

С. В. САПАРОВСКИЙ, Е. П. СМЕЛЯКОВ, И. И. КАЛУЖСКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ ДЕТАЛЕЙ СТУПЕНЯМИ НА ЛИСТОШТАМПОВОЧНОМ МОЛОТЕ В СПЕЦИАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

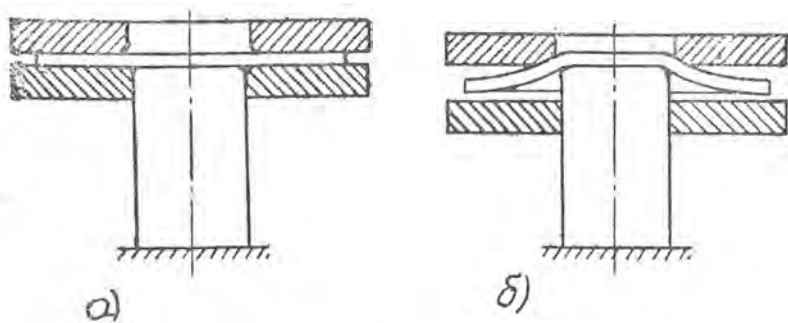
В статье [1] приведено описание конструкции и принципа работы специальной установки, предназначенной для глубокой вытяжки деталей из листовых материалов на воздушном листоштамповочном молоте. В настоящее время закончены работы по исследованию этого метода, результаты которых приводятся в данной статье.

Процесс вытяжки на молоте в специальной установке происходит ступенями, посредством нанесения повторяющихся один за другим ударов. Между матрицей и инструментом, вследствие перемещения прижима под действием инерционных сил, сообщенных нижней подвижной системе при ударе, образуется зазор. При этом процесс вытяжки каждой ступени можно разделить на несколько различных стадий:

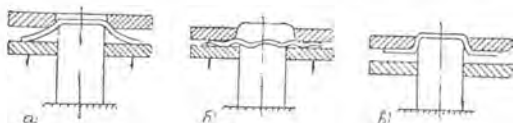
1. в начальный момент удара происходит изгиб и вытяжка заготовки до момента потери устойчивости фланца;
2. вытяжка заготовки с образованием складок на фланце;
3. посадка складок и некоторое динамическое «подтягивание» с весьма незначительной вытяжкой заготовки.

Данная стадия происходит при максимальном давлении жидкости под поршнем до момента открытия клапана. Схематично процесс вытяжки показан на фиг. 1 и 2.

При теоретическом исследовании процесса было установлено, что на первой стадии усилие вытяжки является максимальным. Оно соответствует моменту потери устойчивости



Фиг. 1. Схема вытяжки заготовок при нанесении первого удара;
 а — положение заготовки и инструмента перед нанесением удара;
 б — положение заготовки и инструмента после нанесения удара.



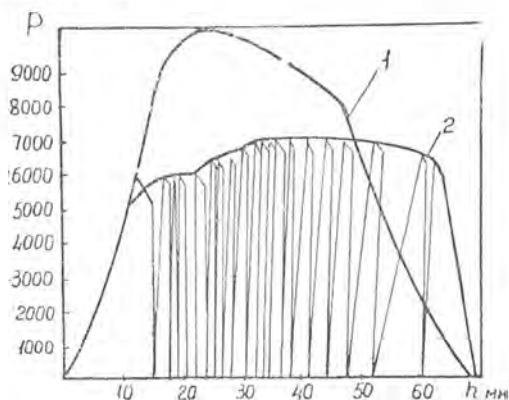
Фиг. 2. Схема вытяжки заготовки при нанесении второго и последующих ударов:
 а — момент изгиба заготовки вокруг пуансона и некоторая вытяжка до потери фланцем устойчивости; б — стадия вытяжки со складкообразованием; б₁ — стадия посадки складок и перемещения прижима вниз после посадки на величину ΔH .

фланца. После образования складок усилие вытяжки снижается.

Количественное определение усилия вытяжки при новом методе показало, что его величина оказывается меньше усилия вытяжки с прижимом фланца заготовки. Это объясняется тем, что усилие, требуемое для изгиба складок после потери устойчивости фланца меньше, чем усилие пластического деформирования фланца, кроме того, здесь исключается также трение на фланце заготовки.

Для определения величины усилия в момент потери устойчивости фланца заготовки были проведены сравнительные экспериментальные исследования на гидравлическом прессе ПГ-474. Геометрические параметры инструмента и заготовки для этого принимались следующие: $d_{\text{пуан}} = 100 \text{ мм}$; $m = 0,54$; $r_m = r_n = 8,0 \text{ мм}$; материал Д16АМ л1,5. Вначале вытяжка производилась обычным способом, то есть, при сосредоточенной деформации с прижимом фланца. Затем про-

изводилась вытяжка ступенями со складкообразованием и последующей правкой гофр. Измерялись параметры вытяжки осциллографическим методом. На основании расшифрованных осциллограмм усилия и хода пуансона построены диаграммы силового режима обычной вытяжки с прижимом и ступенчатой (фиг. 3).



