

УДК 621.73

Николаев В. А.

**СИЛА ПРИ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА В ЗАКРЫТЫХ ШТАМПАХ**

Характер напряженного состояния и особенности течения деформируемого металла в закрытых штампах в значительной степени зависят от размеров заготовки [1–3]. Так, по данным исследований [1], при штамповке детали в виде шестерни из заготовок с  $H_0/D_0 > 2,0$  и  $H_0/D_0 < 1$ , характер течения металла совершенно различен ( $H_0$  и  $D_0$  – высота и диаметр заготовки) (рис. 1).

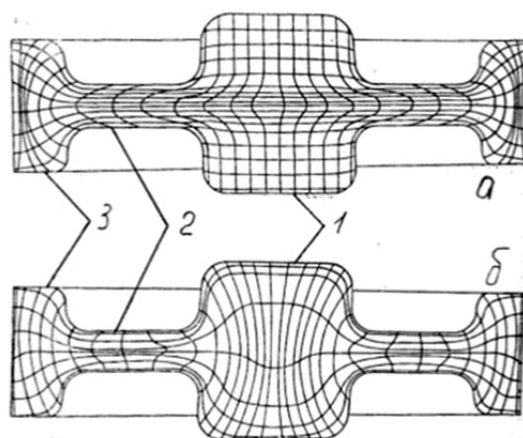


Рис. 1. Характер течения металла при штамповке из заготовки деталей типа шестерни с  $H_0/D_0$ : а –  $\geq 2,0$ ; б –  $< 1,0$ ; 1 – ступица; 2 – диск; 3 – обод

Целью данной работы является определение силы при горячей деформации металла в закрытых штампах.

При штамповке детали из высокой заготовки (рис. 1, а) в первую очередь начинается деформация ступицы и при этом слои металла, расположенные в центральной зоне, перемещаются в направлении от ступицы через диск к ободу. При этом в ступице происходит основная высотная деформация заготовки с упрочнением металла в центральной зоне. Кроме того, в процессе заполнения полости 1 и наличия радиального течения металла, заготовка будет дополнительно деформироваться в вертикальной плоскости на участке 2 диска и, следовательно, получать дополнительное упрочнение. Т. е., напряжение течения на участке 2 диска всегда будет больше напряжения течения  $\sigma_{T1}$  в полости 1 ступицы ( $\sigma_{T2}/\sigma_{T1} > 1$ ).

Величину напряжения течения металла в ободе 3 при практически недостаточном времени разупрочнения следует принимать равной напряжению течения в зоне 2, т. е.  $\sigma_{T3} = \sigma_{T2}$  (где  $\sigma_{T3}$  – напряжение течения металла в зоне 3 обода). Течению металла в диск и в обод и течению металла в самом ободе при доштамповке будут препятствовать силы контактного трения, величина которых так же определяет как силу деформации, так и заполнение угловых участков детали.

При использовании низкой заготовки с  $H_0/D_0 < 1$  (рис. 1, б) в первую очередь деформации подвергается область металла, расположенная в диске, и течение слоев металла будет направленно от оси диска к ступице и ободу ( $d_0, d_1, d_2$  – диаметры элементов детали;  $h$  – толщина диска;  $h_{II}$  – толщина ступицы). В этих условиях деформации максимальное обжатие будет иметь место на участке 2 (диска), что и будет, главным образом, определять величины напряжения течения металла и среднего нормального контактного напряжения  $p_{cp}$  (СНКН). Однако по мере продвижения штампа деформируемый металл в диске затекает в обод и ступицу и получает дополнительное упрочнение.

Очевидно, напряжение течения металла в ободе и ступице будет несколько больше, чем в диске, что сложно учесть без проведения специальных исследований. Вследствие небольшой продолжительности деформации процесс разупрочнения металла практически отсутствует и, с учетом сказанного выше, в этих условиях допустимо принимать в зонах ступицы 1 и обода 3 величины напряжения течения равными напряжению течения при деформации металла на участке 2 (диска 2), т. е.  $\sigma_{T1} = \sigma_{T3} = \sigma_{T2}$ .

