также определяются из условия наличия участков плоской и осесимметричной деформаций в штампе. Причем внутреннюю (центральную) часть полости детали рассматривают в виде «фиктивного» диска с толщиной равной толщине заусенца (область 1 на рис. 1). Получены различные выражения для расчета  $p_{cp}$  (СНКН) с учетом и без учета наличия зоны прилипания металла на контакте заусенца с поверхностью штампа. В предложенных формулах коэффициент трения входит как в числитель, так и в знаменатель, а в этом случае для получения достоверных значений СНКН необходимо предварительно получить точные величины коэффициента трения.

В указанных работах отсутствует оценка использования в формулах среднего значения напряжения течения металла для различных элементов штампа на величину СНКН. Отсутствует также оценка влияния коэффициента трения на величины СНКН. В предлагаемой работе представлен анализ условий деформации металла в открытых штампах и некоторые практические рекомендации по уточнению расчета СНКН (коэффициента напряженного состояния).

Для ответа на указанные замечания в первую очередь необходимо определить параметры деформации в каждом элементе штампа (полость и заусенец) (рис. 1). При известном объеме заготовки  $V_0$ , высоте  $H_0$  и толщине заусенца  $h_3$  степень деформации на этом участке определим из выражения:

$$\varepsilon_3 = (H_0 - h_3) / H_0. \quad (3)$$

Объем металла в заготовке равен (рис. 1):

$$V_0 = \pi \cdot D_0^2 \cdot H_0 / 4, \quad (4)$$

где  $D_0$  – диаметр заготовки;

$H_0$  – высота заготовки.

Объем металла в заусенце равен:

$$V_3 = 0,785 \cdot h_3 [(d + 2S)^2 - d^2]. \quad (5)$$

Объем металла в полости штампа определим из выражения:

$$V_n = V_0 - V_3 - V_{OB}; \quad V_{OB} = 0,785 \cdot h_{об} \cdot (D^2 - d^2),$$

а среднюю толщину металла в полости (в бочке) определим из выражения:

$$h_{II} = V_{II}/0,785d^2,$$

где  $d$  – средний диаметр бочки по высоте ( $d = d_n$ ).

Тогда относительное обжатие по бочке будет равно:

$$\varepsilon_3 = (H_0 - h_{II}) / H_0.$$

Скорость деформации металла в каждом элементе поковки на рис. 1 будет различная и ее определим из известной зависимости [3]:

$$u = v \cdot \varepsilon_i / \Delta h_x, \quad (6)$$

$v$  – скорость движения штампа (ползуна) в вертикальной плоскости;

$\varepsilon_i$  – относительное обжатие элемента;

$\Delta h_x$  – ход штампа в период деформации металла.

Очевидно, что при  $H_0 = \text{const}$  величины относительных обжатий, а, следовательно, и скорости деформации в заусенце будет существенно больше, чем в области бочки. Вместе с этим на участке заусенца получим и наибольшие значения напряжения течения металла. Ниже приведен пример расчета указанных параметров деформации для изготовления поковки с диаметром  $d_{II} = 80$  мм, высотой,  $h_{II} = 100$  мм толщиной заусенца  $h_3 = 4$  мм и его шириной  $S = 10$  мм, толщина облоя (вне мостика) 8 мм, а ширина – 15 мм (материал сталь марки ст. 3). Для этой поковки по данным [3] размер заготовки равен:  $D_0 = 64$  мм и  $H_0 = 160$  мм. Принимаем исходную температуру заготовки равной  $t = 1150$  °С, которая остается практически неизменной в процессе штамповки, а скорость движения ползуна (пуансона)  $v = 1,0$  м/с.

В первый период деформации (при  $D_0 < d_{II}$ ) происходит свободная осадка до максимально возможного заполнения штампа. В следующий период выполняется заполнение зазора для заусенца и выход металла в облой вне мостика (внешнего). В последний момент штамповки при максимальной силе деформации величина абсолютного обжатия бочки будет равна:

$$\Delta h_{II} = H_0 - h_{II} = 160 - 100 = 60 \text{ мм.}$$

Сложнее определяется обжатие в заусенце. В начальный момент к области заусенца подходит металл, который уже получил деформацию (упрочнение) в ступице. При входе в зазор мостика, металл получает дополнительное обжатие, которое имеет максимальную величину при полном образовании заусенца и облоя. В первом приближении принимаем, что начало образования заусенца происходит при зазоре равном  $\Delta h_{3I} = 0,5\Delta h_n$ . Тогда общее суммарное обжатие заусенца (с предварительной деформацией в полости бочки) будет равно:

$$\Delta h_3 = \Delta h_{II} + \Delta h_{3I} = 1,5\Delta h_{II} = 90 \text{ мм.}$$

Тогда относительные обжатия в бочке и заусенце соответственно равны:

$$\varepsilon_{II} = \Delta h_{II}/H_0 = 60/160 = 0,375; \quad \varepsilon_3 = \Delta h_3/H_0 = 90/160 = 0,563.$$

Скорости деформации из формулы (6) при ходе ползуна (пуансона)  $\Delta h_x = 60$  мм соответственно равны:  $u_{II} = 0,375 \cdot 1000/60 = 6,22 \text{ с}^{-1}$ ;  $u_3 = 0,563 \cdot 1000/60 = 9,4 \text{ с}^{-1}$ .

