

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОСАДКИ И ВЫСАДКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК. Часть III. ВЫСАДКА ПОЛОЙ ЗАГОТОВКИ

Определено напряженное состояние при высадке полых цилиндрических заготовок. Получены формулы для расчета основных технологических параметров высадки и прогнозирования разрушения. Точность теоретических результатов подтверждена сопоставлением с экспериментальными данными.

Очаг пластической деформации при высадке фланца на полую заготовку представим в виде двух областей (рис. 1). В этой схеме применена цилиндрическая система координат ρ, θ, z с началом координат на уровне неподвижного нижнего инструмента. Высаживающий инструмент движется со скоростью v_0 .

Принимаем следующие допущения: материал считаем жесткопластическим, а упрочнение учитываем средней по очагу пластической деформации величиной напряжения текучести σ_s ; силы контактного трения определяем по закону Зибеля как $\tau_k = \mu\beta\sigma_s$, где μ — коэффициент трения по напряжению текучести, а β — коэффициент Лоде.

В решении используем относительные величины напряжений, отнесенные к σ_s .

В обеих областях кинематически возможные скорости определяются выражениями:

$$v_z = f(z);$$

$$v_\rho = \frac{1}{2} \frac{\partial f(z)}{\partial z} \left(\rho - \frac{d^2}{4\rho} \right).$$

С учетом этого напряженное состояние в областях **1** и **2** определяется выражениями, аналогичными полученным в работе [1], но с другими постоянными коэффициентами, учитывающими иные граничные условия.

Рассмотрим область **1**. Здесь изменение постоянных коэффициентов связано с целесообразностью получения обобщенного решения с различными коэффициентами трения по

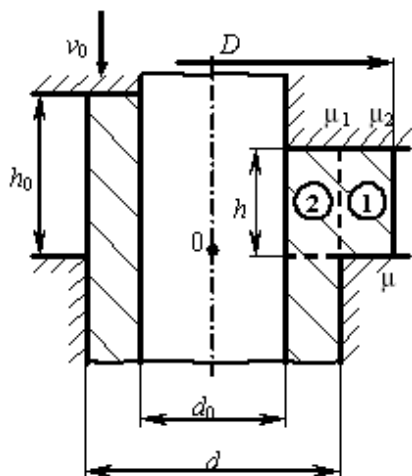


Рис. 1. Высадка фланца на полую заготовке

верхней и нижней контактными поверхностями, которое можно затем распространить на случаи высадки изделий сложной формы. В соответствии с формулами работы [1] напряженное состояние в области **1** определено выражениями:

$$\tau_{\rho z} = (C_2 - C_1 z) \left(\rho - \frac{d_0^2}{4\rho} \right); \quad (1)$$

$$\sigma_z = (C_1 z - 2C_2)z + \frac{1}{12\beta} \frac{d_0^2}{\rho^2} + \frac{C_1}{2} \rho^2 - \frac{C_1 d_0^2}{4} \ln \rho + C_3; \quad (2)$$

$$\sigma_\rho = \beta + (C_1 z - 2C_2)z + \frac{1}{12\beta} \frac{d_0^2}{\rho^2} + \frac{C_1}{2} \rho^2 - \frac{C_1 d_0^2}{4} \ln \rho + C_3. \quad (3)$$

Из граничных условий $\tau_{\rho z} = \beta\mu$ при $\rho = D/2, z = 0$ и $\tau_{\rho z} = -\beta\mu_2$ при $\rho = D/2$ и $z = h$ следует, что произвольные постоянные в выражении касательного напряжения будут

$$\begin{cases} C_1 = \frac{2\beta(\mu + \mu_2)D}{(D^2 - d_0^2)h}, \\ C_2 = \frac{2\beta\mu D}{D^2 - d_0^2}. \end{cases} \quad (4)$$

Используя граничное условие $\sigma_\rho = 0$ при $z = h$ и $\rho = D/2$, находим произвольную постоянную

$$C_3 = -\beta - (C_1 h - 2C_2)h - \frac{d_0^2}{3\beta D^2} - \frac{C_1 D^2}{8} + \frac{C_1 d_0^2}{4} \ln \frac{D}{2}. \quad (5)$$

