

УДК 621.7.044

Аргат Р. Г.
Пузырь Р. Г.**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ
ДЛЯ ВЫТЯЖКИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ, УСТРАНЯЮЩИХ ПОТЕРЮ
УСТОЙЧИВОСТИ ФЛАНЦА**

Листовая штамповка позволяет получать сложные по форме и точные по размерам изделия при значительной экономии металла и высокой производительности труда.

Большое значение приобретает дальнейшее совершенствование процессов пластического формообразования листового металла, что невозможно без их теоретического и экспериментального исследования.

Важной проблемой теории обработки металлов давлением является устойчивость процесса деформирования.

Устойчивость пластического формообразования листового металла – одно из основных условий получения штампованных изделий хорошего качества. Потеря устойчивости формообразования характеризуется возникновением больших местных деформаций, которые обычно приводят или к разрушению металла, или к образованию недопустимо больших искажений формы изделия. Повышение устойчивости формообразующих операций листовой штамповки обеспечивает снижение брака и значительную экономию металла, способствует увеличению надежности работы автоматических и поточных линий штамповки, улучшает качество продукции.

Устойчивость равновесия упруго-пластической системы (стержня, пластинки, оболочки) характеризуется способностью системы сохранять определенную форму равновесия при действии заданной нагрузки. В зависимости от свойств системы потеря устойчивости может происходить по-разному [1–4].

Целью работы является определение геометрических параметров листовой заготовки для вытяжки осесимметричных деталей и параметров деформирования, обеспечивающих формообразование деталей без складкообразования.

Согласно концепции Эйлера неустойчивость исходной (основной) формы равновесия возникает в момент появления смежной, т. е. сколь угодно близкой к исходной, отклоненной формы равновесия при неизменной нагрузке; для перехода к смежной форме равновесия достаточно самого малого отклонения (возмущения) системы от исходной формы равновесия.

При формообразовании деталей наблюдаются четыре типа потери пластической устойчивости листового металла: полосы скольжения, сосредоточенное утонение, вторичные полосы скольжения, волнистость (выпучивание).

Возникновение того или иного вида потери устойчивости зависит от характера напряженного состояния, анизотропии, скорости деформации, различных неоднородностей структурного и геометрического характера, присущих листовому металлу, и других факторов [3, 4, 5].

Первые три типа потери устойчивости возникают на участках листовой заготовки, подвергающихся растяжению. На этих участках листовая заготовка деформируется как система, которая обладает формами равновесия лишь при нагрузках, не превышающих определенного, критического значения. Неустойчивость пластического растяжения наступает в момент, когда упрочнение листового металла уже не в состоянии компенсировать его утонение и сопротивление листа действию внешних сил начинает снижаться.

Полосы скольжения являются результатом утонения листа вдоль некоторых линий на поверхности листового металла. Этот тип потери устойчивости возникает на начальной стадии деформирования и обуславливается наличием площадки текучести на диаграмме растяжения. После того как деформации превысят величину, соответствующую площадке текучести,

устойчивость процесса вследствие интенсивного упрочнения металла восстанавливается, и полосы скольжения исчезают. Сохраняются они лишь на участках заготовки, получивших малые величины остаточных деформаций. Полосы скольжения не приводят к разрыву металла, но портят внешний вид изделия.

Сосредоточенное утонение металла возникает в момент, соответствующий максимуму внешней нагрузки, действующей на листовую заготовку. Результатом потери устойчивости этого типа является значительное местное утонение листа на участке, расположенном симметрично относительно главных осей напряжений, и разрыв металла.

Вторичные полосы скольжения в отличие от полос скольжения начальной стадии деформирования возникают при деформациях, соответствующих максимуму внешней нагрузки. Вторичные полосы скольжения являются следствием резкого утонения листового металла вдоль некоторых линий на поверхности заготовки и приводят к быстрому разрыву металла.

Волнистость, являющаяся следствием потери устойчивости по схеме Эйлера, образуется на сжатых и сжато-растянутых участках листовой заготовки и приводит к искажению формы изделия.

Большая часть опубликованных работ по этому типу потери устойчивости относится к исследованию образования волнистости на плоском фланце при вытяжке деталей, имеющих форму тел вращения. В этих работах решение задачи об устойчивости фланца дано по аналогии с решением задачи об упруго-пластическом выпучивании сжатого стержня методом Энгессера-Кармана, т. е. принималось, что формулы для упругого выпучивания пластин и оболочек справедливы и при их выпучивании за пределом упругости, если модуль упругости заменить приведенным модулем. Однако расчет на устойчивость сжатых участков листовой заготовки при ее формообразовании является типичной задачей теории пластичности [6].