Фиг. 3. Диаграмма силового режима при вытяжке с прижимом (кривая 1) и ступенчатой со складкообразованием (кривая 2).

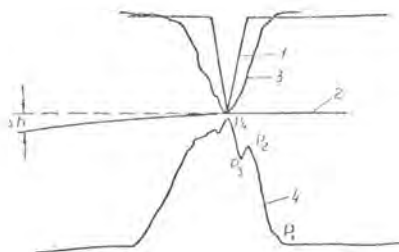
Из диаграммы видно, что максимальное усилие при ступенчатой вытяжке соответствует 6000—7000 кг, в то время как для осуществления процесса вытяжки в инструментальном штампе с прижимом оно составляет 10200 кг, т. е. на 30—40% выше, чем при вытяжке в спец. установке.

При исследовании силового режима вытяжки была использована промышленная установка, предназначенная для изготовления конкретных производственных деталей. Снятие необходимых параметров процесса (силовые характеристики и движение отдельных элементов установки в процессе вытяжки) осуществлялось с помощью измерения неэлектрических величин изменением величины сопротивления электрической цепи.

Замер величины давления жидкости под поршнем и характер его изменения в процессе удара производится при помощи угольных датчиков сопротивления типа УИ5М, смонтированных в систему установки. Величина усилия вытяжки и ее изменение замерялись при помощи проволочных тензо-

датчиков, наклеенных на внутреннюю поверхность специально изготовленного для этой цели пуансона, полого внутри. Перемещения стесселя нижней системы установки замерялись при помощи струнных ходографов сопротивления. Скорость изменения замеряемых параметров определялась с помощью отметчика времени частотой 500 гц.

Запись показаний всех датчиков производилась на киноплёнку с помощью шлейфовых осциллографов типа Н-102. На типовой осциллограмме процесса вытяжки детали цилиндрической формы за один удар (фиг. 4) наблюдаются четыре



Фиг. 4. Типовой вид осциллограммы процесса вытяжки детали цилиндрической формы на установке за один удар стесселя молота:

1 — кривая записи изменения давления жидкости под поршнем нижнего гидроагрегата; 2 — кривая записи движения прижима; 3 — кривая записи движения стесселя молота; 4 — кривая записи усилия вытяжки.

явно выраженные характерные точки P_1 , P_2 , P_3 и P_4 . P_1 соответствует усилию изгиба заготовки вокруг пуансона в первую стадию вытяжки. P_2 — моменту потери устойчивости фланцем. Участок P_2P_3 показывает снижение усилия в процессе вытяжки со складкообразованием. P_4 соответствует усилию, действующему в опасном сечении заготовки в результате ударно-динамического воздействия, при малых пластических деформациях. На участке P_3P_4 происходит динамическое подтягивание заготовки на величину высоты складок.

Величина усилия выправки складок и «подтягивания» радиуса фланца в точке P_4 значительно превышает предел текучести материала в опасном сечении детали при статическом растяжении, однако она меньше такого же показателя при динамическом растяжении, поэтому материал «опасной зоны» легко переносит подобные нагрузки. Природа повышения предела текучести материала при динамическом нагружении описывается в работах [2] и [3].

Из анализа полученных осциллограмм можно установить, что усилие калибровки фланца в точке P_4 не относится к процессу непосредственного превращения плоской заготовки в полое изделие, поэтому максимальному усилию

процесса вытяжки будет соответствовать точка P_2 . Замеренное экспериментальным путем усилие вытяжки соответствует расчетному значению.

Величина усилия в точке P_2 показывает, что опасное сечение вытягиваемой детали испытывает меньшую нагрузку, чем при вытяжке в инструментальном штампе с прижимом и поэтому его несущая способность повышается, что в свою очередь влияет на повышение степени деформации. Действительно, эксперименты позволили установить, что штамповка-вытяжка ударными нагрузками с образованием допустимых складок обеспечивает изготовление деталей с коэффициентами вытяжки на 20—25% ниже рекомендуемых для штамповки-вытяжки в инструментальных штампах.

Предельные и рекомендуемые коэффициенты вытяжки для однопереходной штамповки на описанной установке приведены в таблице 1.