Подставив в выражение (2) $z = h$, учитывая соотношение (5), получим формулу для нормальных напряжений на поверхности контакта с верхним инструментом:

$$\sigma_{z1} = -\beta + \frac{d_0^2}{3\beta} \left(\frac{1}{4\rho^2} - \frac{1}{D^2} \right) - \frac{C_1}{8} \left(D^2 - 4\rho^2 + 2d_0^2 \ln \frac{2\rho}{D} \right). \quad (6)$$

Сила высадки, приходящаяся на поверхность контакта области **1** с верхним инструментом, будет равна:

$$P_1 = 2\pi \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} |\sigma_{z1}| \rho d\rho = \frac{\pi}{4} \left\{ \beta(D^2 - d^2) + \frac{d_0^2}{3\beta} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} - 2 \ln \frac{D}{d} \right) + \frac{C_1}{16} \left[2d_0^2 \left(d^2 - D^2 + 2d^2 \ln \frac{D}{d} \right) + D^4 - 2D^2 d^2 + d^4 \right] \right\}. \quad (7)$$

Подставив в выражение (3) $z = h$, $\rho = d/2$, учитывая соотношение (5), получим значение радиального напряжения в характерной точке границы между областями **1** и **2**:

$$\sigma_{\rho 1} = -\frac{d_0^2}{3\beta} \left(\frac{1}{D^2} - \frac{1}{d^2} \right) - \frac{C_1}{8} \left(D^2 - d^2 - 2d_0^2 \ln \frac{D}{d} \right). \quad (8)$$

Теперь рассмотрим область **2**, в которой напряженное состояние определено выражениями, аналогичными формулам (1)–(3):

$$\tau_{\rho z} = (C_5 - C_4 z) \left(\rho - \frac{d_0^2}{4\rho} \right); \quad (9)$$

$$\sigma_z = (C_4 z - 2C_5)z + \frac{1}{12\beta} \frac{d_0^2}{\rho^2} + \frac{C_4}{2} \rho^2 - \frac{C_4 d_0^2}{4} \ln \rho + C_6; \quad (10)$$

$$\sigma_\rho = \beta + (C_4 z - 2C_5)z + \frac{1}{12\beta} \frac{d_0^2}{\rho^2} + \frac{C_4}{2} \rho^2 - \frac{C_4 d_0^2}{4} \ln \rho + C_6. \quad (11)$$

Из граничных условий $\tau_{\rho z} = 0,5\beta$ при $\rho = d/2$, $z = 0$ и $\tau_{\rho z} = -\beta\mu_1$ при $\rho = d/2$ и $z = h$ следует, что произвольные постоянные в выражении касательного напряжения будут

$$\begin{cases} C_4 = \frac{2\beta(0,5 + \mu_1)d}{(d^2 - d_0^2)h}; \\ C_5 = \frac{\beta d}{d^2 - d_0^2}. \end{cases} \quad (12)$$

Используя граничное условие $\sigma_{\rho 2} = \sigma_{\rho 1}$ при $z = h$ и $\rho = d/2$, найдем произвольную постоянную

$$C_6 = -\beta - \frac{1}{3\beta} \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 - (C_4 h - 2C_5)h - \frac{C_4}{8} \left(d^2 - 2d_0^2 \ln \frac{d}{2} \right) + \sigma_{\rho 1}. \quad (13)$$

Подставив в выражение (10) $z = h$, учитывая соотношение (13), получим формулу для нормальных напряжений на поверхности контакта с верхним инструментом:

$$\sigma_{z 2} = -\beta + \frac{d_0^2}{3\beta} \left(\frac{1}{4\rho^2} - \frac{1}{d^2} \right) - \frac{C_4}{8} \left(d^2 - 4\rho^2 + 2d_0^2 \ln \frac{2\rho}{d} \right) + \sigma_{\rho 1}. \quad (14)$$