В работе [5] для расчета силы при штамповке в закрытых штампах деталей, подобных шестерни (рис. 1, 2), предлагается формула следующего вида:

$$P = F \cdot \sigma_m [2,07(1 - 2r_2/d)^2 + 1,5 \ln(1,5 \cdot h_n/2r_2) + 12(r_2/d)(1 - r_2/d) - 4,5 h_n/d + 1,92(h_n/d)^2 + d/6h_n + 2(h - r_1 + r_2)/d - 1,5], \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр поковки;

$h_n$  – высота поковки (ступицы);

$\sigma_T$  – напряжение течения металла (Н/мм<sup>2</sup>);

$F$  – горизонтальная площадь поковки;

$r_1$  – радиус закругления поковки около пуансона;

$r_2$  – естественный радиус закругления угла матрицы.

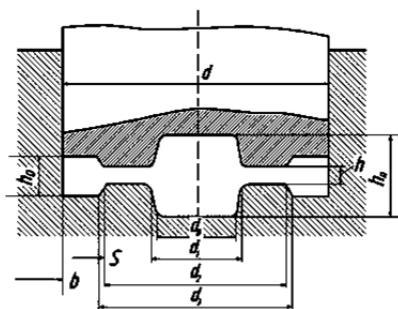


Рис. 2. Схема заключительной фазы штамповки детали типа шестерни

Формула (1) для расчета силы штамповки учитывает все основные геометрические параметры деформации, но отсутствует учет влияния на процесс контактных напряжений трения, различий напряжений течения в элементах поковки и влияние размеров заготовки.

В работах [2–4] задача о расчете силы деформации в закрытых штампах деталей типа шестерня не рассматривается, а в работе [1] предлагается теоретическое решение для определения коэффициента напряженного состояния  $n_\sigma = p_{cp}/\sigma_m$ , полученное на базе общепринятых положений теории обработки металлов давлением, имеющее вид:

$$n_\sigma = A_2 + A_3 + d \cdot (B_2 + B_3)/(h_o + h) - 4,6h_o/[(2d + d_2 + d_3)] + 2,3h_o/d + k_\tau (d_3/d)^2, \quad (2)$$

где  $A_2, A_3, B_2, B_3, k_\tau$  – табличные коэффициенты, зависящие от геометрических параметров шестерни.

В данной статье для расчета средних нормальных контактных напряжений (СНКН) в закрытых калибрах предлагается уточнение базового теоретического решения для расчета коэффициента напряженного состояния в открытых штампах из работы [3] с учетом влияния контактных напряжений трения на участках обода и ступицы, а также учета различия напряжений течения металла в элементах шестерни.

С учетом сказанного выше формулу из работы [3] для расчета коэффициента напряженного состояния в открытых штампах с образованием облоя (обода) вне заусенца для условий деформации в закрытых штампах представим в следующем виде с последующими пояснениями структуры предложенного выражения (для  $H_o/D_o \geq 2,0$ ):

$$n_{\sigma} = p_{cp} / \sigma_{m1} = [1,5 + m_o + f_2 \cdot S / h] (\sigma_{m2} / \sigma_{m1}) \cdot (F_2 / F) + [2f_2 \cdot S / h + 1,25 \ln(d/h) - 0,375] (F_1 / F) + m_o \cdot (\sigma_{m2} / \sigma_{m1}) \cdot (F_3 / F); \quad (3)$$

$$m_o = m_1 + m_2,$$

где  $f_2$  – показатель трения по Э. Зибелю на контактах участка диска 2 (полагаем одинаковыми значения коэффициента трения на всех участках шестерни);

$S$  – ширина диска;

$h$  – толщина диска;

$F_1, F_2, F_3, F$  – горизонтальные проекции площадей контакта соответственно со ступицей, с диском, с ободом и полная;

$m_1, m_2$  – аддитивные добавки, учитывающие повышение сопротивления скольжению металла по боковым и по горизонтальным поверхностям обода.