Точное решение задачи о напряженном состоянии фланца листовой анизотропной заготовки при глубокой вытяжке связано с большими математическими трудностями.

Вводя некоторые допущения обычно принимаемые для приближенного анализа напряженно-деформированного состояния при вытяжке листовой изотропной заготовки [5, 6, 7], задачу можно значительно упростить.

Рассмотрим вытяжку цилиндрического стакана из плоской ортотропной заготовки.

Будем пренебрегать изменением толщины фланца, т. е. считать, что фланец находится в условиях плоской деформации.

В процессе пластического формообразования листовой заготовки ее сжато-растянутые участки могут потерять устойчивость вследствие пластического выпучивания с образованием волнистости, представленной на рис. 1.

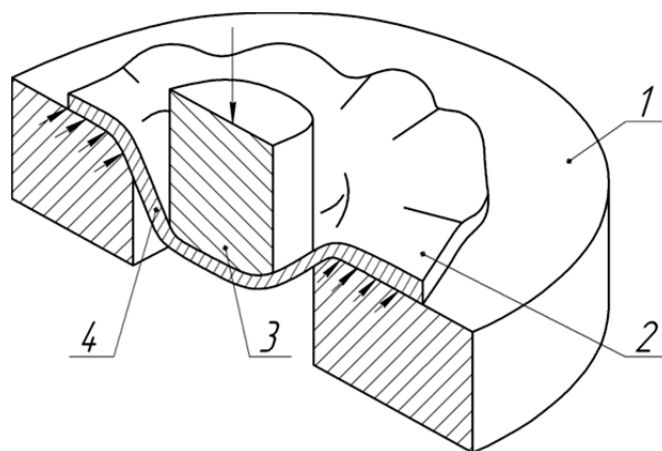


Рис. 1. Схема образования волнистости при вытяжке:

1 – матрица; 2 – фланец; 3 – пуансон; 4 – заготовка

Возникновение волнистости приводит к нарушению нормального течения процесса формообразования, образованию складок и к браку в изделии.

Для предотвращения выпучивания (рис. 2) и возникновения волнистости при вытяжке используют складкодержатели, перетяжные ребра и пороги, а также применяют и другие меры конструктивного и технологического характера [8], которые значительно удорожают штамп.

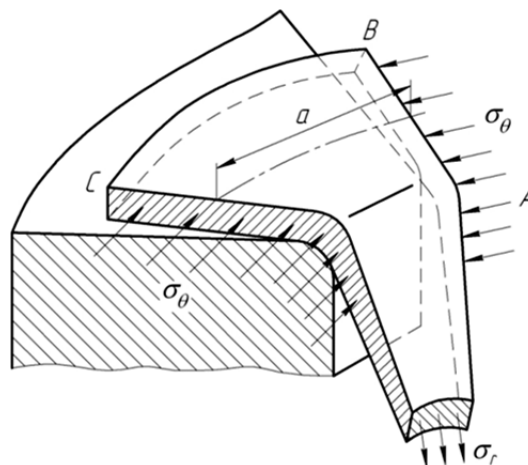


Рис. 2. Элемент фланца под действием внутренних усилий

Серединную плоскость элемента совместим с координатной плоскостью uv прямоугольной системы координат uvz (рис. 3); При этом внутренний край фланца OA , прилегающий к вытяжной кромке матрицы, расположим на оси u , наружный край фланца BC – на прямой $v = b$, а радиальные сечения OC и AB – на прямых $u = 0$ и $u = a$.

По линии OA заготовка плотно огибает рабочую кромку матрицы; вдоль прямых OC и AB кривизны элемента можно считать равным нулю. Поэтому граничные условия элемента принимаются следующими: сторона OA ($u = 0$) заделана жестко, сторона OC и AB ($u = 0$ и $u = a$) опирается свободно, сторона BC ($v = b$) – свободная.