С учетом этого, силу высадки, приходящуюся на поверхность контакта области **2** с верхним инструментом, можно выразить как

$$P_2 = 2\pi \int_{\frac{d_0}{2}}^{\frac{d}{2}} |\sigma_{z 2}| \rho d\rho = \frac{\pi}{4} \left\{ \beta(d^2 - d_0^2) + \frac{d_0^2}{3\beta} \left(1 - \frac{d_0^2}{d^2} - 2 \ln \frac{d}{d_0} \right) + \right.$$

$$+ \frac{C_4}{16} \left[(d^2 - 3d_0^2)(d^2 - d_0^2) + 4d_0^4 \ln \frac{d}{d_0} \right] - \sigma_{\rho 1}(d^2 - d_0^2) \left. \right\}. \quad (15)$$

Удельная сила высадки с учетом формул (4), (7), (8), (12) и (15) определяется выражением

$$q = \frac{P_1 + P_2}{\frac{\pi(D^2 - d_0^2)}{4}} = \beta \left\{ 1 + \frac{d_0^2}{3\beta^2} \left(\frac{1}{D^2} - \frac{2}{D^2 - d_0^2} \ln \frac{D}{d_0} \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{8(D^2 - d_0^2)h} \left[\frac{(\mu + \mu_2)D}{D^2 - d_0^2} \left((D^2 - d^2)(D^2 - 4d_0^2 + d^2) + 4d_0^4 \ln \frac{D}{d} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + (0,5 + \mu_1)d \left(d^2 - 3d_0^2 + \frac{4d_0^4}{d^2 - d_0^2} \ln \frac{d}{d_0} \right) \right] \right\}. \quad (16)$$

Полная сила высадки полой заготовки определяется по формуле

$$P = \sigma_s F q, \quad (17)$$

в которую следует подставлять площадь

$$F = \frac{\pi(D^2 - d_0^2)}{4}. \quad (18)$$

Накопленные деформации при такой высадке можно найти как

$$e_i = \ln \frac{D^2 - d_0^2}{d^2 - d_0^2}. \quad (19)$$

Если кривая упрочнения построена для условных относительных степеней деформации e , то их следует определять по формуле

$$e = 1 - e^{-e_i}. \quad (20)$$

На основе общей формулы (16) получим расчетные соотношения для различных частных случаев высадки полых изделий, подставляя среднее значение $\beta = 1,1$.

Для высадки фланца (см. рис. 1) в формулу (16) следует подставить $\mu_2 = \mu$ и, учитывая разъяснения к выражению (13) из работы [2], $\mu_1 = \mu d/D$, в результате получим:

$$q = 1,1 \left\{ 1 + 0,275d_0^2 \left(\frac{1}{D^2} - \frac{2}{D^2 - d_0^2} \ln \frac{D}{d_0} \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{8(D^2 - d_0^2)h} \left[\frac{2\mu D}{D^2 - d_0^2} \left((D^2 - d^2)(D^2 - 4d_0^2 + d^2) + 4d_0^4 \ln \frac{D}{d} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + (0,5 + \mu_1)d \left(d^2 - 3d_0^2 + \frac{4d_0^4}{d^2 - d_0^2} \ln \frac{d}{d_0} \right) \right] \right\} +$$

$$+d \left(0,5 + \mu \frac{d}{D} \right) \left(d^2 - 3d_0^2 + \frac{4d_0^4}{d^2 - d_0^2} \ln \frac{d}{d_0} \right) \Big] \Big\} . \quad (21)$$

Для высадки поперечного утолщения (рис. 2) в формулу (16) следует подставить $\mu_2 = \mu$ и $\mu_1 = 0,5$, тогда получим

$$q = 1,1 \left\{ 1 + 0,275d_0^2 \left(\frac{1}{D^2} - \frac{2}{D^2 - d_0^2} \ln \frac{D}{d_0} \right) + \frac{1}{8(D^2 - d_0^2)h} \left[\frac{2\mu D}{D^2 - d_0^2} \left((D^2 - d^2)(D^2 - 4d_0^2 + d^2) + 4d_0^4 \ln \frac{D}{d} \right) + d \left(d^2 - 3d_0^2 + \frac{4d_0^4}{d^2 - d_0^2} \ln \frac{d}{d_0} \right) \right] \right\} . \quad (22)$$