Коэффициенты  $m_1$  и  $m_2$  в выражении (3) учитывают влияние контактного трения между металлом и внутренними поверхностями штампа для формирования обода при доштамповке. Эти коэффициенты определяются из известных условий [2–4]:

$$m_1 = (f_2 \cdot h_0 / b)(2 - h / h_0); \quad m_2 \approx 0,5 \cdot b / h_0. \quad (4)$$

В формуле (3) первое слагаемое отражает сопротивление течению металла на поверхностях диска. Вторая составляющая первого слагаемого учитывает напряжения подпора в плоскости выхода металла из диска в обод. Принимая во внимание, что в закрытых штампах на участке 2 диска (рис. 1, 2) на всей ширине  $S$  действует подпирание напряжения при доштамповке и следуя логике авторов работы [3], в формуле (3) третью составляющую первого слагаемого принимаем в виде  $f_2 \cdot S / h$ . Числовой коэффициент 1,5 в работе [3] определяется граничными условиями на выходе из заусенца и при наличии нависающего облоя за заусенцем рекомендуется принимать нормальное напряжение  $p_0 = 1,5 \cdot \sigma_m$  ( $n_i = 1,5$ ) вместо  $p_0 = \sigma_m$  при  $n_i = 1,0$  (отсутствие нависающего облоя).

При штамповке шестерни с  $H_0 / D_0 \geq 2,0$  наличие обода имитирует, в определенной степени, воздействие облоя на условия деформации металла, но при наличии контактного трения, учитываемого аддитивными добавками  $m_1$  и  $m_2$ . Кроме того, в первое слагаемое выражения (3) добавлен множитель  $\sigma_{T2} / \sigma_{T1}$ , учитывающий различие в величинах напряжений течения металла на участке диска 2 ( $\sigma_{T2}$ ) и ступицы 1 ( $\sigma_{T1}$ ).

Второе слагаемое выражения (3) отражает составляющую полного коэффициента напряженного состояния при формировании ступицы, где и происходит основная пластическая деформация металла при  $H_0 / D_0 > 2,0$ . Во втором слагаемом выражения (3) первая составляющая отражает граничные условия на входе металла в диск, вторая составляющая – долю нормальных напряжений от пластической деформации металла ступицы с учетом рекомендаций [3]. Третьим слагаемым  $m_o$  выражения (3) учитывается влияние на коэффициент напряженного состояния  $n_{\sigma}$  трения на поверхностях обода при наличии высотной деформации металла, а также отношение напряжений течения металла в ободу и в ступице. Каждое слагаемое учитывает долю площади элемента относительно общей площади. Выражение (3) пригодно для расчета коэффициента  $n_{\sigma}$  и СНКН при штамповке деталей типа шестерни из высоких заготовок.

Определим коэффициент напряженного состояния  $n_{\sigma}$  при штамповке шестерни с размерами (мм):  $d = 115,1$ ;  $d_0 = 31$ ;  $d_n = d_1 = 34,5$ ;  $d_2 = 90,0$ ;  $d_3 = 87,5$ ;  $h_n = 38,6$ ;  $h = 8,6$ ;  $h_0 = 27,0$ ;  $b = 11,7$ ;  $S = 28,0$  при скорости ползуна  $v = 1,0$  м/с. Для рис. 1, а принимаем  $H_0 / D_0 = 70 / 32,5 = 2,15$ : в этом случае ход ползуна со штампом составляет для ступицы:

абсолютное обжатие  $\Delta h_x = H_0 - h_n = 70 - 38,6 = 31,4$  мм;

относительное обжатие  $\varepsilon_l = 31,4 / 70 = 0,448$ ;

скорость деформации [1–3] составит по формуле:

$$u_l = v \cdot \varepsilon_l / \Delta h_{x1} = 1000 \cdot 0,448 / 31,4 = 14,3 \text{ с}^{-1}.$$

Параметры деформации для диска следующие:

$\Delta h_{x2} = H_0 - h = 70 - 8,6 = 61,4$  мм;  $\varepsilon_2 = 61,4/70 = 0,876$ ;  $u = 1000 \cdot 0,876/31,4 = 27,9$  с<sup>-1</sup> (металл участка 2 деформируется и в ступице и в ободе).

Для горячей деформации малоуглеродистого металла при исходном (до деформации) напряжении течения  $\sigma_{m0} = 86$  Н/мм<sup>2</sup> коэффициенты упрочнения металла составят [6, 7] (рис. 1, а) (без учета разогрева металла при деформации):

для ступицы  $\kappa_{yn} = 1,47$ ;  $\sigma_{m1} = 1,47 \cdot 86,0 = 126,5$  Н/мм<sup>2</sup>;

для диска  $\kappa_{yn} = 1,65$ ;  $\sigma_{m2} = 1,65 \cdot 86,0 = 141,8$  Н/мм<sup>2</sup>.