Таблица 1

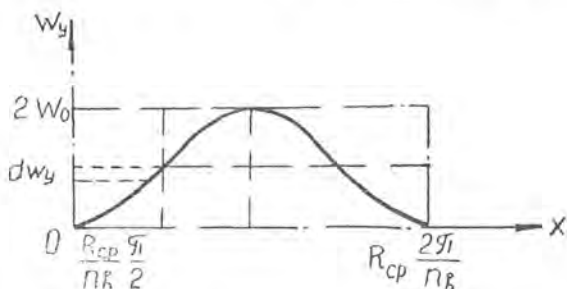
Марка материала	S	Коэффициент $m_1 = \frac{d}{D}$	
		предельный	рекомендуемый
Д16М	1,0	0,495	0,5
Д16М	1,5	0,475	0,48
Ст. 10	1,0	0,45	0,48
Ст. 10	1,5	0,46	0,47
Ст. 20	1,0	0,465	0,47
1X189HT	1—1,5	0,445	0,48

Положительное влияние прерывистое нагружение оказывает и на снижение трения при прохождении заготовки через вытяжное ребро накладки матрицы. Если при вытяжке в инструментальном штампе контакт поверхности заготовки с инструментом продолжается до конца процесса, то при прерывистом нагружении этот контакт периодически теряется, что дает возможность восстанавливать смазочный слой путем проникновения смазки в щели, образованные в момент отсутствия контакта между заготовкой и инструментом. Вследствие этого уменьшается сила трения, а, следовательно, и усилие вытяжки. Улучшение гидродинамического режима

смазки повышает также и качество поверхности детали, уменьшает фестонообразование.

Для разработки технологических процессов вытяжки в спецустановке на падающем молоте большое значение имеет правильный выбор таких параметров как глубина вытяжки заготовки за один удар и необходимая величина противодавления в нижнем гидроагрегате установки. Первый параметр выбирается исходя из допустимой высоты возникающих при ударе складок или — проще — из допустимого относительного сокращения за каждый удар наружного радиуса фланца заготовки — $\rho_{i \text{ доп.}} = \frac{R_{i \text{ доп.}}}{R_{i-1}}$.

Последнее можно получить из геометрических соотношений, принимая за основу положение, что распространение складок на фланце можно допустить лишь до начала вытяжного радиуса матрицы. В противном случае часть складок, перешедших в район закругления вытяжного радиуса, не сможет быть в дальнейшем полностью выправлена и вытянутая деталь будет иметь дефект поверхности. При движении в полость матрицы фланец из плоской формы превращается в волнообразную поверхность. При этом каждой величине сокращения диаметра фланца соответствует вполне определенное число и высота образовавшихся складок. Схе-

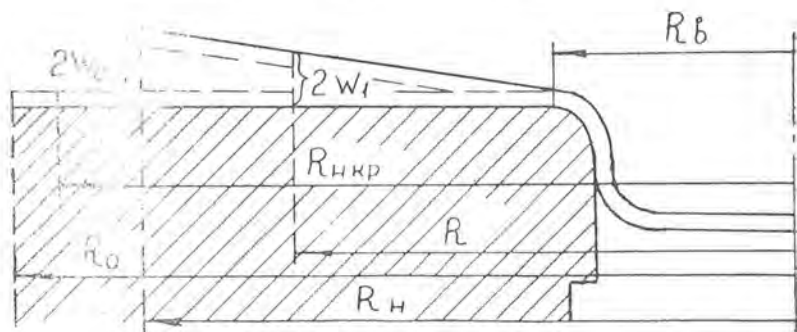


Фиг. 5. Схема определения геометрических параметров складки.

ма определения геометрических параметров складки показана на фиг. 5 и 6. Допустим, что уравнение срединной поверхности гофрированного фланца имеет вид функции

$$W = W_0 \frac{R - R_{\text{вн.}}}{R_{\text{н.}} - R_{\text{вн.}}} (1 - \cos n\Theta)^{(1)},$$

- где W_0 — половина высоты складки (при $R=R_{II}$) на краю фланца;
 R — текущий радиус рассматриваемого участка фланца;
 $R_{вн}$ — внутренний радиус фланца детали;
 R_{II} — наружный радиус фланца детали в данный момент времени;
 n — число складок;
 Θ — центральный угол. Характеризует координаты складки относительно выбранной оси.



Фиг. 6. Схема определения геометрических параметров складки.

В принципе можно было бы взять любую функцию, вид приведенной функции показывает, что высота складки на любом рассматриваемом участке фланца в любой момент времени зависит от относительного сокращения радиуса фланца $\frac{R-R_{вн}}{R_{II}-R_{вн}}$, формы образования складки $(1 - \cos n \Theta)$ и некоторые константы — W_0 .