Для высадки изделия сложного профиля, имеющего поперечную симметрию верха и низа высаживаемой части относительно плоскости разреза инструмента и жесткие зоны по верхней и нижней границам очага пластической деформации (рис. 3, а), в формулу (63) из работы [1] следует подставить $\mu = 0,5$ и d_0 вместо d , в результате чего получим:

$$q = 1,1 \left\{ 1 + 0,275d_0^2 \left(\frac{1}{D^2} - \frac{2}{D^2 - d_0^2} \ln \frac{D}{d_0} \right) + \frac{D}{8h(D^2 - d_0^2)^2} \left[(D^2 - 3d_0^2)(D^2 - d_0^2) + 4d_0^4 \ln \frac{D}{d_0} \right] \right\} . \quad (23)$$

Для высадки изделия сложного профиля, имеющего поперечную симметрию верха и низа высаживаемой части относительно плоскости разреза инструмента и жесткие зоны на части верхней и нижней границ очага пластической деформации (рис. 3, б), в формулу (22) следует вместо d подставлять значение d_1 .

Для высадки изделия сложного профиля, не имеющего поперечной симметрии верха и низа высаживаемой части относительно плоскости разреза инструмента, при наличии жесткой зоны по всей верхней поверхности (рис. 4, а), в формулу (16) следует подставить $\mu_2 = 0,5$ и, с учетом выражения (13) из работы [2], $\mu_1 = 0,5d/D$, в результате чего получим:

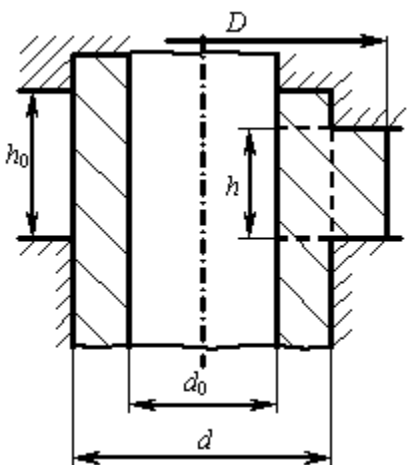


Рис. 2. Высадка поперечного утолщения на полой заготовке

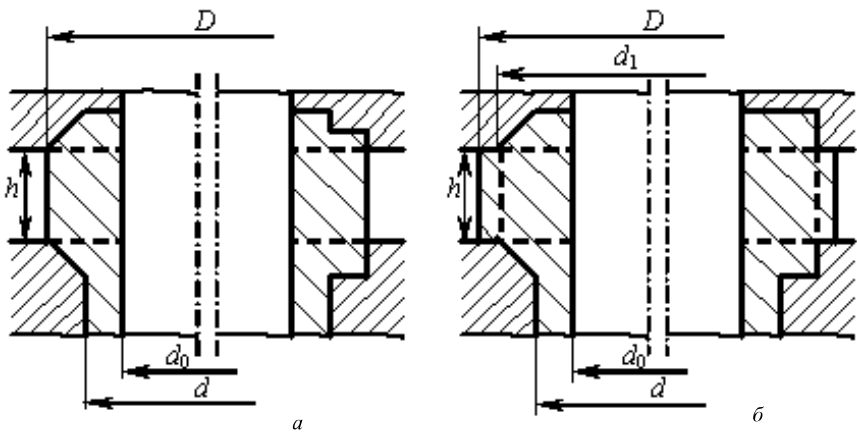


Рис. 3. Высадка изделия сложного профиля с одинаковой протяженностью жестких зон по верхней и нижней границам (а) и на части верхней и нижней границ (б) очага пластической деформации

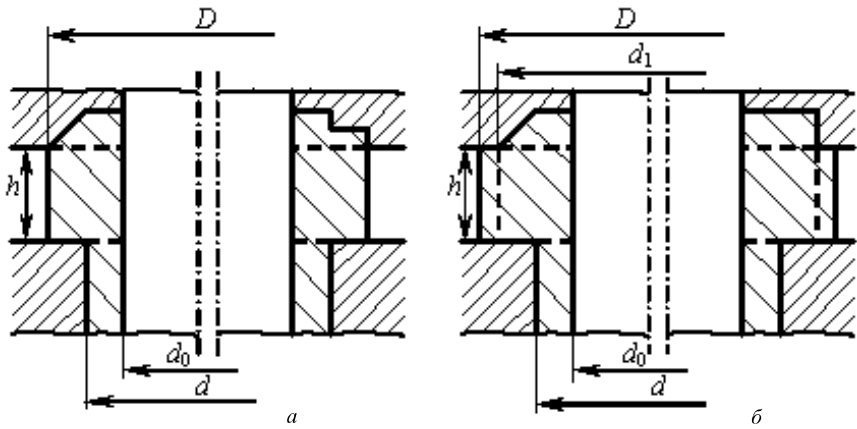


Рис. 4. Варианты высадки полой заготовки с жесткой зоной по всей верхней поверхности (а) и на части верхней поверхности (б)