Отношение  $\sigma_{m2}/\sigma_{m1}$  оказалось равным 1,13. Расчетный коэффициент напряженного состояния при  $d/h = 13,4$  и  $f_2 = 0,3$  [8] (с технологической смазкой) для рис. 1, а равен:

$n_\sigma = 3,5$ , а СНКН –  $p_{cp} = 442$  Н/мм<sup>2</sup>.

Иной характер течения металла наблюдается при штамповке шестерни из низкой заготовки с  $H_0/D_0 < 1,0$ . В этом случае заготовка в первую очередь начинает деформироваться элементом штампа на участке диска, а течение металла направлено в обод и ступицу. При этом, условия деформации металла на участке диска будут схожими с таковыми для предыдущего случая (см. первое слагаемое уравнения (3)). Отличие состоит в том, что граничные условия деформации металла в диске определяются не только вытеканием металла в обод (см. выше), но и дополнительным сопротивлением при заполнении металлом ступицы. Следовательно, и в этом случае, как и для обода, на границе со ступицей имеем  $p_{cp} = 1,5\sigma_m$  при  $n_i = 1,5$ .

Таким образом, среднее нормальное контактное напряжение при деформации заготовки с  $H_0/D_0 < 1,0$  будет определяться напряженным состоянием металла в диске, в ободе и в ступице в результате пластической деформации металла и влиянием подпирющих напряжений о контактных касательных напряжениях. С учетом изложенного уравнение для расчета среднего коэффициента напряженного состояния будет иметь следующий вид ( $\sigma_{m1} = \sigma_{m3} = \sigma_{m2}$ ):

$$n_\sigma = p_{cp}/\sigma_{m1} = [3,0 + m_n + m_o + f_2 \cdot S/h](F_2/F) + m_n(F_1/F) + m_o \cdot (F_3/F); \quad (5)$$

$$m_{\Pi} = m_3 + m_4,$$

где  $m_3$  и  $m_4$  – аддитивные добавки, учитывающие влияние контактного трения соответственно на боковых и горизонтальных поверхностях ступицы.

Коэффициенты  $m_3$  и  $m_4$  определим из работ [2–4]:

$$m_3 = 4 \cdot f_2 \cdot h_{\Pi} / d_{\Pi}; \quad m_4 = 0,167 \cdot d_{\Pi} / h_{\Pi}. \quad (6)$$

Определим коэффициент напряженного состояния в закрытом штампе по рис. 1, б при  $H_0 = 3,9$  мм,  $D_0 = 47,5$  мм и с  $H_0/D_0 = 0,82$  (при одинаковом объеме металла в заготовках, что и в первом случае). Определим относительные обжатия и скорость деформации (при скорости движения ползуна  $v = 1,0$  м/с). Параметры деформации для диска следующие:

$$\Delta h_x = H_0 - h = 39 - 8,6 = 30,4$$
 мм;  $\varepsilon_2 = 30,4/39 = 0,778$ ;  $u = 1000 \cdot 0,778/30,4 = 25,5$  с<sup>-1</sup>.

Напряжения течения металла при деформации диска равно (без учета разогрева металла при деформации):

$$\sigma_{m0} = 86$$
 Н/мм<sup>2</sup>,  $\kappa_{yn} = 1,56$ ;  $\sigma_{m2} = 1,56 \cdot 86 = 134$  Н/мм<sup>2</sup>.

В этом случае штамповки шестерни с указанными выше размерами получим коэффициент  $n_\sigma = 4,53$  при, а СНКН равно  $p_{cp} = 608$  Н/мм<sup>2</sup>, что несколько больше, чем при деформации высокой заготовки.

Выполним оценку формул (3) и (5) по результатам экспериментов [1] деформации деталей типа шестерни с использованием свинцовых образцов. Закономерности упрочнения свинца по данным [4] можно описать следующими зависимостями:

$$\sigma_m = 10 + 41,5 \varepsilon^{0,5}; \quad (7)$$

$$\sigma_m = 17 + 41,5 \varepsilon^{0,5}. \quad (8)$$

Выражение (7) получено по данным испытаний на фрикционном прессе ( $u = 7$  с<sup>-1</sup>,  $\sigma_{m0} = 10$  Н/мм<sup>2</sup> при  $\varepsilon = 0$ ), а выражение (8) – при деформации на копре ( $u = 150$  с<sup>-1</sup>,  $\sigma_{m0} = 17$  Н/мм<sup>2</sup> при  $\varepsilon = 0$ ). С учетом влияния скорости деформации напряжение течения свинца определяется выражением:

$$\sigma_m = [10 + 0,049(u - 7)] + 41,5\varepsilon^{0,5} \quad (9)$$

$$m = H_0/D_0 = 2,5$$

$$m = H_0/D_0 = 0,8$$

$$\varepsilon_1 = 0,52; \varepsilon_2 = 0,95; u_1 = 27,3 \text{ с}^{-1}; u_2 = 50 \text{ с}^{-1};$$

$$\sigma_{m1} = 40,9 \text{ Н/мм}^2; \sigma_{m2} = 52,9 \text{ Н/мм}^2$$

$$n_\sigma = 4,38; p_{cp} = 4,38 \cdot 40,9 = 179 \text{ Н/мм}^2;$$

$$P = 179 \cdot 0,947 = 169 \text{ кН.}$$

$$\varepsilon_1 = 0,128; \varepsilon_2 = 0,89; u_1 = 9,6 \text{ с}^{-1}; u_2 = 67 \text{ с}^{-1}$$

$$\sigma_{m1} = \sigma_{m2} = \sigma_{m3}; \sigma_{m0} = 31,85 \text{ Н/мм}^2; \sigma_{m2} = 52 \text{ Н/мм}^2;$$

$$n_\sigma = 4,48; p_{cp} = 4,48 \cdot 52 = 250 \text{ Н/мм}^2;$$

$$P = 250 \cdot 0,947 = 237 \text{ кН.}$$

Размеры детали при закрытой штамповке указаны на рис. 3. Исходные параметры к расчету следующие:  $H_0/D_0 = 32/12,8 = 2,5$  (высокая заготовка);  $H_0/D_0 = 14,9/18,6 = 0,8$  (низкая заготовка);  $h_n = 13,0$  мм, скорость хода штампа  $v = 1,0$  м/с. Принимаем для свинцовой заготовки показатель трения равным коэффициенту трения  $f_2 = 0,3$  [8]. В экспериментальных исследованиях [1] при деформации высокой заготовки ( $m = 2,5$ ) сила оказалась равной  $P = 178$  кН, а во втором случае ( $m = 0,8$ ) –  $P = 245$  кН. Ошибка в расчетах по формулам (3) и (5) не превышает 6 %, что допустимо (см. таблицу).

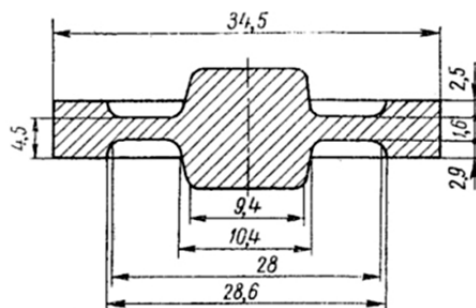


Рис. 3. Свинцовая модель отштампованной шестерни

## ВЫВОДЫ

Таким образом, на базе известной формулы работы [3] получены приемлемые расчетные зависимости для определения нормального контактного напряжения при деформации металла в закрытых штампах и силы штамповки, учитывающие влияние контактного трения и размеров исходной заготовки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов-Аляев Г. А. *Механические основы пластической обработки металлов* / Г. А. Смирнов-Аляев. – Машиностроение. – Ленинград, 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. Тарновский И. Я. *Теория обработки металлов давлением* / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго и др. – М. : Металлургиздат, 1963. – 672 с.
5. *Ковка и штамповка. Справочник в 4-х томах. Горячая объемная штамповка. Т. 2.* / Под. ред. Е. И. Семенова. – М. : Машиностроение, 1986. – 592 с.
6. Николаев В. А. *Теория прокатки* / В. А. Николаев. – Запорожье : ЗГИА, 2007. – 228 с.
7. *Теория прокатки. Справочник* / А. И. Целиков, А. Д. Томленов, В. И. Зюзин и др. – М. : Металлургия, 1982. – 335 с.
8. Грудев А. П. *Трение и смазки при обработке металлов давлением* / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М. : Металлургия, 1982. – 312 с.

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

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

E-mail: [unnva@i.ua](mailto:unnva@i.ua)

Статья поступила в редакцию 26.12.2013 г.