Рассмотрим участок фланца с координатами $R = \frac{R_{II} + R_{вн}}{2} = R_{ср}$ и $\Theta = \frac{x}{R}$, тогда выражение $\frac{R-R_{вн}}{R_{II}-R_{вн}} = \frac{\frac{R_{II} + R_{вн}}{2} - R_{вн}}{R_{II} - R_{вн}} = \frac{1}{2}$, а уравнение (1) $W = \frac{1}{2} W_0 (1 - \cos n \Theta)$; обозначим $\frac{1}{2} W_0 = W_{ср}$ или $W_0 = 2 W_{ср}$, тогда $W = W_{ср} (1 - \cos n \Theta)$ (2).

Теперь найдем связь между длиной и высотой складки. Принимая для удобства за основу элемент дуги в пределах

от 0° до $\frac{R_{cp}}{n} \cdot \frac{\pi}{2}$ составим уравнение срединной длины складки [4]

$$L_{cp} = 4 \int_0^{\frac{R_{cp}}{n}} \sqrt{1 + (W')^2} dx. \quad (3)$$

Из уравнения (2) имеем:

$$W' = W_{cp} \frac{n}{R_{cp}} \sin \frac{n}{R_{cp}} x;$$

подставляя в уравнение (3)

$$L_{cp} = 4 \int_0^{\frac{R_{cp}}{n}} \sqrt{1 + W_{cp}^2 \left(\frac{n}{R_{cp}}\right)^2 \sin^2 \frac{n}{R_{cp}} x} dx.$$

Положим $\frac{n}{R_{cp}} x = z$. При $x = 0$; $z = 0$, $x = \frac{R_{cp}}{n} z$.

$$x = \frac{R_{cp}}{n} \cdot \frac{\pi}{2}; z = \frac{\pi}{2}; dx = \frac{R_{cp}}{n} dz.$$

Теперь

$$L_{cp} = 4 \frac{R_{cp}}{n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 + W_{cp}^2 \left(\frac{n}{R_{cp}}\right)^2 \sin^2 z} dz.$$

Выражение под интегралом с достаточной точностью можно принять [4]

$$\sqrt{1 + W_{cp}^2 \left(\frac{n}{R_{cp}}\right)^2 \sin^2 z} \approx 1 + \frac{1}{2} \left(W_{cp} \frac{n}{R_{cp}}\right)^2 \sin^2 z.$$

$$L_{cp} = 4 \frac{R_{cp}}{n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[1 + \frac{1}{2} \left(W_{cp} \frac{n}{R_{cp}}\right)^2 \sin^2 z\right] dz = \frac{2\pi R_{cp}}{n} +$$

$$+ W_{cp}^2 \frac{n}{R_{cp}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2 \sin^2 z dz, \text{ но } 2 \sin^2 z = 1 -$$

$$- \cos 2z, \text{ тогда } \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2 \sin^2 z dz = \frac{\pi}{2}; - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos 2z dz =$$

$$= \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \sin 2z \int_0^{\frac{\pi}{2}} = \frac{\pi}{2}.$$

Значит $L_{\text{ср}} \approx \frac{2\pi R_{\text{ср}}}{n} + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{n}{R_{\text{ср}}} \cdot W_{\text{ср}}^2.$

Из уравнения видно, что аналогичное ему уравнение справедливо для любого радиуса R , т. е.

$$L \approx \frac{2 \cdot R}{n} + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{n}{R} \cdot W_1^2, \quad (4)$$

где W_1 аппроксимируется по длине складки функций

$$W_1 = W_0 \frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{вн}} - R_{\text{ин}}} = 2 W_{\text{ср}} \frac{R - R_{\text{ин}}}{R_{\text{вн}} - R_{\text{ин}}}.$$

С другой стороны, при критической величине складки

$$L_{\text{ср}} = \frac{2 \cdot R_{\text{ср кр}}}{n} (1 + \varepsilon_{\text{упр}}), \quad (5)$$

где $\varepsilon_{\text{упр}} = \frac{\sigma_{3 \text{ кр}}}{E}$ — закон Гука;

$\sigma_{3 \text{ кр}}$ — сжимающие напряжения в середине фланца в момент образования складки.

$R_{\text{ср кр}} = \frac{R_{\text{вн}} + R_{\text{н кр}}}{2}$, приравнявая уравнения (4) и (5), имеем

$$\frac{2\pi R_{\text{ср кр}}}{n} \left(1 + \frac{\sigma_{3 \text{ кр}}}{E}\right) = \frac{2\pi R_{\text{ср}}}{n} + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{n}{R_{\text{ср}}} \cdot W_{\text{ср}}^2$$

или

$$W_{\text{ср}}^2 \frac{n^2}{4R_{\text{ср}}^2} = \frac{R_{\text{ср кр}}}{R_{\text{ср}}} \left(1 + \frac{\sigma_{3 \text{ кр}}}{E}\right) - 1,$$