$$q = 1, 1 \left\{ 1 + 0, 275d_0^2 \left(\frac{1}{D^2} - \frac{2}{D^2 - d_0^2} \ln \frac{D}{d_0} \right) + \frac{1}{8(D^2 - d_0^2)h} \left[\frac{(0, 5 + \mu)D}{D^2 - d_0^2} \left((D^2 - d^2)(D^2 - 4d_0^2 + d^2) + 4d_0^4 \ln \frac{D}{d} \right) + 0, 5d \left(1 + \frac{d}{D} \right) \left(d^2 - 3d_0^2 + \frac{4d_0^4}{d^2 - d_0^2} \ln \frac{d}{d_0} \right) \right] \right\}. \quad (24)$$

Для высадки изделия сложного профиля, не имеющего поперечной симметрии верха и низа высаживаемой части относительно плоскости разреза инструмента, при наличии жесткой зоны на части верхней поверхности (рис. 4, б), в формулу (16) следует подставить $\mu_1 = 0, 5d/d_1$,

в результате чего получим:

$$q = 1,1 \left\{ 1 + 0,275d_0^2 \left(\frac{1}{D^2} - \frac{2}{D^2 - d_0^2} \ln \frac{D}{d_0} \right) + \frac{1}{8(D^2 - d_0^2)h} \left[\frac{(\mu + \mu_2)D}{D^2 - d_0^2} \left((D^2 - d^2)(D^2 - 4d_0^2 + d^2) + 4d_0^4 \ln \frac{D}{d} \right) + 0,5d \left(1 + \frac{d}{d_1} \right) \left(d^2 - 3d_0^2 + \frac{4d_0^4}{d^2 - d_0^2} \ln \frac{d}{d_0} \right) \right] \right\}, \quad (25)$$

где

$$\mu_2 = \frac{0,5(d_1 - d) + \mu(D - d_1)}{D - d}. \quad (26)$$

Для высадки изделия сложного профиля, не имеющего поперечной симметрии верха и низа высаживаемой части относительно плоскости разреза инструмента, при наличии жесткой зоны по всей нижней поверхности (рис. 5, а) в формулу (82) из работы [1], вместо коэффициента трения μ , следует подставить $0,5(0,5 + \mu)$, в результате чего получим:

$$q = 1,1 \left\{ 1 + 0,275d_0^2 \left(\frac{1}{D^2} - \frac{2}{D^2 - d_0^2} \ln \frac{D}{d_0} \right) + \frac{(0,5 + \mu)D}{8h(D^2 - d_0^2)^2} \left[(D^2 - 3d_0^2)(D^2 - d_0^2) + 4d_0^4 \ln \frac{D}{d_0} \right] \right\}. \quad (27)$$

Для высадки изделия сложного профиля, не имеющего поперечной симметрии верха и низа высаживаемой части относительно плоскости разреза инструмента, при наличии жесткой зоны на части нижней

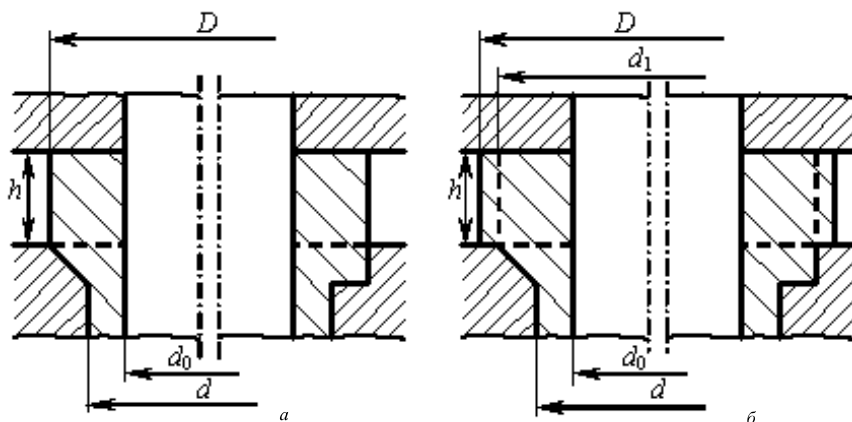


Рис. 5. Варианты высадки полый заготовки с жесткой зоной по всей нижней поверхности (а) и на части нижней поверхности (б)

