

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ВЫТЯЖКИ СО СКЛАДКООБРАЗОВАНИЕМ

Известно [1], что вытяжка заготовки протекает нормально при условии, если напряжения, возникающие от деформирующего усилия в «опасном» сечении детали, не превышают временного сопротивления материала при растяжении — σ_a . Поэтому одним из показателей оценки степени совершенства технологического процесса вытяжки можно считать величину удельного давления течения материала p_1 — усилие вытяжки, отнесенное к площади поперечного сечения детали.

Эта величина определяется по формуле:

$$p_1 = [(\sigma_r + \sigma_T) e^{\mu\alpha} + \sigma_{из}] \sin \alpha, \quad (1)$$

где σ_r — компонент напряжения в опасном сечении детали, вызываемый сопротивлением деформированию материала во фланце заготовки;

σ_T — компонент напряжения от сил трения между заготовкой, прижимом и матрицей;

$\sigma_{из}$ — компонент напряжения в опасном сечении от изгиба металла на входной кромке матрицы;

$e^{\mu\alpha}$ — множитель, характеризующий сопротивление трению на входной кромке матрицы;

α — угол охвата материалом входной кромки матрицы;

μ — коэффициент трения.

Чем меньше величина p_1 , тем больше можно достичь при вытяжке степень деформации.

Из уравнения видно, что одним из путей снижения p_1 является уменьшение до минимума σ_r и угла α . Снижение σ_T

при штамповке с прижимом достигается за счет правильного подбора гидродинамического режима смазки и усилия прижима, но и при выполнении этих условий величина σ_r лежит в пределах 25—30% от p_1 . Более выгодно в этом отношении применение вытяжки без прижима, в процессе которой фланец под действием изгибающего момента уменьшает контакт с рабочей поверхностью матрицы. Кроме того, данный процесс заманчив и в смысле уменьшения еще одного компонента, входящего в уравнение — $e^{1/2}$. Действительно, для случая штамповки деталей с применением прижима действие изгибающего момента на фланец нейтрализуется, то есть наружная кромка фланца в течение всего процесса передвигается поступательно в плоскости матрицы, поэтому угол охвата при анализе этого процесса принимают равным $\frac{\pi}{2}$.

Этого нельзя наблюдать при отсутствии прижима. В этом случае, как было указано выше, фланец, изгибаясь, даже в конечный момент процесса значительно уменьшает угол охвата α .

Несмотря на явное, казалось бы, преимущество процесса вытяжки без применения прижима, он не получил широкого распространения из-за складкообразования, возникающего уже на первой стадии штамповки и интенсивно-развивающегося в результате потери фланцем пластической устойчивости.

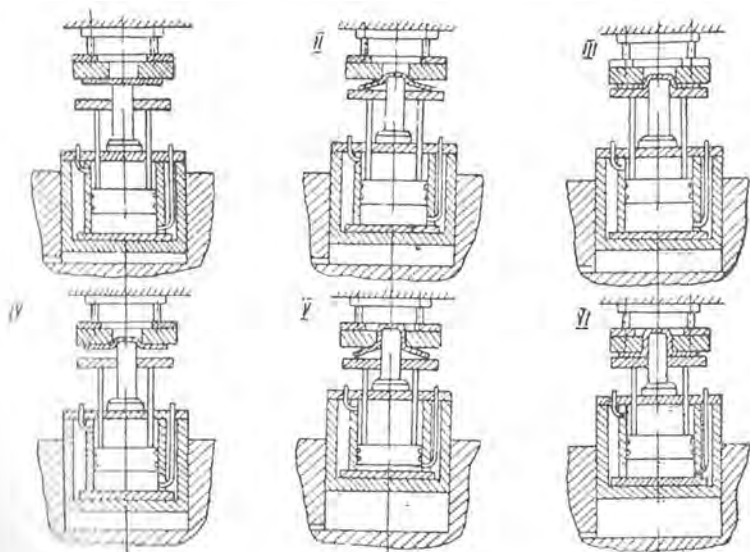
По мере сворачивания фланца в коническую волнообразную поверхность, резко увеличиваясь по высоте и уменьшаясь по ширине, складки ужесточают форму фланца и величина удельного давления течения резко возрастает. Напряжения в «опасном» сечении детали также начинают расти и быстро достигают величин разрушающих — происходит обрыв дна.

Это обстоятельство не позволяет достичь высоких степеней деформации. Так, коэффициент вытяжки при данном способе штамповки, например, для деталей круглой формы без фланца, из материала Д16АМ л $1,2 m = \frac{d}{D} = 0,55$; в то время как при вытяжке с прижимом он снижается до $m = 0,5 - 0,52$ [2].

Высказанные выше соображения о возможности получения при вытяжке без прижима более высоких степеней деформации заставили исследователей искать пути к разработке способов вытяжки со складкообразованием. Так были

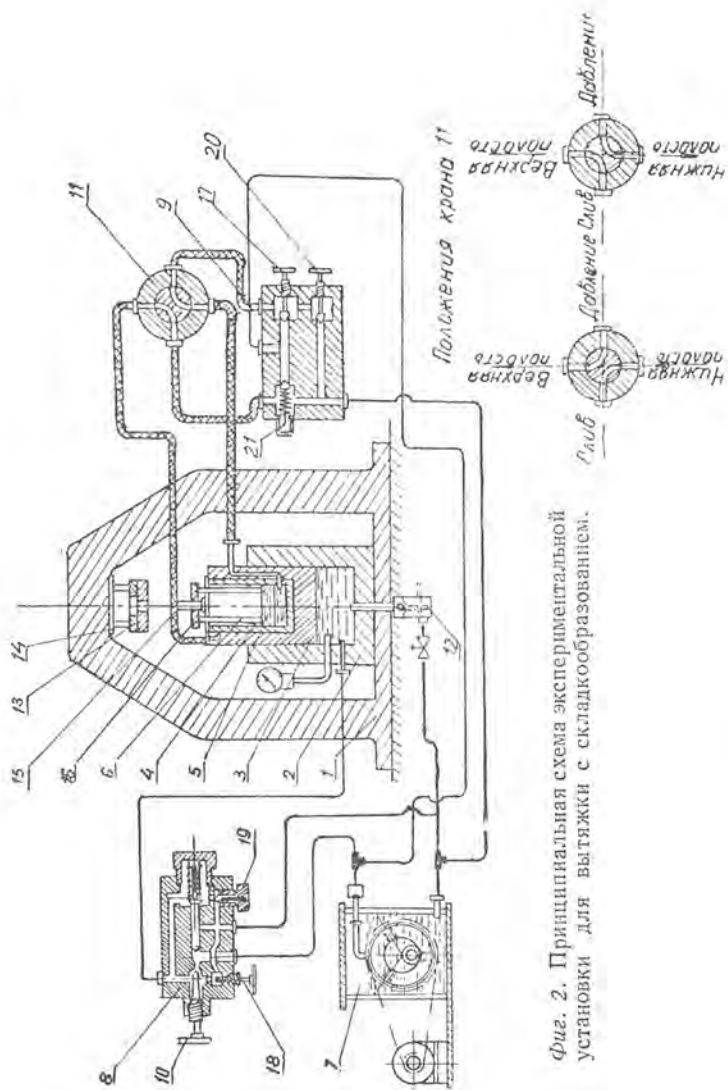
предложены различные конструкции матриц с входными раструбами, вытяжка деталей с пульсирующим прижимом, вытяжка на падающем молоте в специальной установке и др. Авторами статьи был разработан и исследован способ вытяжки с потерей устойчивости фланца, позволяющий значительно расширить область применения вытяжки без прижима.