откуда

$$W_{\text{ср}}^2 = \frac{4}{n^2} R_{\text{ср}} [R_{\text{ср кр}} \left(1 + \frac{\sigma_{3 \text{ кр}}}{E}\right) - R_{\text{ср}}]$$

или

$$W_{\text{ср}} = \frac{2}{n} \sqrt{R_{\text{ср}} \left[(R_{\text{ср кр}} - R_{\text{ср}}) + R_{\text{ср кр}} \cdot \frac{\sigma_{3 \text{ кр}}}{E} \right]}$$

Но так как

$$R_{\text{ср кр}} - R_{\text{ср}} = \frac{R_{\text{вн}} - R_{\text{н кр}}}{2} - \frac{R_{\text{вн}} + R_{\text{н}}}{2} = \frac{R_{\text{н кр}} - R_{\text{н}}}{2},$$

$$\text{то } W_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sqrt{(R_{\text{вн}} + R_{\text{н}}) \left[(R_{\text{н кр}} - R_{\text{н}}) + (R_{\text{вн}} + R_{\text{н кр}}) \frac{\sigma_{3 \text{ кр}}}{E} \right]}.$$

Или, выразив $W_{\text{ср}}$ через постоянную для i -того удара величину складки на краю фланца — W_{0i} , имеем

$$W_{0i} = \frac{2}{n} \sqrt{(R_{\text{вн}} + R_{\text{н}i}) \left[(R_{\text{н кр } i-1} - R_{\text{н}i}) + (R_{\text{вн}} + R_{\text{н кр } i-1}) \frac{\sigma_{3 \text{ кр}}}{E} \right]} \quad (6)$$

Введем экспериментальный коэффициент — K_{θ} , определяющий допустимую высоту складки и равный отношению вы-

соты к ширине складки на краю фланца $K_{\theta} = \frac{W_{0i}}{2 \cdot R_{\text{н}i}}$, тогда формулу (6) можно представить в виде:

$$(\pi K_{\theta} R_{\text{н}i})^2 = (R_{\text{вн}} + R_{\text{н}i}) \left[(R_{\text{н кр } i-1} - R_{\text{н}i}) + (R_{\text{вн}} + R_{\text{н кр } i-1}) \frac{\sigma_{3 \text{ кр}}}{E} \right].$$

После приведения получим следующее квадратное уравнение:

$$[(\pi K_{\theta})^2 + 1] R_{\text{н}i}^2 - R_{\text{н}i} \left\{ R_{\text{н кр } i-1} - R_{\text{н}i} + (R_{\text{вн}} + R_{\text{н кр } i-1}) \frac{\sigma_{3 \text{ кр } i-1}}{E} \right\} - R_{\text{вн}} \left[R_{\text{н кр } i-1} + (R_{\text{вн}} + R_{\text{н кр } i-1}) \frac{\sigma_{3 \text{ кр } i-1}}{E} \right] = 0. \quad (7)$$

Экспериментально определено, что потеря упругой устойчивости фланца производится уже в первый момент времени, следовательно

$\rho_{\text{кр } i} = \frac{R_{\text{н кр } i-1}}{R_{\text{н}i-1}} \approx 1$ и $\varepsilon = \frac{\sigma_{3 \text{ кр } i-1}}{E} \approx 0$, тогда, предва-

рительно, заменив абсолютные величины R относительными ρ , уравнение (7) примет вид:

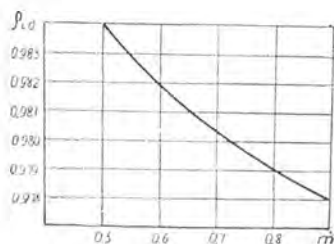
$$[(\pi K_{\theta})^2 + 1] \rho_{i \text{ доп}}^2 - (1 - m_{i-1}) \rho_{i \text{ доп}} - m_{i-1} = 0.$$

Решая уравнение и беря положительный корень, окончательно имеем:

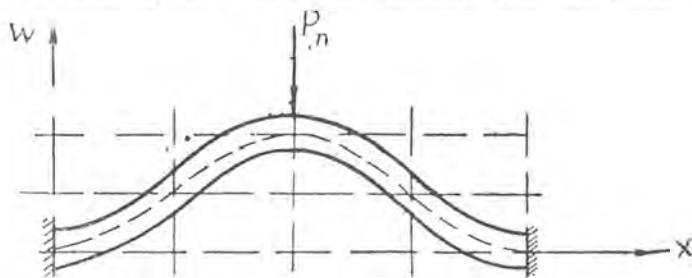
$$\rho_{i \text{ доп}} = \frac{1 - m_{i-1}}{2 [(\pi K_{\theta})^2 + 1]} + \sqrt{\frac{(1 - m_{i-1})^2}{4 [(\pi K_{\theta})^2 + 1]^2} + \frac{m_{i-1}}{(\pi K_{\theta})^2 + 1}}.$$

По экспериментальным данным, принимая $K_{\theta} = 0,05$, можно построить график значений $\rho_{i \text{ доп}} \neq f(m)$ (фиг. 7). Следующим этапом будет экспериментальное определение для различных $\rho_{i \text{ доп}}$ и m глубины вытяжки за каждый удар и построения семейства кривых $\Delta H \neq f(\rho_{i \text{ доп}}; m)$.