поверхности (рис. 5, б), в формулу (16) следует подставить $\mu_2 = \mu$, $\mu_1 = \mu d_1/D$, а вместо d — d_1 , в результате чего получим:

$$q = 1, 1 \left\{ 1 + 0, 275 d_0^2 \left(\frac{1}{D^2} - \frac{2}{D^2 - d_0^2} \ln \frac{D}{d_0} \right) + \frac{1}{8(D^2 - d_0^2)h} \left[\frac{2\mu D}{D^2 - d_0^2} \left((D^2 - d_1^2)(D^2 - 4d_0^2 + d_1^2) + 4d_0^4 \ln \frac{D}{d_1} \right) + d_1 \left(0, 5 + \mu \frac{d_1}{D} \right) \left(d_1^2 - 3d_0^2 + \frac{4d_0^4}{d_1^2 - d_0^2} \ln \frac{d_1}{d_0} \right) \right] \right\}. \quad (28)$$

Прогнозирование разрушения при высадке полых изделий осуществляется по методике, подробно изложенной в работе [2].

Гидростатическое давление для схем на рис. 1, 2, 3, б, 4, б и 5, б, с учетом зависимости (86) из работы [1], определяется по формуле:

$$\sigma = -0, 367 - 0, 202 \frac{d_0^2}{D^2} - 1, 1 \frac{\mu D h}{D^2 - d_0^2}. \quad (29)$$

Гидростатическое давление для схемы (см. рис. 3, а) определяется по той же формуле (29) с подстановкой в нее $\mu = 0, 5$. Для схем, приведенных на рис. 4, а и 5, а, гидростатическое давление в опасной точке определяется по формуле:

$$\sigma = -0, 367 - 0, 202 \frac{d_0^2}{D^2} - 0, 55 \frac{(0, 5 + \mu) D h}{D^2 - d_0^2}. \quad (30)$$

Накопленную деформацию в опасной точке удобно определять как

$$e_{iA} = (1 + 2\mu) \ln \frac{D^2 - d_0^2}{d^2 - d_0^2}. \quad (31)$$

Пример 1. Из отожженной стали 20X выдавливанием была получена полая цилиндрическая заготовка с $d_0 = 22, 7$ мм, которая затем была высажена по схеме на рис. 1 до размеров $D = 40$ мм, $d = 34, 5$ мм и $h = 5, 3$ мм (рис. 60, з, на с. 233 и п. 15 в табл. 44 на с. 228 справочника [3]). Сила окончания высадки равнялась $P_3 = 1200$ кН. Требуется определить силу окончания высадки теоретически и сравнить полученное значение с экспериментальным, учитывая, что при выдавливании заготовка получила в зоне последующей высадки накопленную деформацию $e_{i0} = 0, 67$.

Решение. По формуле (19) определяем накопленную деформацию высадки $e_{i1} = 0, 474$. Вычисляем суммарную накопленную деформацию $e_i = e_{i0} + e_{i1} = 1, 144$. Так как кривая упрочнения 1 отожженной стали 20X, показанная на рис. 36, с. 63 справочника [3], построена для условных степеней деформации, то по формуле (20) вычисляем

$e = 0,682$, после чего находим напряжение текучести $\sigma_s = 880$ МПа. В связи с тем, что после выдавливания обновление смазочного слоя заготовки не производилось, принимаем среднее значение коэффициента трения $\mu = 0,3$ и по формуле (24) вычисляем относительную удельную силу высадки фланца $q = 1,589$. По выражению (18) находим наибольшую площадь поперечного сечения в момент окончания высадки $F = 851,9$ мм², после чего по формуле (17) вычисляем силу высадки $P = 1191$ кН. Таким образом, расхождение по отношению к теоретической величине $\delta = 0,7\%$.