Сущность способа заключается в следующем (фиг. 1):



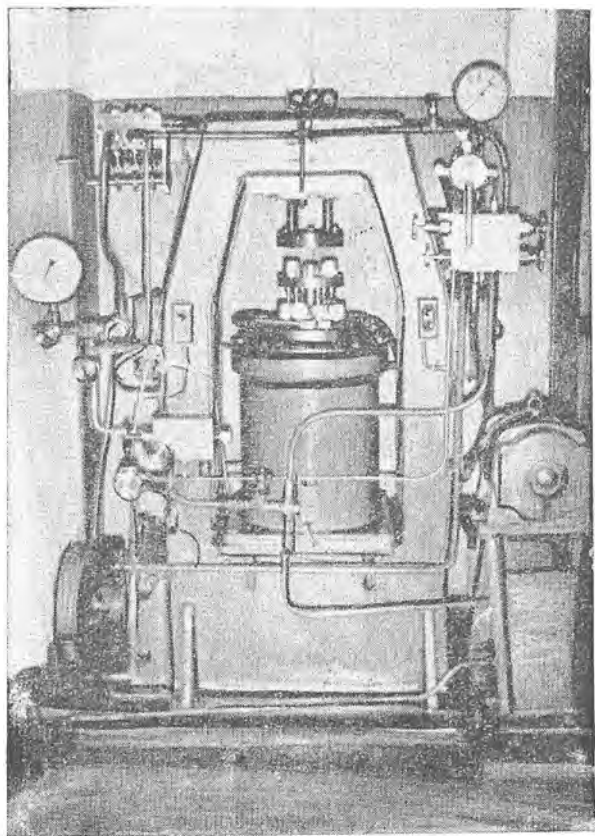
Фиг. 1. Схема пульсирующей вытяжки со складкообразованием.

Вытяжка заготовки производится ступенями, за счет импульсного приложения нагрузки попеременно ко дну и фланцу вытягиваемой детали. Каждая ступень состоит из 2-х стадий. В начальной стадии производится вытяжка заготовки на некоторую глубину без применения прижима (положение II). Фланец заготовки под действием радиально-растягивающих и тангенциально-сжимающих усилий начинает превращать свою форму из плоской в волнообразную коническую поверхность. Возникающие при этом волны-складки быстро увеличиваются по высоте и распространяются по ширине фланца. При последующей стадии восстанавливается форма фланца с помощью специальной калибровочной плиты. Складки ма-



Фиг. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки для вытязки с складкообразованием.

териала при этом «посаживаются» и фланец калибруется (положение III). Для того, чтобы при правке складок — защемлении фланца, материал в «опасной» зоне детали не получал дополнительного растяжения, вытяжка в данный момент времени не производится, т. е. процесс происходит импульсами. Механизм вытяжки последующих импульсов совершенно подобен описанному (положение V — 1 стадия, VI — 2 стадия). Разработанный метод вытяжки проверялся на специально для этого созданной на базе гидравлического



Фиг. 3. Общий вид экспериментальной установки для вытяжки со складкообразованием.

процесса типа БКК-200 экспериментальной установке, конструкция и принцип действия которой описаны ниже. Принципиальная схема установки приводится на фиг. 2, общий вид установки в рабочем положении показан на фиг. 3.

Установка состоит из корпуса пресса — 1, силового цилиндра — 2 с пустотелым поршнем — 3, внутри которого размещен маркетный цилиндр — 4. Маркетный цилиндр предназначен для создания усилия калибровки фланца детали. Внутри цилиндра — 4 находится поршень — 5 с закрепленными опорными колонками — 6. Для создания давления рабочей жидкости установлен насос — 7. Регулирование количества жидкости, поступающей в цилиндры 2 и 4 производится с помощью клапанных коробок 3 и 9. Инструмент для вытяжки деталей состоит из сменного матричного кольца 13, закрепляемого на универсальном корпусе — 14, сменного пуансона 15 и калибровочной плиты — 16.

Принцип действия установки. Исходное положение элементов установки — поршень 3 находится в крайнем нижнем положении. Поверхность калибровочной плиты находится на уровне с дном пуансона. Заготовка детали из листового материала укладывается на калибровочную плиту, на которой для облегчения установки заготовки нанесена система концентрических окружностей. Открыв регулировочный клапан 10, включают насос 7. Шариковый клапан 12 и вентиль 17 регулировочной коробки 9 в это время должны быть закрыты. Подаваемое насосом масло в камеру цилиндра 2 подводит поршень 3 совместно с заготовкой и пуансоном до уровня матрицы. Заготовка в этом положении должна быть слегка поджата к матричному кольцу. Выключив мотор насоса, закрываем клапан и, повернув рукоятку крана 11 в положение 1, открываем вентиль 17. Подготавливаем гидросистему для подачи масла в верхнюю полость цилиндра 4. В следующий момент, наполнив полость маслом, отводим калибровочную плиту от матрицы на 10—15 мм. Одновременно масло из нижней полости цилиндра 4 отводится в систему слива. Затем, закрыв вентиль 17, импульсом подаем масло в цилиндр 2 — производим вытяжку детали на некоторую глубину. Кран 10 регулирует количество поступающего в цилиндр масла, а, следовательно, и глубину вытяжки за один импульс. По достижении заранее заданной величины импульса вытяжка прекращается — кран 10 перекрывается. За время импульса заготовка под действием пуансона начинает втягиваться в матричное кольцо. Фланец штампуемой детали

под действием изгибающего момента на вытяжном радиусе начинает изменять свою форму из плоской в волнообразную коническую поверхность. Процесс вытяжки детали за один импульс можно характеризовать как вытяжку без применения прижима со складкообразованием. Импульсное же приложение нагрузки, как показали исследования д. т. н., И. А. Норицына [3] и к. т. н. Ю. А. Рождественского [4], благоприятно действуют на напряженно-деформируемое состояние материала детали. По окончании вытяжки, открыв вентиль 17 и установив кран в положение 2, наполняем маслом нижнюю полость цилиндра 4. Под его действием калибровочная плита, двигаясь вверх, калибрует фланец детали.