Как можно заметить, параметры ΔH , $\rho_{i \text{ доп}}$ и m являются геометрическими — они не зависят от марки и сечения материала. Для учета последних введем соответствующий параметр, который можно характеризовать величиной противодействия нижнего гидроагрегата, необходимого для выправки складок фланца. Следует при этом отметить, что величина противодействия или усилие, прилагаемое на клапане регулировочной коробки зависит, с одной стороны, от усилия правки складок фланца, а с другой стороны, — от целого ряда факторов, присущих конкретной установке: массы подвижных частей, скорости нанесения удара, сопротивления течения рабочей жидкости в трубопроводах, формы клапанов, рода применения рабочей жидкости и др. Учитывать все факторы, влияющие на выбор величины усилия на клапане, теоретическим путем, естественно, невозможно, поэтому определяем теоретическую величину усилия, необходимого для выправки складок деформированного фланца. Для этого выбираем схему нагружения складки в виде криволинейной пластины, заделанной на концах (см. фиг. 8).



Фиг. 7. График зависимости $\rho_{i \text{ доп}} \neq f(m)$ при $K = 0,05$.



Фиг. 8. Схема нагружения при выправке складки фланца.

Используя энергетический принцип, составляем уравнение равенства работ внешних и внутренних сил при посадке складки

$$P_n \cdot dW_y = \int_{R_{\text{вн}}}^{R_{\text{н}}} \sigma \cdot S_0 \cdot dR \cdot dz. \quad (8)$$

Рассмотрим значения составляющих компонент, входящих в правую часть уравнения (8): укорочение длины складки dz можно определить дифференцированием уравнения (7), считая, что в уравнении для определенного сечения складки переменным является W . Приняв, что изменение высоты складки в процессе ее «посадки» выражается линейной функцией вида $W = W_y \times \frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}}$, имеем $L = \frac{2R}{n} + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{n}{R} \left(\frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}} \right)^2 W_y^2$ и $dL = \frac{\pi \cdot n}{R} \left(\frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}} \right) \cdot W_y \cdot dW_y$.

Напряжения, возникающие при посадке складки будет [5]

$$\sigma = \frac{S_0}{1 - \delta_p} (1 + \delta) = \Pi (1 + \delta),$$

где S_0 — истинный предел прочности при растяжении материала;

δ_p — равномерное удлинение при растяжении;

δ — относительная деформация при посадке $\delta = \frac{\Delta L}{L_0}$;

ΔL — разница в длине до и после посадки складки;

L_0 — начальная длина складки.

$$\Delta L = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{n}{2} \left(\frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}} \right)^2 \cdot (W_0^2 - W_y^2);$$

$$\sigma = \frac{\frac{n}{2R} \left(\frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}} \right)^2 \cdot (W_0^2 - W_y^2)}{\frac{2R}{n} + \frac{n}{2R} \left(\frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}} \right)^2 \cdot W_y^2},$$

таким образом,

$$\sigma = \frac{\Pi \left[\frac{2R}{n} + \frac{n}{2R} \left(\frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}} \right)^2 W_0^2 \right]}{\frac{2R}{n} + \frac{n}{2R} \left(\frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}} \right)^2 W_y^2}.$$

Подставляя значения составляющих в уравнение (8), имеем

$$P_n = \pi \cdot S_0 \cdot \Pi \cdot n \cdot W_y \int_{R_{\text{вн}}}^{R_{\text{н}}} \frac{1}{R} \left(\frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}} \right)^2 \times$$

$$\times \frac{\frac{2R}{n} + \frac{n}{2R} \left(\frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}} \right)^2 W^2}{\frac{2R}{n} + \frac{n}{2R} \left(\frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}} \right)^2 W_y^2} \cdot dR. \quad (9)$$

Для определения максимального усилия выправки складки возьмем производную

$$\begin{aligned} \frac{dR_{\text{н}}}{dW_y} &= \pi \cdot n \cdot S_0 \cdot \Pi \int_{R_{\text{вн}}}^{R_{\text{н}}} \frac{1}{R} \left(\frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}} \right)^2 \times \\ &\times \frac{\frac{2R}{n} + \frac{n}{2R} \left(\frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}} \right)^2 W_0^2}{\frac{2R}{n} + \frac{n}{2R} \left(\frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}} \right)^2 W_y^2} \cdot \frac{\frac{2R}{n} - \frac{n}{2R} \left(\frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}} \right)^2 \cdot W_y^2}{\frac{2R}{n} + \frac{n}{2R} \left(\frac{R - R_{\text{вн}}}{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}} \right)^2 W_y^2} \cdot dR. \end{aligned}$$

