

УДК 539.374; 621.983

Яковлев С. С.  
Ремнев К. С.  
Калашников А. Е.

### ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ ФЛАНЦА АНИЗОТРОПНОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ВЫТЯЖКЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Важной проблемой теории обработки металлов давлением является устойчивость процесса деформирования. Повышение устойчивости формообразования операций листовой штамповки обеспечивает снижение брака, значительную экономию металла, способствует увеличению надежности автоматических и поточных линий штамповки, улучшает качество продукции.

Одним из типов потери устойчивости является волнистость (гофрообразование, выпучивание). Она является следствием потери устойчивости на сжатых и сжато растянутых участках листовой заготовки и приводит к искажению формы изделия и последующему разрушению. Большинство исследований этого вопроса касались малых упругих и упруго-пластических деформаций изотропных материалов. Однако потеря устойчивости при обработке металлов давлением происходит при значительных пластических деформациях, а листовой материал, полученный прокаткой, обладает анизотропией механических свойств. Поэтому представляет большой интерес потеря устойчивости в виде волнистости (гофрообразования) листового анизотропного материала [1–3].

Целью работы является разработка условия потери устойчивости в виде гофров кольцевой заготовки из анизотропного материала за пределом упругости; исследование влияния технологических параметров на образование складок при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала.

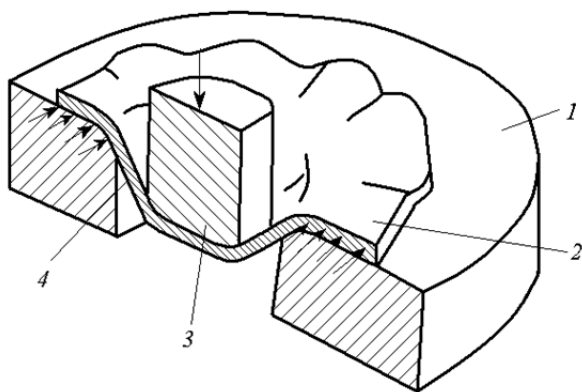


Рис. 1. Схема образования волнистости при вытяжке

При вытяжке деталей сложной формы сжато-растянутые участки заготовки располагаются вдоль криволинейных участков рабочего контура матрицы – во фланце 2 (рис. 1) и на свободных, не соприкасающихся со штампов, участке 4, находящихся между вытянутыми кромками матрицы 1 и пуансона 3. Возникновение волнистости приводит к нарушению нормального течения процесса формообразования, образованию складок и браку изделия.

Для предотвращения выпучивания и возникновения волнистости при вытяжке используют складкодержатели,

перетяжные ребра и пороги, а также применяют и другие меры конструктивного и технологического характера.

Рассмотрим устойчивость криволинейного плоского участка фланца при вытяжке без перетяжных ребер. На этом участке фланца возникают окружные сжимающие  $\sigma_\varphi$  и радиальные растягивающие  $\sigma_r$  напряжения.

Под влиянием окружных напряжений на определенной стадии процесса вытяжки возможно выпучивание фланца. Из данного участка фланца сечениями по двум радиальным направлениям и по дуге его внутреннего края вырежем элемент  $OABC$ , размер  $a$  которого по срединной линии фланца равен длине полуволны:

$$a=l/i,$$

где  $l$  – длина криволинейной части фланца по средней линии на данной стадии вытяжки;  $i$  – число полуволн.

Предполагаем, что листовый материал пластически ортотропен; приобретенная анизотропия в процессе пластического формообразования мала по сравнению с начальной; материал заготовки несжимаем, упрочнение материала изотропно, эффект Баушингера отсутствует. Напряженное состояние принимается плоским [4]. Рассмотрим некоторые зависимости теории круглых пластин, относящиеся к малым прогибам, для несимметричной изогнутой поверхности при потере устойчивости. Используем цилиндрическую систему координат, основная плоскость которой совпадает со срединной плоскостью заготовки. Длину радиус-вектора обозначим через  $r$ , полярный угол – через  $\varphi$ . Применим все известные соотношения теории прямоугольных пластинок, перейдя к новой системе координат.

Формулы перехода можно получить, совместив ось  $x$  прямоугольной системы координат с радиусом вектором  $r$ .

В работе [4] получены соотношения деформационной теории пластичности. Величины деформаций  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_\varphi$ ,  $\gamma_{r\varphi}$  и напряжениями для материала с цилиндрической анизотропией определяются по выражениям:

$$\varepsilon_r = \beta \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} (c_{11}\sigma_r + c_{12}\sigma_\varphi); \quad \varepsilon_\varphi = \beta \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} (c_{12}\sigma_r + c_{22}\sigma_\varphi); \quad \gamma_{r\varphi} = \beta \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} c_{33}\tau_{r\varphi}, \quad (1)$$

$$\text{где } \beta = \frac{3}{2(1+1/R_r+1/R_\varphi)}; \quad c_{11} = 1 + \frac{1}{R_r}; \quad c_{12} = -1; \quad c_{22} = 1 + \frac{1}{R_\varphi}; \quad c_{33} = \frac{2}{R_{r\varphi}};$$