В дальнейшем калибровочная плита вновь отводится от заготовки и механизм вытяжки повторяется. Необходимо отметить, что созданная установка для пульсирующей штамповки со складкообразованием может относиться только к экспериментальным, так как производительность ее низка, однако проверка на ней разработанного способа и изучения влияния различных факторов на процесс вытяжки подтвердили, что создание высокопроизводительного пресса, работающего на данном принципе, вполне осуществимо. Для определения сравнительных показателей техпроцессов изготовления деталей, основанных на разработанном способе и ранее отмечаемых способах была произведена штамповка опытной партии деталей на материале Д16АМ л. 1,2.

Результаты экспериментов показали, что коэффициент вытяжки при новом процессе $m=0,43-0,44$, то есть степень деформации на 20% выше, чем при штамповке деталей без применения прижима и на 14% выше, чем при штамповке в инструментальных штампах с применением прижима.

Таким образом, сочетание в новом способе элементов процесса вытяжки деталей без применения прижима, прерывистого или импульсного приложения усилия, а также калибровки после потери устойчивости фланца штампуемой заготовки значительно улучшает механическую схему деформирования материала детали, в результате чего достигается повышение степени деформации.

Как показали исследования нового способа вытяжки, к наиболее важным параметрам, знание которых необходимо для проектирования оборудования и разработки техпроцессов, относится глубина вытяжки за один импульс — ΔH . Эта величина выбирается, исходя из двух условий.

С одной стороны, складки, образовавшиеся на фланце при вытяжке, не должны распространяться на район вытяжного радиуса, т. к. в противном случае поверхность вытянутой детали будет иметь глубокие следы от разглаженных складок. С другой стороны, материал фланца после калибровки должен иметь минимальное упрочнение. Последнее условие связано с явлением «размельчения» складок при калибровке, причем их количество резко увеличивается, увеличивается при этом количество очагов деформаций и площадь упрочнения. Следовательно, глубина вытяжки должна быть такой, чтобы образовавшиеся складки не размельчились при последующей калибровке фланца.

Теоретический анализ и наблюдения при экспериментах показали, что критерием выбора ΔH является второе условие. Сделаем анализ этого условия. Программу исследования наметим следующую:

- 1) Определение зависимости между глубиной вытяжки и сокращением наружного радиуса фланца R_n .
- 2) Выявление связи между сокращением R_n и высотой образовавшейся при этом складки W .
- 3) Анализ условий устойчивости формы складки при ее «посадке».
- 4) Определение из условий устойчивости формы складки допустимой величины глубины вытяжки за один импульс — ΔH .

Перейдем непосредственно к решению первого вопроса. На фиг. 4 изображено сечение вытягиваемой заготовки по

средней линии, т. е. $r_1 = r_m + \frac{s_0}{2}$; $r_2 = r_n + \frac{s_0}{2}$;

$$R_s = R_n + \frac{s_0}{2},$$

$$R_1 = R - r_2 = R_n - r_n,$$

$$R_2 = R_m + \frac{s_m}{2},$$

$$\alpha_m = \alpha_n = \alpha,$$

где r_m — вытяжной радиус матрицы;

r_n — радиус закругления паунсона;

R_n — радиус паунсона;

R_m — » матрицы.

n_0 — число складок на фланце;

θ — центральный угол в плане — координата рассматриваемой складки от выбранной оси.

Площадь поверхности фланца [5] — $S_1 = \int_s ds$, (2)

$$dS = \sqrt{EG - F^2} dR d\vartheta,$$

$$\text{где } E = \left(\frac{\partial x}{\partial R}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial R}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial R}\right)^2;$$

$$G = \left(\frac{\partial x}{\partial \vartheta}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \vartheta}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \vartheta}\right)^2;$$

$$F = \frac{\partial x}{\partial \vartheta} \cdot \frac{\partial x}{\partial R} + \frac{\partial y}{\partial \vartheta} \cdot \frac{\partial y}{\partial R} + \frac{\partial W}{\partial \vartheta} \cdot \frac{\partial W}{\partial R}.$$

Принимая $x = R \cdot \cos \vartheta$, $y = R \cdot \sin \vartheta$, имеем

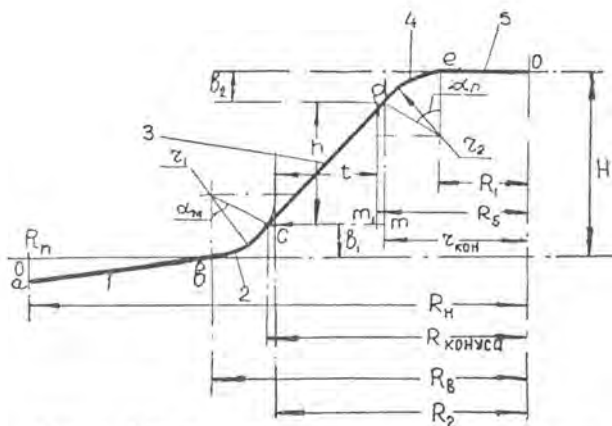
$$\frac{\partial x}{\partial R} = \cos \vartheta; \quad \frac{\partial y}{\partial R} = \sin \vartheta; \quad \frac{\partial x}{\partial \vartheta} = -R \sin \vartheta; \quad \frac{\partial y}{\partial \vartheta} = R \cdot \cos \vartheta;$$

$$\frac{\partial W}{\partial R} = W_1 (1 - \cos n_b \vartheta), \quad \text{где } W_1 = \frac{W_0}{R_{II} - R_b},$$

$$\frac{\partial W}{\partial \vartheta} = W_1 \cdot n_b (R - R_b) \sin n_b \vartheta.$$

Подставляя полученные частные производные в уравнение (2) и учитывая, что образовавшиеся складки равновелики и, кроме того, каждая складка симметрична относительно плоскости $\frac{\pi}{n_b} = \vartheta$, можно вычислить поверхность половинки складки, а увеличив ее в $2 n_b$ раз, определим площадь всей поверхности фланца.

$$\begin{aligned} S_1 &= 2n_b \int_0^{\frac{\pi}{n_b}} d\vartheta \times \\ &\times \int_{R_1}^{R_{II}} \sqrt{R^2 + W^2 n_b^2 (R - R_b)^2 \sin^2 n_b \vartheta + W_1^2 R^2 (1 - \cos n_b \vartheta)^2} dR = \\ &= 2n_b \int_{R_b}^{R_{II}} R dR \times \\ &\times \int_0^{\frac{\pi}{n_b}} \sqrt{1 + W_1^2 n_b^2 \left(1 - \frac{R_b}{R}\right)^2 \sin^2 n_b \vartheta + W_1^2 (1 - \cos n_b \vartheta)^2} d\vartheta. \end{aligned} \quad (3)$$



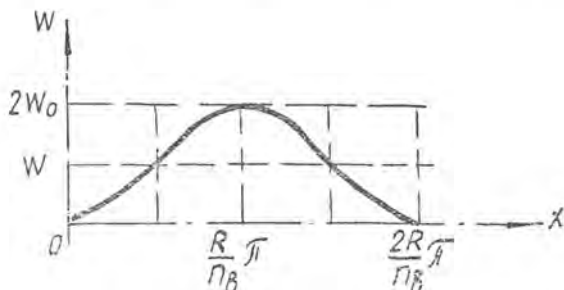
Фиг. 4. Схема для определения зависимости между R_{II} и H .