Исследуем полученную производную. При рассмотрении составляющих подинтегрального выражения можно заметить, что знак функции изменяется при условии,

$$\text{при} \quad \frac{2R}{n} - \frac{n}{2R} \left(\frac{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}}{R - R_{\text{вн}}} \right)^2 W_y^2 < 0,$$

$$\frac{2R}{n} < \frac{n}{2R} \left(\frac{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}}{R - R_{\text{вн}}} \right)^2 W_y^2;$$

высота складки

$$W_y^2 > \frac{4R^2}{n^2} \left(\frac{R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}}{R - R_{\text{вн}}} \right)^2 = \frac{4(R_{\text{н}} - R_{\text{вн}})^2}{n^2} \cdot \frac{R^2}{(R - R_{\text{вн}})^2}.$$

Для определения характера изменения функции возьмем производную от выражения

$$\begin{aligned} \left[\frac{R^2}{(R - R_{\text{вн}})^2} \right]' &= \frac{(R_{\text{н}} - R_{\text{вн}})^2 \cdot 2R - 2R^2 (R - R_{\text{вн}})}{(R - R_{\text{вн}})^4} = \\ &= \frac{2R_{\text{вн}} \cdot R (R_{\text{вн}} - R)}{(R - R_{\text{вн}})^4} = 2R_{\text{вн}} \cdot R \frac{-1}{(R - R_{\text{вн}})^3}. \end{aligned}$$

Таким образом, установлено, что при $R > R_{\text{вн}}$, $\left[\frac{R^2}{(R - R_{\text{вн}})^2} \right]' \leq 0$

и функция убывает. Следовательно, выражение $\frac{4(R_{\text{н}} - R_{\text{вн}})^2}{n^2} \times$
 $\frac{R^2}{(R - R_{\text{вн}})^2}$ достигает минимального значения при $R = R_{\text{н}}$,

$$\text{поэтому } \frac{4(R_{II} - R_{ВII})^2}{n^2} \cdot \frac{R^2}{(R - R_{ВII})^2} > \frac{4R_{II}^2}{n^2}.$$

Практически же установлено, что $W_1 \leq \frac{2R_{II}}{n}$ ($W \leq 3$ мм).

Следовательно, для наших условий подинтегральное выражение Δ может принимать только положительное значение и $\frac{dP_n}{dW} > 0$. Это говорит о том, что функция P_n (уравнение 9) возрастает и достигает своего максимального значения при наибольшей величине складки, т. е. при $W = W_0 = 2W_{cp}$. Подставим условие $W_1 = W_0 = 2W_{cp}$ в уравнение (9) и, решая последнее, получим

$$\begin{aligned} \max P_n &= \pi \cdot n \cdot \Pi \cdot s_0 \cdot W_0 \int_{R_{ВII}}^{R_{II}} \frac{1}{R} \left(\frac{R - R_{ВII}}{R_{II} - R_{ВII}} \right)^2 dR = \\ &= \frac{2\pi \cdot n \cdot \Pi \cdot W_{cp}}{(R_{II} - R_{ВII})^2} \int_{R_{ВII}}^{R_{II}} \left(R - 2R_{ВII} + R_{ВII}^2 \cdot \frac{1}{R} \right) dR = \\ &= \frac{2\pi \cdot n \cdot \Pi \cdot s_0 \cdot W_{cp}}{(R_{II} - R_{ВII})^2} \left[\frac{1}{2} (R_{II}^2 - R_{ВII}^2) - 2R_{ВII} (R_{II} - R_{ВII}) + R_{ВII}^2 \ln \frac{R_{II}}{R_{ВII}} \right]. \end{aligned}$$

После преобразования выражения

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} (R_{II}^2 - R_{ВII}^2) - 2R_{ВII} (R_{II} - R_{ВII}) &= \frac{1}{2} R_{II}^2 - \frac{1}{2} R_{ВII}^2 - R_{ВII} \cdot R_{II} + \\ + R_{ВII}^2 - R_{ВII} (R_{II} - R_{ВII}) &= \frac{1}{2} (R_{II} - R_{ВII})^2 - R_{ВII} (R_{II} - R_{ВII}). \end{aligned}$$

$$\max P_n = 2\pi \cdot n \cdot \Pi \cdot s_0 \cdot W_{cp} \left[\frac{1}{2} + \frac{R_{ВII}^2}{(R_{II} - R_{ВII})^2} \ln \frac{R_{II}}{R_{ВII}} - \frac{R_{ВII}}{R_{II} - R_{ВII}} \right].$$