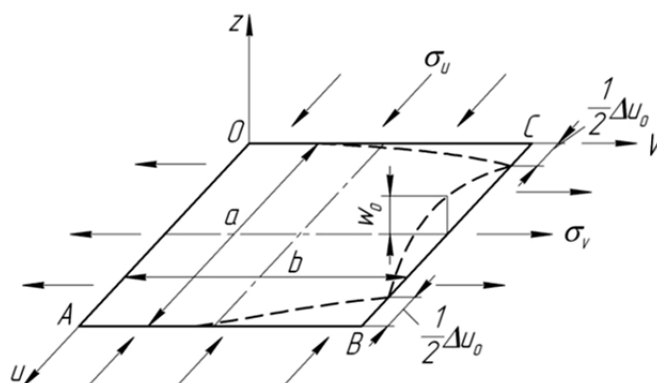


Рис. 3. Схема выпученного элемента фланца

Пусть в элементе под действием внешних контурных сил, расположенных в плоскости uv , на определенной стадии вытяжки создается однородное плоское сжато-растянутое напряженное состояние, характеризуемое соотношениями, в которых σ_u и σ_v – главные нормальные напряжения, равные средним значениям окружных σ_θ и радиальных σ_r напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_u &= \frac{1}{2}(\sigma_{\theta H} + \sigma_{\theta B}), \\ \sigma_v &= \frac{1}{2}(\sigma_{rH} + \sigma_{rB}), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где σ_{θ_H} , $\sigma_{\theta_в}$ и σ_{r_H} , $\sigma_{r_в}$ – значения окружного σ_θ и радиального σ_r напряжений по наружному и внутреннему краям фланца; при вытяжке без перетяжных ребер или порогов $\sigma_{r_H} = 0$.

Напряжения в точке фланца с координатой r равны:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\theta &= \sigma_{ec} \left(\ln \frac{r_H}{r} - 1 \right); \\ \sigma_r &= \sigma_{ec} \ln \frac{r_H}{r}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где σ_{ec} – средняя интенсивность напряжений во фланце;

r_H – наружный радиус фланца.

Величину σ_{ec} определяют по кривой упрочнения исходя из средней интенсивности деформаций ε_{ec} , принимаемой равной:

$$\varepsilon_{ec} = \frac{1}{2} (|\varepsilon_{\theta_H}| + |\varepsilon_{\theta_в}|), \quad (3)$$

здесь ε_{θ_H} и $\varepsilon_{\theta_в}$ – значения окружной деформации ε_θ на наружном и внутреннем краях фланца, равные:

$$\varepsilon_{\theta_H} = \ln \frac{r_0 - |u_H|}{r_0}; \quad \varepsilon_{\theta_в} = \ln \frac{r_в + |u_в|}{r_в}, \quad (4)$$

где $|u_H| = r_0 - r_H$ и $|u_в|$ – радиальные смещения (по абсолютной величине) наружного и внутреннего краев фланца, соответствующие данной стадии вытяжки;

r_0 – радиус плоской заготовки;

$r_в$ – внутренний радиус фланца.

Предположим, что при некотором дальнейшем изменении внешней нагрузки происходит выпучивание элемента, после чего в соответствии с граничными условиями элемент получает новое, близкое к исходному, равновесное состояние, характеризуемое прогибами:

$$\omega = \omega(u, v), \quad (5)$$

а также кривизнами χ_u и χ_v и кручением χ_{uv} срединной поверхности, равными

$$\chi_u = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial u^2}; \quad \chi_v = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial v^2}; \quad \chi_{uv} = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial u \partial v}. \quad (6)$$

Граничные условия элемента фланца при вытяжке без перетяжных ребер будут определяться следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= 0, \quad \text{при } v = 0; \\ \frac{\partial^2 \omega}{\partial v^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial u^2} &= 0; \quad \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial v^2} + \frac{3}{2} \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial u^2} \right) = 0 \quad \text{при } v = b; \\ \omega &= 0, \quad \frac{\partial^2 \omega}{\partial u^2} = 0 \quad \text{при } u = 0, u = a. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В работе [9] было получено уравнение равновесия для круглой пластинки:

$$R^2 \frac{d^2\theta}{dR^2} + R \frac{d\theta}{dR} + \left(\frac{h\sigma_m R^2}{D} - 1 \right) \theta = 0, \quad (8)$$

где $\theta = -\frac{dw}{dr}$;

h – толщина заготовки;

σ_m – меридиональное напряжение.

Обозначим $\left(\frac{h\sigma_r}{D} \right) = \alpha^2$, $u = r\alpha$. Тогда перейдем к уравнению:

$$u^2 \frac{d^2\theta}{du^2} + u \frac{d\theta}{du} + (u^2 - 1)\theta = 0, \quad (9)$$

которое представляет уравнение Бесселя, интеграл которого имеет вид:

$$\theta = C_1 J_1(u) + C_2 Y_1(u), \quad (10)$$

где $J_1(u)$ – бesselева функция первого рода с индексом 1;

$Y_1(u)$ – бesselева функция второго рода с индексом 1.