Рассмотрим далее пример выполнения конкретных технологических расчетов для наиболее общего случая высадки, обобщающего методику практических вычислений для полых изделий сложной формы.

Пример 2. Из фосфатированной и омыленной трубной заготовки, выполненной из стали 35, получают изделие, характерные стадии высадки которого показаны на рис. 6 (не в масштабе). Требуется определить изменение силы по ходу высадки и оценить возможность появления трещин. Для определения напряжения текучести стали 35 использовали аппроксимацию, соответствующую кривой упрочнения 8, показанной на рис. 40, с. 64 справочника [3]:

$$\sigma_s = 1260 - 640e^{-e_i} - 220e^{-10e_i} \text{ МПа.} \quad (32)$$

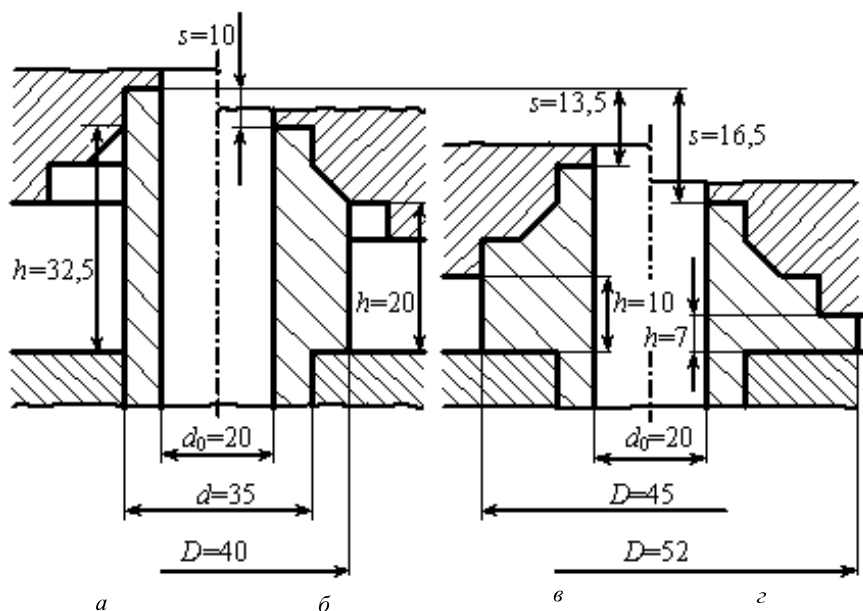


Рис. 6. Изменение геометрии трубной заготовки по ходу высадки поперечного утолщения сложной формы

Решение. Определяем силу начала высадки. Поскольку накопленная деформация $e_i = 0$, то, согласно зависимости (32), $\sigma_s = 400$ МПа. С учетом хорошей смазки принимаем $\mu = 0,1$. Так как схема на рис. 6, а соответствует рис. 2, то относительную удельную силу находим по формуле (22), в которую подставляем $d_0 = 20$ мм, $D = d = 35$ мм и $h = 32,5$ мм: $q = 1,117$. По выражению (18) вычисляем начальную площадь поперечного сечения $F = 648,0$ мм², после чего по формуле (17) вычисляем силу начала высадки $P = 290$ кН.

Определяем силу, соответствующую стадии высадки, показанной на рис. 6, б. По формуле (19) находим накопленную деформацию $e_i = 0,375$, после чего по зависимости (32) определяем напряжение текучести $\sigma_s = 815$ МПа. Поскольку рабочий ход сравнительно невелик, то, по-прежнему, принимаем $\mu = 0,1$. Так как схема на рис. 6, б соответствует схеме на рис. 4, а, то относительную удельную силу находим по формуле (24), в которую подставляем $d_0 = 20$ мм, $d = 35$ мм, $D = 40$ мм и $h = 20$ мм: $q = 1,185$. По выражению (18) вычисляем текущую площадь поперечного сечения $F = 942,5$ мм², после чего по формуле (17) вычисляем силу высадки $P = 910$ кН, соответствующую рабочему ходу $s = 10$ мм.