Для приведенных параметров деформации напряжения течения металла определяли по методу [5], который является наиболее точным из известных. Так, по данным анализа, выполненного в работе [6], установлено, что средняя относительная погрешность в определении напряжения течения металла для 27 марок сталей по методу [5] равна 14,5 %, а по методу Л. В. Андреюка и др. [6] – 21,2 %. После расчета для данного примера (при базовом значении напряжения течения  $\sigma_{m0} = 86 \text{ Н/мм}^2$  и площадях в  $\text{мм}^2$ :  $F_{II} = 5020$ ;  $F_3 = 2830$ ;  $F = 7850$ ) получим ( $\text{Н/мм}^2$ ): для бочки  $\sigma_{mn} = 69,7$ ; для заусенца  $\sigma_{m3} = 80,2$ ; среднее  $\sigma_m \approx 75$ .

Расчет СНКН с учетом различий условий деформации на каждом участке выполняют по формуле ( $k_I$  – отношение  $\sigma_{T2}/\sigma_{T1}$ ).

$$n_\sigma = p_{cp}/\sigma_{mI} = [n + f_2 \cdot S/h](F_2/F) \cdot k_I + [2f_2 \cdot S/h + 1,25 \ln(d/h) - 0,375](F_1/F). \quad (7)$$

Оценим в первую очередь влияние различия в величинах  $p_{cp}$ , определяемые по выражениям (1) ( $\sigma_{TI} = \sigma_T$ ) и (7) (с учетом различия напряжений течения металла в областях штампа). Расчет выполним для параметров поковки указанным выше. Напряжения течения металла определяем по расчетному методу [5]. При расчете с  $f_2 = 0,3$  получили (Н/мм<sup>2</sup>) коэффициент напряженного состояния  $n_\sigma$  и СНКН (Н/мм<sup>2</sup>): по формуле (1) –  $n_\sigma = 1,36$ ;  $p_{cp} = 102$ ; по формуле (7) –  $n_\sigma = 1,47$ ;  $p_{cp} = 102$ .

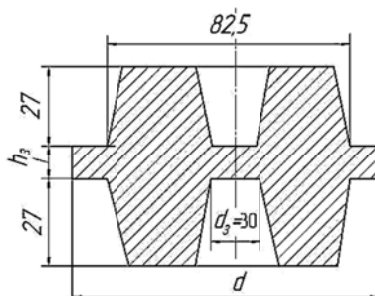


Рис. 2. Форма поковки при доштамповке (свинец)

То есть, расчет напряжения течения металла для усредненных параметров деформации и отдельно при деформации отдельных частей поковки в открытом штампе не оказывает влияние на значения СНКН. Оценку точности формул М. В. Сторожева, Е. А. Попова (1) [3] и И. Я. Гарновского и др. (2) [7] выполним по экспериментальным данным табл. 16, 17 работы [7].

Экспериментальные данные и результаты расчетов представлены на рис. 3, а, из которого разброс экспериментальных точек 1, очевидно, связан с наличием случайных факторов, влияющих на коэффициент трения, что с увеличением параметра  $d_n/h_3$  коэффициент напряженного состояния  $n_\sigma$  увеличивается как по экспериментальным, так и по расчетным данным.

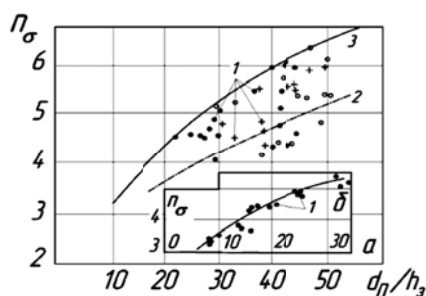


Рис. 3. Влияние параметра  $d_n/h_3$  на коэффициент напряженного состояния  $n_\sigma$  при штамповке в открытых штампах по рис. 1 (а) и по рис. 2 (б) [7, табл. 16 и 17]:

1 – опытные точки, промышленные исследования; 2 – расчет по формуле (1) [3]; 3 – расчет по формуле (2) [7] (для (а) –  $d_n/h_n$ : « $\leftarrow$ » – 100/10; «О» – 150/15; «х» – 150/45; для (б) –  $d_n/h_n \approx 82/60$ ;  $d_3/d_n = 0,36 \dots 0,78$ )