Усилие правки складок всего фланца будет в n раз больше, т. е.

$$\max P_{n\phi} = 2\pi - n^2 \cdot \Pi \cdot s_0 W_{cp} \left[\frac{1}{2} + \frac{R_{ВII}^2}{(R_{II} - R_{ВII})^2} \ln \frac{R_{II}}{R_{ВII}} - \frac{R_{ВII}}{R_{II} - R_{ВII}} \right]. \quad (10)$$

Анализируя выражение, заключенное в скобки, можно установить, что при $R_{II} \rightarrow R_{ВII} + r_m$ его величина достигнет максимального значения $\approx 0,45$. Поэтому для практических расчетов формулу можно преобразовать в виде $P_{n\phi} = 2,8 \cdot n^2 \cdot \Pi \cdot s_0 \times$
 $\times W_{cp}$.

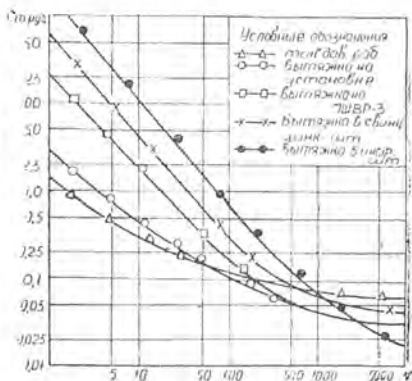
$W_{ср} = \frac{1}{2} W_0$ легко определяется экспериментальным путем при изготовлении первой детали. Для прикидочных расчетов можно принять $W_{ср} \approx 1$ мм. n — число образовавшихся на фланце складок — можно определить по формуле А. Я. Фельдмана [6] $n = 0.96 \frac{3R_{нн} - R_{вн}}{R_{нн} - R_{вн}}$ или экспериментальным путем.

Вторым этапом расчета является определение и построение по результатам графических зависимостей давления жидкости в нижнем гидроагрегате установки — q от усилия, прикладываемого на регулировочный клапан — Q и скорости падающих частей — v , а также глубины вытяжки за один удар — ΔH в зависимости от Q и v .

Рассчитав для конкретной производственной детали величины ΔH и $q = \frac{P_{нф}}{F_n}$, где F_n — площадь поршня нижнего гидроагрегата, по графикам $\Delta H = \Delta H(Q, v)$ и $q = q(Q, v)$ можно определить необходимые для разработки технологических процессов величины Q и v .

Диаграммы зависимостей $\Delta H = \Delta H(Q, v)$ и $q = q(Q, v)$ в статье не приводятся, так как они будут для каждой конкретной установки различны. Несмотря на кажущуюся громоздкость расчета практика эксплуатации установки показала, что предварительная разработка технологического процесса и уточнение его при изготовлении детали, при усвоении обслуживающим персоналом некоторых практических навыков производится просто и быстро.

Рассмотрев новый процесс вытяжки в технологическом отношении, следует остановиться на его экономической эффективности. На фиг. 9 приведен график зависимости технологической себестоимости от годовой программы выпуска деталей при различных вариантах их изготовления.



Фиг. 9. График изменения технологической себестоимости деталей, изготовленных различными методами штамповки вытяжки в зависимости от производственного задания.

Для сравнения были взяты детали, изготавливаемые глубокой вытяжкой при максимально допустимой материалом степени деформации. Подобные детали при вытяжке их в инструментальных штампах требуют, как правило, нескольких операций, а, следовательно, и нескольких различных штампов. Как видно из графика, штамповка по разработанному методу экономически наиболее выгодна при программе от 60 ÷ 100 деталей до 1200 деталей. Следует подчеркнуть, что для мелкосерийного производства существенной является простота и быстрота изготовления оснастки и возможность работы на простом и дешевом оборудовании (листо-штамповочных молотах), что особенно важно в период запуска нового изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Сапаровский, Е. П. Смеляков. Новый метод глубокой вытяжки деталей на листо-штамповочных молотах. Кузнечно-штамповочное производство, № 4, 1963.
 2. Г. И. Погодин-Алексеев. Свойства металлов при ударном нагружении, Металлургиздат, 1953.
 3. Н. А. Давиденков. Динамические испытания металлов, ОНТИ, 1936.
 4. И. Н. Бронштейн. Справочник по математике.
 5. Г. П. Зайцев. К вопросу о становлении констант пластичности и прочности металлов. Физические материалы и металловедение, т. V, АН СССР, 1957.
 6. Н. Я. Фельдман. «Исследование устойчивости крупных кольцевых пластин». Диссертация на соискание ученой степени к. т. н.
-