Связь между глубиной вытяжки и сопряжением наружного радиуса фланца находим из условия равенства в процессе вытяжки поверхности детали и заготовки. Разобьем всю поверхность детали на 5 участков.

1. Гофрированная поверхность фланца (сечение ab). Уравнения поверхности фланца в цилиндрических координатах принимаем в виде:

$$W = W_0 \frac{R - R_b}{R_n - R_b} (1 - \cos n_b \vartheta), \quad (1)$$

где W_0 — половина высоты гофра на наружном краю фланца (фиг. 5);



Фиг. 5. Схема сечения гофра по наружной кромке фланца.

Вводя обозначения $W_1^2 n_b^2 \left(1 - \frac{R_b}{R_H}\right)^2 = a$; $W_1^2 = b$ и производя замену переменных во внутреннем интеграле (обозначим его — I) вычислим его величину.

$$n_b \vartheta = x; d\vartheta = \frac{dx}{n_b}, \text{ при } \vartheta = 0 \quad x = 0,$$

$$\vartheta = \frac{\pi}{n_b} \quad x = \pi.$$

$$I_1 = \frac{1}{n_b} \int_0^\pi \sqrt{1 + a \sin^2 x + b (1 - \cos x)^2} dx.$$

Точный расчет интеграла приводит к появлению эллиптических функций, вычисление которых приводит к чрезмерно сложному выражению, поэтому возьмем интеграл I приближенно.

Принимая, что $a \sin^2 x + b (1 - \cos x)^2 \ll 1$, то

$$\sqrt{1 + a \sin^2 x + b (1 - \cos x)^2} \approx 1 + \frac{1}{2} a \sin^2 x + \frac{1}{2} b (1 - \cos x)^2$$

$$\text{и } I = \frac{\pi}{n_b} \left\{ 1 + \frac{1}{4} [W_1^2 n_b^2 \left(1 - \frac{R_b}{R}\right)^2 + 3W_1^2] \right\}.$$

Подставляя значение I в уравнение (3), учтя, что $W_1 = \frac{W_0}{R_H - R_b}$ и взяв интеграл от полученного выражения, имеем:

$$S_1 = \pi \left[(R_H^2 - R_b^2) + \frac{n_b^2 W_0^2}{2} \left(\frac{R_b}{R_H - R_b} \right)^2 \ln \frac{R_H}{R_b} + \frac{3W_0^2}{4} \times \right. \\ \left. \times \frac{R_H + R_b}{R_H - R_b} - \frac{n_b^2 W_0^2}{4} \cdot \frac{3R_b - R_H}{R_H - R_b} \right]. \quad (4)$$

2. Поверхность тора с углом α (сечение bc)

$$S_2 = 2\pi R_b \cdot r_1 \cdot \alpha. \quad (5)$$

3. Поверхность усеченного конуса высотой h (сеч. cd)

$$S_3 = \pi \sqrt{h^2 + (R_K - r_K)^2} (R_K + r_K),$$

где $R_K = R_b - r_1 \sin \alpha$

$$r_K = R_1 + r_2 \sin \alpha$$

$$h = H - (r_1 + r_2) (1 - \cos \alpha). \quad (6)$$

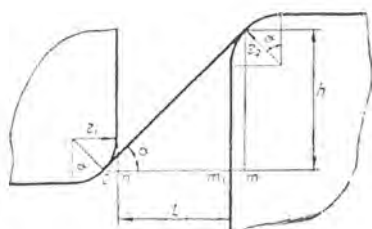
$$S_3 = \pi [(R_b + R_1) (r_1 - r_2) \sin \alpha] \cdot \sqrt{[H - (r_1 + r_2) (1 - \cos \alpha)]^2 +} \\ + [(R_b - R_1) - (r_1 + r_2) \sin \alpha]^2}. \quad (7)$$

4. Поверхность тора с углом α (сеч. dl)

$$S_4 = 2\pi R_1 \cdot r_1 \cdot \alpha.$$

5. Площадь круга (сеч. eo)

$$S_5 = \pi R_1^2.$$



Фиг. 6. Схема для определения зависимости между H и α .

Найдем зависимость между ними (фиг. 6).

$$\overline{cm} = t + \overline{cn} + \overline{m_1m} \qquad \frac{h}{cm} = \text{tg } \alpha \qquad (9)$$

$$\overline{cn} = r_1 - r_1 \sin \alpha = r_1 (1 - \sin \alpha)$$

$$\overline{m_1m} = r_2 (1 - \sin \alpha)$$

$$\overline{cm} = t + (1 - \sin \alpha) (r_1 + r_2).$$

Подставляя в (9) значение \overline{cm} и h , получим.

$$\frac{H - (1 - \cos \alpha) (r_1 + r_2)}{t + (1 - \sin \alpha) (r_1 + r_2)} = \text{tg } \alpha. \qquad (10)$$

Уравнения (7) и (10) в принципе дают искомую зависимость, но для упрощения расчетов положим $r_1 = r_2 = r$ и $t \approx 0$. Теперь $R_b \approx R_0 + r$, $R_1 \approx R_0 - r$, $R_b - R_1 = 2r$, $R_b + R_1 = 2R_0$ и $S_2 = 2\pi (R_0 + r) \cdot r \cdot \alpha$ $H = 2r [(1 - \sin \alpha) \text{tg } \alpha + (1 - \cos \alpha)]$ (12)

$$S_4 = 2\pi (R_0 - r) \cdot r \cdot \alpha$$

$$S_5 = \pi (R_0 - r)^2.$$

Вставим в формулу (6) значение H и учтя упрощения, получим:

$$S_{\text{з.г.}} = 4\pi R_0 \cdot r \cdot \frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha}. \qquad (13)$$

Условие постоянства поверхности вытягиваемой детали и заготовки — $S_{\text{з.г.}} = \pi R_0^2$ выражается в виде:

$$S_{\text{з.г.}} = \sum_{i=1}^5 S_i. \qquad (8)$$

Заметим, что в выведенных формулах имеется две однозначные величины, характеризующие глубину вытяжки — α и H .