Расчетные величины коэффициента  $n_\sigma$  по формулам (1) и (2) (кривые соответственно 2 и 3) на рис. 3, а находятся в поле опытных значений коэффициента  $n_\sigma$ , но имеют существенное между собой различие (16...22 % относительно данных по зависимости 3), которое обусловлено различием принятых для расчета величин коэффициента трения:  $f_2 = 0,3$  и  $f_2 = 0,5$  соответственно. Из приведенных данных следует, что увеличение коэффициента трения на 0,1 увеличивает значения коэффициента напряженного состояния (СНКН или силу штамповки) на 8–11 %. При использовании в формуле (1) коэффициента трения  $f_2 = 0,5$  значения коэффициента  $n_\sigma$  по формулам (1) и (2) практически совпадают. При доштамповке с вдавливанием

пуансона в деталь (рис. 2) величины коэффициента  $n_{\sigma}$  максимальны (рис. 3, б) и несколько превышают расчетные величины коэффициента  $n_{\sigma}$  на рис. 3, а (кривая 3), что обусловлено влиянием дополнительного трения на контакте пуансона и металла.

Таким образом, из рис. 3, а следует, что теоретические выражения (1) и (2), при условии учета влияния коэффициента трения, в достаточной мере соответствуют практическим данным. Для оценки максимальной величины силы штамповки изделий, подобных приведенному на рис. 1, расчет коэффициента напряженного состояния можно выполнять по формуле (2). Обработка экспериментальных данных рис. 3, в совокупности с данными теоретического анализа, позволяют предложить удобные для практического использования обобщенные выражения для расчета коэффициента  $n_{\sigma}$  как для поковки по рис. 1, так и для поковки по рис. 2 (при отсутствии внешнего облоя):

$$\text{поковка по рис. 1:} \quad n_{\sigma} = [3 + 0,13(d_{II}/h_3 - 10)^{0,75}] + 1,2(f_2 - 0,3) (d_{II}/h_3) \cdot 10^{-1}; \quad (8)$$

$$\text{поковка по рис. 2:} \quad n_{\sigma} = [3 + 0,22(d_{II}/h_3 - 5)^{0,75}]. \quad (9)$$

Первая составляющая выражения (8) получена аппроксимацией зависимости (2) из рис. 3, а, а вторая составляющая, учитывающая влияние коэффициента трения, получена из сопоставления зависимостей (3) и (2). Поэтому вторая составляющая для зависимости (2) (при  $f = 0,3$ ) равна нулю, для зависимости (3) (при  $f = 0,5$  и  $d_{II}/h_3 = 50$ ) равна 1,2. Выражение (9) получено аппроксимацией данных рис. 3, б и позволяет расчетным путем определять коэффициент  $n_{\sigma}$  при штамповке деталей по рис. 2.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, теоретические и экспериментальные данные показывают, что с увеличением параметра  $d_{II}/h_3$  и коэффициента трения происходит существенное повышение значений коэффициента напряженного состояния, а, следовательно, СНКН и силы деформации металла. Формулы (1) и (2) для расчета среднего нормального контактного напряжения при открытой штамповке адекватны экспериментальным данным. Анализ теоретических и экспериментальных данных позволяет рекомендовать для практического использования формулы (1), (2), а также формулы (8) и (9).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов-Аляев Г. А. *Механические основы пластической обработки металлов* / Г. А. Смирнов-Аляев. – Ленинград : Машиностроение, 1968. – 272 с.
2. Томсен Э. *Механика пластических деформаций при обработке металлов* / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши. – М. : Машиностроение, 1969. – 504 с.
3. Сторожев М. В. *Теория обработки металлов давлением* / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 424 с.
4. *Ковка и штамповка. Справочник в 4-х томах / под ред. проф., д-ра техн. наук Е. И. Семенова. – Том 2. – М. : Машиностроение, 1986. – 592 с.*
5. Николаев В. А. *Теория прокатки* / В. А. Николаев. – Запорожье : ЗГИА, 2007. – 228 с.
6. Яковченко А. В. *Анализ точности известных методов расчета напряжения течения металла в зависимости от химического состава стали* / А. В. Яковченко, А. А. Пугач, Н. И. Ивлева // *Обработка металлов давлением : сб. науч. прай.* – Мариуполь : ПДТУ, 2011. – № 2 (23). – С. 69–80.
7. *Теория обработки металлов давлением* / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго и др. – М. : Металлургиздат, 1963. – 672 с.

Николаев В. А. – д-р техн. наук, проф. ЗНТУ.

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

E-mail: unnva@i.ua

Статья поступила в редакцию 24.05.2013 г.