При $u = 0$ функция $Y_1(u)$ становится бесконечно большой, а так как угол поворота ограничен, то следует положить $C_2 = 0$, поэтому:

$$\theta = C_1 J_1(u). \quad (11)$$

Второе из граничных условий принимает вид:

$$\theta = 0, \quad R = r_n.$$

Считая $C_1 \neq 0$, получим:

$$J_1(\alpha r_n) = 0. \quad (12)$$

Функция J_1 выражается рядом:

$$J_1(u) = \frac{u}{2} \left[1 - \frac{1}{1 \cdot 2} \left(\frac{u}{2} \right)^2 + \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3} \left(\frac{u}{2} \right)^4 - \dots \right]. \quad (13)$$

Уравнение удовлетворяется при следующих значениях αr_n :

$$\alpha r_1 = 3,83; \alpha r_2 = 7,02; \alpha r_3 = 10,2.$$

Воспользовавшись первым из корней, найдем выражение для σ_r , при котором начинается потеря устойчивости фланца заготовки

$$\sigma_r = \frac{\alpha_1^2 D}{r_n^2 h}. \quad (14)$$

Для дальнейшего расчета воспользуемся цилиндрической жесткостью пластины, соответствующей секущему модулю – $D \approx D' = \frac{E_c h^3}{9}$, тогда:

$$\sigma_r = \frac{\alpha_1^2 E_c h^2}{9r_n^2}. \quad (15)$$

Тогда толщина пластины, которой соответствует начало образования складки, будет равной при прочих неизменных условиях:

$$h^2 = \frac{9r_n^2 \sigma_r}{\alpha_1^2 E_c}. \quad (16)$$

Учитывая зависимость (2) и $K = 14,68$ [9], окончательно получим:

$$h^2 = 0,61 \frac{r_n^2}{E_c} \sigma_{ec} \ln \frac{r_n}{r}. \quad (17)$$

ВЫВОДЫ

Полученная зависимость позволяет рассчитывать предельную толщину заготовки для вытяжки без прижима, когда образование складок не происходит. Хотя значения, вычисленные по данной зависимости, получаются завышенными по сравнению с рекомендациями [1], она позволяет качественно судить о тех факторах, которые влияют на процесс деформирования и складкообразования. С ростом коэффициента вытяжки, предела текучести металла, начального радиуса заготовки увеличивается и толщина металла, который можно деформировать без прижима, а с увеличением степени упрочнения – толщина заготовки уменьшается, что хорошо согласуется с данными других исследователей [1, 8]. Уточнить данную зависимость возможно при рассмотрении процесса образования складки на фланце полуфабриката с позиций теории пластичности, учитывая зоны разгрузки и догрузки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головлев В. Д. *Расчеты процессов листовой штамповки (Устойчивость формообразования тонколистового металла)* / В. Д. Головлев. – М. : Машиностроение, 1974. – 136 с.
2. Пановко Я. Г. *Устойчивость и колебание упругих систем* / Я. Г. Пановко, И. И. Губанова. – М. : Наука, 1967. – 280 с.
3. Матвеев А. Д. *Испытание листового металла на осесимметричное растяжение* / А. Д. Матвеев // *Кузнечно-штамповочное производство. – 1971. – № 10. – С. 14–17.*
4. Орленко Л. П. *Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках* / Л. П. Орленко. – М. : Машиностроение, 1964. – 167 с.
5. Томленов А. Д. *Пластическое деформирование металлов* / А. Д. Томленов. – М. : Металлургия, 1972. – 408 с.
6. Алексеев Ю. Н. *Вопросы пластического течения металлов* / Ю. Н. Алексеев. – Х. : Изд-во Харьковского университета, 1958. – 188 с.
7. *Основы теории обработки металлов давлением* / С. И. Губкин и др. – М. : Машигиз, 1959. – 534 с.
8. *Холодная штамповка в машиностроении* / Г. Н. Ровинский и др. ; под ред. В. Д. Головлева. – М. : Машигиз, 1954. – 279 с.
9. Вольмир А. С. *Устойчивость деформируемых систем* / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с.

Аргат Р. Г. – ст. преп. КрНУ им. М. Остроградского;

Пузырь Р. Г. – канд. техн. наук, доц. КрНУ им. М. Остроградского.

КрНУ им. М. Остроградского – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг.

E-mail: pudik-r@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 06.03.2013 г.