Напишем уравнение (7) в развернутом виде:

$$R_0^2 = R_{II}^2 - (R_{\partial} + r)^2 + \frac{n_b^2 W_0^2}{2} \left[\frac{R_{\partial} - r}{R_{II} - (R_{\partial} + r)} \right]^2 \ln \frac{R_{II}}{R_{\partial} + r} +$$

$$+ \frac{3W_0^2 (R_{II} + R_{\partial} + r)}{4 [R_{II} - (R_{\partial} + r)]} - \frac{n_b^2 W_0^2 (3R_{\partial} - R_{II} + 3r)}{4 [R_{II} - (R_{\partial} + r)]} +$$

$$+ (R_{\partial} - r)^2 + 4R_{\partial} \cdot r \left(\alpha + \frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha} \right). \quad (14)$$

Уравнение (12) можно представить в виде:

$$\frac{H}{2r} = \frac{\sin \alpha + \cos \alpha - 1}{\cos \alpha}, \quad (15)$$

обозначая $\frac{H}{2r} = \bar{H}$.

Из уравнения (15) имеем $(\bar{H} - 1) \cos \alpha + 1 = \sin \alpha$.

Возведем в квадрат правую и левую части уравнения

$$(\bar{H} - 1)^2 \cos^2 \alpha + 2(\bar{H} - 1) \cos \alpha + 1 = 1 - \cos^2 \alpha,$$

откуда после приведения подобных членов имеем

$$\cos \alpha = \frac{2(1 - \bar{H})}{1 + (1 - \bar{H})^2}, \quad (16)$$

или

$$\alpha = \arccos \frac{2(1 - \bar{H})}{1 + (1 - \bar{H})^2}. \quad (16a)$$

Аналогично формулы (16) можно написать

$$\sin \alpha = \frac{1 - (1 - \bar{H})^2}{1 + (1 - \bar{H})^2} \text{ или } \frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha} = (1 - \bar{H}). \quad (17)$$

Подставляя в формулу (14) выражения (16-а) и (17) и приведя подобные члены, получим искомую зависимость для случая $H \leq 2r$.

$$R_0^2 = R_{II}^2 + \frac{n_b^2 W_0^2}{2} \left[\frac{R_{\partial} + r}{R_{II} - R_{\partial} - r} \right]^2 \ln \frac{R_{II}}{R_{\partial} + r} + \frac{3W_0^2}{4} \cdot \frac{R_{II} + R_{\partial} + r}{R_{II} - R_{\partial} - r} -$$

$$- \frac{n_b^2 W_0^2}{4} \cdot \frac{3R_{\partial} + 3r - R_{II}}{R_{II} - R_{\partial} - r} + 4R_{\partial} \cdot r \left[\arccos \frac{2(1 - \bar{H})}{1 + (1 - \bar{H})^2} - \bar{H} \right]. \quad (18)$$

Для случая $H > 2r$ угол α можно принять [1] $\alpha \approx \frac{\pi}{2}$.

Зависимость между глубиной вытяжки и сокращением наружного радиуса фланца в этом случае будет:

$$R_0^2 = R_{II}^2 + \frac{n_b^2 W_0^2}{2} \left(\frac{R_0 + r}{R_{II} - R_0 - r} \right)^2 \ln \frac{R_{II}}{R_0 + r} + \frac{3W_0^2}{4} \cdot \frac{R_{II} + R_0 + r}{R_{II} - R_0 - r} - \frac{n_b^2 W_0^2}{4} \cdot \frac{3R_0 + 3r - R_{II}}{R_{II} - R_0 - r} + 4R_0 \cdot r \left(\bar{H} + \frac{\pi}{2} - 2 \right). \quad (19)$$

Решение второго вопроса программы — выявление связи между сокращением наружного радиуса фланца и высотой образовавшихся при этом складок будем проводить, исходя из равенства длины края заготовки в момент потери фланцем устойчивости и после завершения образования гофрированной поверхности. Длина складки на краю фланца в момент потери устойчивости

$$L_1 = 2\pi R_{H \text{ кр}} \frac{1}{n_b},$$

где $R_{H \text{ кр}}$ — наружный радиус фланца в момент потери им устойчивости.

Потеря фланцем устойчивости происходит при небольших углах подъема, поэтому при расчетах фланец можно рассматривать как плоскую пластинку.

Вычислим длину развертки в зависимости от высоты складки. Для этого сделаем развертку края фланца (фиг. 5). Координаты $x = R_{II} \cdot \vartheta$ или $\vartheta = \frac{x}{R_{II}}$. Уравнения развернутой линии края фланца можно представить в виде функции

$$W = W_0 \left(1 - \cos n_b \frac{x}{R_{II}} \right). \quad (20)$$

Для определения длины разобьем складку на четыре участка, при этом пределы изменения функции будут 0° и $\frac{\pi R_{II}}{2n_b}$; при определении же всей длины развертки полученную величину увеличим в 4 раза.

Длина развернутой линии [5] — $L = \int_0^{x_0} \sqrt{1 + (W')^2} dx$.

В нашем случае длина развертки складки по краю фланца

$$L_2 = 4 \int_0^{\frac{\pi R_{II}}{2n_b}} \sqrt{1 + \left(W_0 \frac{n_b}{R_{II}} \right)^2 \sin^2 \frac{n_b}{R_{II}} x} dx,$$

примем $\frac{n_b}{R_{II}} x = t$, $dx = \frac{R_{II}}{n_b} dt$ при $x = 0$ $t = 0$ $x = \frac{\pi R_{II}}{2n_b}$; $t = \frac{\pi}{2}$.

Решая приближенно интеграл с новыми функциями и пределами, имеем:

$$L_2 = \frac{2\pi R_{II}}{n_b} + W_0^2 \frac{n_b}{2} \cdot \frac{\pi}{R_{II}}. \quad (20a)$$

Приравнивая значения $L_1 = L_2$, выведем зависимость между сокращением наружного радиуса фланца и величиной складки:

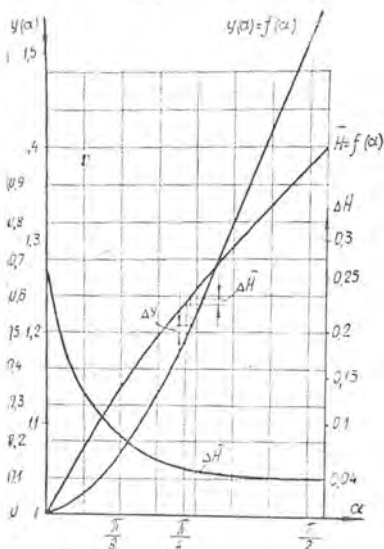
$$W_0 = \frac{2}{n_b} \sqrt{R_{II}(R_{II \text{ кр}} - R_{II})}. \quad (21)$$