Определяем силу, соответствующую стадии высадки, показанной на рис. 6, в. По формуле (19) находим накопленную деформацию $e_i = 0,678$, после чего по зависимости (32) определяем напряжение текучести $\sigma_s = 935$ МПа. Учитывая увеличение рабочего хода, принимаем с запасом $\mu = 0,3$. Так как схема на рис. 6, в соответствует схеме на рис. 4, а, то относительную удельную силу находим по формуле (24), в которую подставляем $d_0 = 20$ мм, $d = 35$ мм, $D = 45$ мм и $h = 10$ мм: $q = 1,437$ (для сравнения укажем, что если, по-прежнему, принять $\mu = 0,1$, то получим значение $q = 1,368$, которое отличается от найденного лишь на 4,8 %, что указывает на достаточную устойчивость выведенных нами формул). По выражению (18) вычисляем текущую площадь поперечного сечения $F = 1276,3$ мм², после чего по формуле (17) вычисляем силу высадки $P = 1715$ кН, соответствующую рабочему ходу $s = 13,5$ мм.

Определяем силу, соответствующую окончанию высадки (см. рис. 6, г). По формуле (19) находим накопленную деформацию $e_i = 1,027$, по зависимости (32) определяем напряжение текучести $\sigma_s = 1031$ МПа. Принимаем $\mu = 0,3$. Так как схема на рис. 6, г соответствует схеме на рис. 4, б, то для значений $d_0 = 20$ мм, $d = 35$ мм, $d_1 = 45$ мм, $D = 52$ мм и $h = 7$ мм сначала по формуле (26) находим значение приведенного коэффициента трения $\mu_2 = 0,418$, после чего по формуле (25) находим относительную удельную силу оконча-

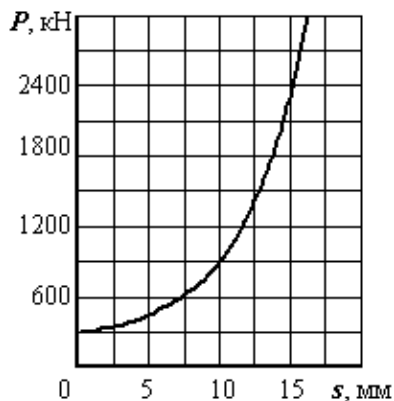


Рис. 7. Изменение силы высадки

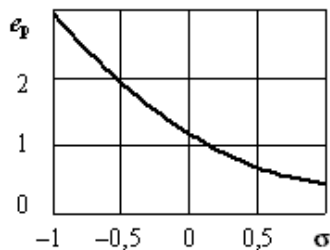


Рис. 8. Диаграмма пластичности стали 35 при температуре 20 °С

ния высадки: $q = 1,677$. По выражению (18) вычисляем наибольшую площадь поперечного сечения $F = 1809,6 \text{ мм}^2$, после чего по формуле (17) вычисляем силу высадки $P = 3128 \text{ кН}$, соответствующую рабочему ходу $s = 16,5 \text{ мм}$.

Соответствующая расчетным значениям диаграмма изменения силы по ходу высадки показана на рис. 7.

Теперь выполним прогнозирование разрушения. Для значений $\mu = 0,3$, $d_0 = 20 \text{ мм}$, $d = 35 \text{ мм}$, $D = 52 \text{ мм}$ и $h = 7 \text{ мм}$ по формуле (29) вычисляем относительное гидростатическое давление $\sigma = -0,449$. Для данной величины находим по диаграмме пластичности на рис. 8 деформацию разрушения $\epsilon_p = 1,8$. По формуле (31) находим накопленную деформацию в опасной точке $\epsilon_{iA} = 1,643$. Так как $\epsilon_{iA} < \epsilon_p$, то делаем вывод, что разрушение не произойдет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Общая теория осадки и высадки цилиндрических заготовок. Часть I. Осадка // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия "Машиностроение". – 2004. – № 1. – С. 82–104.
2. Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Общая теория осадки и высадки сплошной цилиндрической заготовки. Часть II. Высадка // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия "Машиностроение". – 2004. – № 4. – С. 57–77.
3. Холодная объемная штамповка. Справочник / Под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1973. – 496 с.

Статья поступила в редакцию 2.06.2003