Для практических расчетов, особенно для нагартованного фланца, можно принять, что фланец теряет свою устойчивость в первый момент нагружения, т. е. принимаем $R_{II \text{ кр } i} \approx R_{II i}$, где индекс i номер импульса, поэтому уравнение (20) можно переписать для любого импульса в виде:

$$W_{0i} = \frac{2}{n_{bi}} \sqrt{R_{IIi}(R_{IIi} - R_{IIi})} = \frac{2}{n_{bi}} \sqrt{R_{IIi} \cdot \Delta R_{II}}. \quad (22)$$

Следующим вопросом программы исследований является выявление условий устойчивости складки при ее «посадке». Для решения этого вопроса заменим складку цилиндрической оболочкой с кривизной, равной средней кривизне складки, с жестко заземленными концами. Схему нагружения складки примем в виде действия всестороннего равномерного давления. Определим кривизну складки: так как условие выбора кривизны показывает, что сечение складки взято на расстоянии $R_{\text{ср}}$ фланца, то уравнение (20) можно записать:

$$W = W_{\text{ср}} \left(1 - \cos \frac{n_b}{R_{\text{ср}}} x\right). \quad (23)$$



Фиг. 7. Графическое определение приращения глубины вытяжки за один импульс — ΔH .

Максимальная кривизна складки в этом сечении будет $\chi = W''$. Берем производную от уравнения (23)

$$W' = W_{\text{ср}} \frac{n_b}{R_{\text{ср}}} \sin \frac{n_b}{R_{\text{ср}}} x.$$

$$W'' = W_{\text{ср}} \frac{n_b^2}{R_{\text{ср}}^2} \cos \frac{n_b}{R_{\text{ср}}} h,$$

при $x = \frac{R_{\text{ср}}}{n_b} \cdot n$, т. е. в середине гофра кривизна $\chi = W_{\text{ср}} \left(\frac{n_b}{R_{\text{ср}}} \right)^2$.

Найдем зависимость между α и $W_{\text{ср}}$:

$$\alpha = \frac{1}{2} L \cdot \chi; \quad L \approx \frac{\pi R_{\text{ср}}}{n_b}; \quad \alpha \approx \frac{1}{2} \pi W_{\text{ср}} \frac{n_b}{R_{\text{ср}}}.$$

Критическая нагрузка для цилиндрической оболочки под действием всестороннего равномерного давления определяется по формуле [6]:

$$q_{\text{кр}} = \frac{E s^3}{12(1-\mu^2) r_0^3} (a^2 - 1), \quad (24)$$

где E — модуль Юнга;
 s — толщина материала оболочки;
 $r_0 = \frac{1}{\chi}$ — начальный радиус кривизны.

Коэффициент a определяется из уравнения:

$$a \cdot \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} (a \cdot \alpha). \quad (25)$$

Замечая, что $\frac{q_{\text{кр}} \cdot r_0}{s} = \sigma_{\text{кр}} = K \varepsilon_{\text{кр}}^n$, где $n = \frac{\delta_p}{1 + \delta_p} = \phi_p$, и принимая для пластической области ($\mu = 0,5$) взамен E касательный модуль $E_2 = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = K \cdot n \cdot \varepsilon_{\text{кр}}^{n-1}$ имеем

$$\varepsilon_{\text{кр}} = \frac{n \cdot s^2}{9 r_0^2} (a^2 - 1) \quad \text{или} \quad \varepsilon_{\text{кр}} = \frac{n s^2}{9} \chi^2 (a^2 - 1), \quad (26)$$

т. к. $a \gg 1$, то $\varepsilon_{\text{кр}} = \frac{n s^2}{9} \chi^2 \cdot a^2$.

Условие устойчивости складки — $\varepsilon_{\text{кр}} \geq \varepsilon_{\text{max}}$ или

$$\varepsilon_{\text{max}} \leq \frac{n s^2}{9} \chi^2 a^2. \quad (27)$$

Деформация сжатия при условии одинаковой степенной аппроксимации с растяжением — $\varepsilon = \frac{L_0 - L}{L}$,

где $L = \frac{2 \cdot R_{II}}{n_b}$ — длина кромки фланца после «посадки» складки;
 L_0 — длина развертки складки до ее посадки — выражение, аналогичное формуле (20-а).

Таким образом $\varepsilon_{\max} = \left(\frac{W_{cp} n_b}{2 R_{cp}} \right)^2$.

Подставляя в выражение (27) значения ε и ε_{\max} , после преобразований имеем: $\frac{3}{2} \cdot \frac{1}{s \sqrt{n}} \cdot \frac{R_{cp}}{n_b} \leq a$. затем умножаем обе части неравенства на a , получим условие устойчивости складки:

$$\frac{3}{4} \cdot \frac{\pi}{s \sqrt{n}} \cdot W_{cp} \leq a \cdot a. \quad (28)$$

Исследование уравнения (25) показывает, что при малых значениях a (практически 10—15°) $a \cdot a \approx \frac{3}{2} \pi$ (ошибки менее 1%).

Теперь уравнение (28) можно написать в виде:

$$\frac{3}{4} \cdot \frac{\pi}{s \sqrt{n}} \cdot W_{cp} \leq \frac{3}{2} \pi \quad \text{или} \quad \frac{W_{cp}}{s} \leq 2 \sqrt{n},$$

по $W_{cp} = \frac{1}{2} W_0$, следовательно

$$\left(\frac{W_0}{s} \right)_{\text{доп.}} \leq 4 \sqrt{n}. \quad (29)$$

Обозначая $\frac{W_0}{s} = \eta$, имеем вспомогательные выражения

$$W_0 = \eta \cdot s; \quad \eta \leq 4 \sqrt{n}. \quad (29a)$$

Вернемся к рассмотрению уравнения (14). Обозначая выражение

$$\alpha + \frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha} = Y(\alpha), \quad (30)$$

условие равенства поверхностей заготовки до и после выполнения i — того импульса можно представить в виде уравнений:

а) Перед i -тым импульсом, после правки складок $(i-1)$ -го импульса

$$R_0^2 = R_{II}^2 i_{-1} (R_0 + r)^2 + (R_0 - r)^2 + 4 R_0 \cdot r \cdot Y(\alpha_{i-1}),$$

где $R_{II} i_{-1}$ и α_{i-1} — наружный радиус фланца и угол охвата материалом заготовки вытяжной кромки матрицы перед i -тым импульсом.

б) После окончания действия i -го импульса

$$R_0^2 = R_{ni}^2 - (R_0 + r)^2 + (R_0 - r)^2 + 4R_0 \cdot r \cdot Y(\alpha_i) + \\ + \frac{(n_b W_0)^2}{2} \left[\frac{R_0 + r}{R_{ni} - R_0 - r} \right] \ln \frac{R_{ni}}{R_0 + r} + \frac{3W_0^2}{4} \cdot \frac{R_{ni} + R_0 + r}{R_{ni} - R_0 - r} - \\ - \left(\frac{n_b W_0}{2} \right)^2 \cdot \frac{3R_0 - R_{ni} + 3r}{R_{ni} - R_0 - r}.$$

Переходя к относительным величинам $\frac{R_{ni}}{R_0} = \rho$; $\frac{R_0 + r}{R_0} = \lambda$ и вычтя из второго уравнения первое, получим:

$$R_{ni-1}^2 - R_{ni}^2 = 4R_0 \cdot r [Y(\alpha_i) - Y(\alpha_{i-1})] + \frac{(n_b W_0)^2}{2} \left[\frac{\lambda}{\rho - \lambda} \right]^2 \ln \frac{\rho}{\lambda} + \\ + \frac{3W_0^2}{4} \cdot \frac{\rho + \lambda}{\rho - \lambda} - \left(\frac{n_b W_0}{2} \right)^2 \cdot \frac{3\lambda - \rho}{\rho - \lambda}. \quad (31)$$

Преобразуем некоторые члены, входящие в выражение (31):

$$R_{ni-1}^2 - R_{ni}^2 = (R_{ni-1} - R_{ni})(R_{ni-1} + R_{ni}) \approx 2R_{ni} \cdot \Delta R_{ni}$$

Из уравнения (22) $\Delta R_{ni} \cdot R_{ni} = \left(\frac{W_0 \cdot n_b}{2} \right)^2$, следовательно

$$R_{ni-1}^2 - R_{ni}^2 \approx 2 \left(\frac{W_0 \cdot n_b}{2} \right)^2; Y(\alpha_i) - Y(\alpha_{i-1}) = \Delta Y(\alpha).$$

Учтем изменение толщины кромки фланца после посадки складки [1] — $s = s_0 \sqrt{\frac{R_0}{R_{ni}}} = \frac{s_0}{\sqrt{\rho}}$; формула (29-а) при этом примет вид: $W_0 = \eta \cdot s = \frac{\eta \cdot s_0}{\sqrt{\rho}}$.

Подставим преобразованные члены в уравнение (31):

$$2 \left(\frac{W_0 \cdot n_b}{2} \right)^2 + \left(\frac{n_b \cdot W_0}{2} \right)^2 \cdot \frac{3\lambda - \rho}{s - \lambda} - 2 \left(\frac{n_b W_0}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{\lambda}{\rho - \lambda} \right)^2 \ln \frac{\rho}{\lambda} - \\ - \frac{3}{n_b^2} \left(\frac{W_0 n_b}{2} \right)^2 \cdot \frac{\rho + \lambda}{\rho - \lambda} = 4 \cdot R_0 \cdot r \cdot \Delta Y(\alpha),$$

или

$$2R_0 \cdot r \cdot \Delta Y(\alpha) = \left(\frac{W_0 n_b}{2} \right)^2 \left[1 + \frac{3\lambda - \rho}{2(\rho - \lambda)} - \right. \\ \left. - \left(\frac{\lambda}{\rho - \lambda} \right)^2 \ln \frac{\rho}{\lambda} - \frac{3(\rho + \lambda)}{2n_b^2(\rho - \lambda)} \right].$$

Вводя обозначение $\bar{r} = \frac{r}{R_0}$ и делая дальнейшие преобразования, окончательно имеем:

$$\Delta Y(x) = \frac{1}{2m \cdot r \cdot \bar{\rho}} \left(\frac{s_0 \cdot \gamma \cdot n_b}{2} \right)^2 \left[1 + \frac{3\lambda - \rho}{2(\rho - \lambda)} - \left(\frac{\lambda}{\rho - \lambda} \right)^2 \ln \frac{\rho}{\lambda} - \frac{3(\rho + \lambda)}{2n_b^2(\rho - \lambda)} \right], \quad (32)$$

где $m = \frac{R_0}{R_0}$ — коэффициент вытяжки;

$\bar{s}_0 = \frac{s_0}{R_0}$ — относительная толщина заготовки.

Определив из уравнения (32) $\Delta Y(\alpha)$ и пользуясь уравнениями (17) и (30), можно графическим путем найти приращение глубины вытяжки за один импульс — $\Delta \bar{H}$ (фиг. 7). Путем некоторого преобразования формул (17) и (30) получим зависимость между $\Delta \bar{H}$ и α в виде:

$$\Delta \bar{H} \approx \frac{\Delta Y(\alpha)}{\sin \alpha}. \quad (33)$$

Формула (33) дает верные значения при α близких к 90° , достаточно точные при $\alpha \geq 30^\circ$.

При $\alpha \leq 9^\circ$ формулой пользоваться нельзя, т. к. получающаяся при этом погрешность весьма велика.

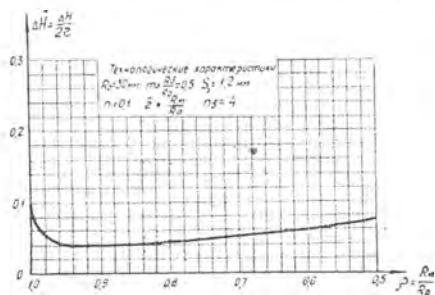
Представив уравнение (14) в виде

$$\rho = \sqrt{1 - 4m \cdot r [\mathcal{Y}(\alpha) - 1]}, \quad (34)$$

можно построить графическую зависимость изменения относительной глубины вытяжки — $\Delta \bar{H}$ от относительного сокращения фланца — ρ . Такая зависимость необходима для разработки механизма управления глубиной вытяжки.

Пример такого графика представлен на фиг. 8. При глубине вытяжки $H > 2r$ величина допустимого импульса определяется из преобразованной аналогичным способом формулы (19), окончательный вид которой следующий:

$$\Delta \bar{H} = \frac{1}{2m \cdot r \bar{\rho}} \left(\frac{s_0 \cdot \gamma \cdot n_b}{2} \right)^2 \times \left[1 + \frac{3\lambda - \rho}{2(\rho - \lambda)} - \left(\frac{\lambda}{\rho - \lambda} \right)^2 \right] \times$$



Фиг. 8. Типовой график изменения приращения глубины вытяжки — $\Delta \bar{H}$ в зависимости от относительного сокращения фланца — ρ .

$$\times \ln \frac{\rho}{\lambda} - \frac{3(\rho + \lambda)}{2n_b^2(\rho - \lambda)} \Big]. \quad (35)$$

Таким образом, если $\rho \leq \sqrt{1 - 4m \cdot \bar{r} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right)}$, то для определения $\Delta \bar{H}$ следует пользоваться формулой (32) и графиком, приведенным на рис 7. При $\rho \geq \sqrt{1 - 4\lambda \cdot \bar{r} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right)}$ следует использовать формулу (35).

Анализ формул, определяющих $\Delta \bar{H}$, показал, что величина допустимой глубины вытяжки за один импульс в процессе вытяжки сначала падает (с уменьшением ρ), достигая своего минимального значения при $\bar{H} = 1 \left(\alpha \approx \frac{\pi}{2} \right)$, а затем беспрерывно возрастает до конца вытяжки.

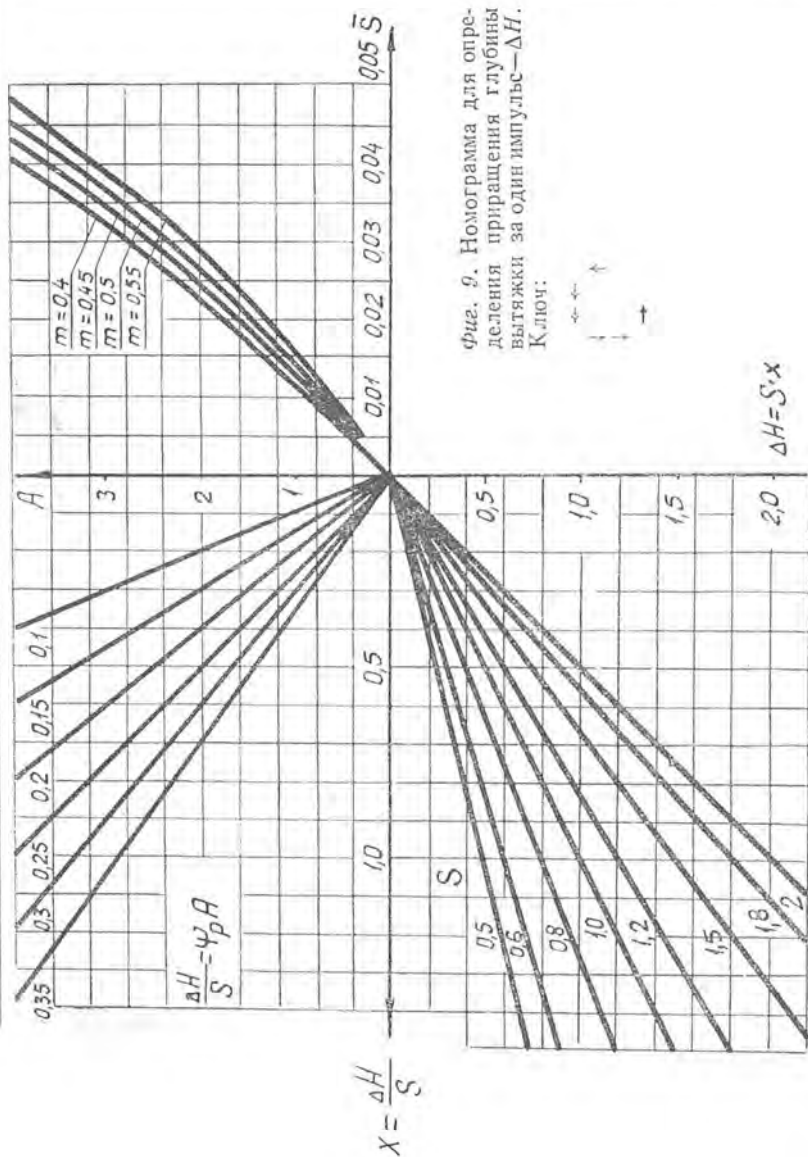
Точки ΔH_{\min} соответствуют $\rho_{\min} = \sqrt{1 - 4m \cdot \bar{r} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right)}$, поэтому в формуле (35) необходимо проставить соответствующие этому положению индексы *min*, т. е.

$$\Delta \bar{H}_{\min} = \frac{1}{2m \cdot \bar{r} \rho_{\min}} \left(\frac{\bar{s}_0 \cdot \gamma n_b}{2} \right)^2 \left[1 + \frac{3\lambda - \rho_{\min}}{2(\rho_{\min} - \lambda)} - \left(\frac{\lambda}{\rho_{\min} - \lambda} \right)^2 \ln \frac{\rho_{\min}}{\lambda} - \frac{3(\rho_{\min} + \lambda)}{2n_b^2(\rho_{\min} - \lambda)} \right].$$

Полученная формула весьма сложна для расчетов, поэтому для практической работы составлена номограмма, позволяющая определять ΔH для различных коэффициентов вытяжки, сечения и марки материала (фиг. 9).

Анализ механизма складкообразования, проводимый в процессе экспериментальных исследований показал, что при вытяжке деталей применение рассчитанных по формуле для материалов Д16АМ и АМГ6 величин импульса не дает разделения образовавшихся складок при калибровке фланца, в то время как при увеличении ΔH на 15—20% возможность получения устойчивых складок становится неопределенной.

При увеличении ΔH на 30% в большинстве случаев складки при калибровке теряли устойчивость и распадались каждая на три складки; при этом упрочнение фланца за счет сосредоточенной деформации при посадке складок значительно увеличивалось.



фиг. 9. Номограмма для определения приращения глубины вытязки за один импульс— ΔH .
 Ключ:

ВЫВОДЫ

1. Разработан способ пульсирующей вытяжки со складкообразованием, отличающийся тем, что в результате сочетания элементов вытяжки деталей без применения прижима, прерывистого приложения деформирующего усилия, а также калибровки фланца после потери устойчивости значительно улучшает механическую схему деформируемого материала, в результате чего достигается снижение коэффициента вытяжки на 15—20%.

2. В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что критерием выбора величины приращения глубины вытяжки служит степень упрочнения фланца за один импульс.

3. Расчет величины приращения глубины вытяжки за единичный импульс необходимо производить по формулам 32 и 35 или использовать для этой цели графический метод решения уравнения с помощью номограммы (рис. 9).

ЛИТЕРАТУРА

1. П. А. Шофман, Элементы теории холодной штамповки. Оборонгиз, 1952.
 2. В. П. Романовский, Справочник по холодной штамповке. Машгиз, 1960.
 3. И. А. Норицын, Исследование процесса пульсирующей вытяжки. Журнал «Вестник машиностроения», № 6, 1947.
 4. Ю. А. Рождественский, Исследование циклического нагружения материала, сб. МВТУ им. Баумана «Машины и технология ОМД», 1956.
 5. И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев, Справочник по математике, 1956.
 6. С. П. Тимошенко, Устойчивость упругих систем. ОГИЗ—Гостехиздат, 1946.
-