$R_r = R_0$ ;  $R_\varphi = R_{90}$ ;  $R_{r\varphi} = R_0 / [2(R_{45} + 0,5)]$ ;  $R_r$ ,  $R_\varphi$ ,  $R_{r\varphi}$ ,  $R_0$ ,  $R_{90}$  и  $R_{45}$  – коэффициенты анизотропии;  $\sigma_i$  и  $\varepsilon_i$  – интенсивность напряжений и деформаций соответственно, которые определяются по формулам:

$$\sigma_i = \sqrt{\beta(c_{11}\sigma_r^2 + 2c_{12}\sigma_r\sigma_\varphi + c_{22}\sigma_\varphi^2 + c_{33}\tau_{r\varphi}^2)}; \quad (2)$$

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{1}{\beta} \left[ g(c_{22}\varepsilon_r^2 - 2c_{12}\varepsilon_r\varepsilon_\varphi + c_{11}\varepsilon_\varphi^2) + \frac{1}{c_{33}}\gamma_{r\varphi}^2 \right]}. \quad (3)$$

Решая зависимости (1) относительно напряжений, получим:

$$\sigma_r = \frac{1}{\beta g} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (c_{22}\varepsilon_r - c_{12}\varepsilon_\varphi); \quad \sigma_\varphi = \frac{1}{\beta g} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (c_{11}\varepsilon_\varphi - c_{12}\varepsilon_r); \quad \tau_{r\varphi} = \frac{1}{\beta g} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \gamma_{r\varphi}. \quad (4)$$

Используем энергетический метод исследования потери устойчивости в виде гофров тонколистовой заготовки, которая является следствием потери устойчивости на сжатых и сжато-растянутых участках заготовки и приводит к искажению формы изделия и последующему разрушению [5].

Сущность этого метода состоит в следующем: определяется изменение полной потенциальной энергии плоской листовой заготовки (пластины), нагруженной силами, лежащими в ее плоскости, после перехода из плоской формы равновесия в криволинейную, которая равна:

$$\Delta\Pi = \Delta U_0 + U_1 + U_2, \quad (5)$$

где  $\Delta U_0$  – изменение потенциальной энергии деформации срединной плоскости листовой заготовки (пластины) при выпучивании;

$U_1$  – потенциальная энергия деформации изгиба и кручения заготовки (пластины);

$U_2$  – изменение потенциала внешних сил, приложенных к заготовке (пластине).

Потенциальной энергией деформации заготовки поперечными силами пренебрегаем по ее малости.

Экстремум выражения (5) позволяет рассчитать нагрузку, при которой, наряду с плоской формой равновесия пластины, возникает новая криволинейная форма равновесия, так как общим признаком равновесия материальной системы является экстремальность полной потенциальной энергии  $\Pi$  системы. Полная потенциальная энергия равна:

$$\Pi = \Pi_0 + \Delta\Pi, \quad (6)$$

где  $\Pi_0$  – потенциальная энергия заготовки (пластины) до выпучивания (к выпучиванию не имеет отношения).

В работе [6] получены выражения для определения величин изменения потенциальной энергии деформации срединной плоскости листовой заготовки при выпучивании  $\Delta U_0$ , потенциальной энергии деформации изгиба и кручения заготовки  $U_1$ , изменения потенциала внешних сил, приложенных к заготовке  $U_2$ , входящие в выражение (6).

На основании полученных выражений запишем формулу для определения изменения полной потенциальной энергии кольцевой пластины с внутренним радиусом  $r = r_6$  и внешним  $r = r_n$  при асимметричной потере устойчивости:

$$\begin{aligned} \Delta\Pi = \frac{1}{2} E_p J \int_0^{\varphi_n} \int_{r_6}^{r_n} & \left[ \frac{1}{\beta g} (c_{22} \chi_r^2 - 2c_{12} \chi_r \chi_\varphi + c_{11} \chi_\varphi^2) + \frac{4}{\beta c_{33}} \chi_{r\varphi}^2 - (1-n) \frac{\chi^2}{\sigma_i^2} \right] r dr d\varphi + \\ & + \frac{1}{2} \int_0^{\varphi_n} \int_{r_6}^{r_n} \left[ N_r \left( \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 + N_\varphi \left( \frac{\partial w}{r \partial \varphi} \right)^2 + 2T_{r\varphi} \frac{\partial w}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right] r dr d\varphi, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{где } \chi_r = -\frac{\partial^2 w}{\partial r^2}; \quad \chi_\varphi = -\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2}; \quad \chi_{r\varphi} = -\frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \varphi} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \varphi};$$

$$\chi = \sigma_{rcc} \chi_r + \sigma_{\varphi cp} \chi_\varphi; \quad E_p = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}; \quad J = \frac{1}{3} t \left( \frac{bt'}{r_n^0 - m_1} \right)^2; \quad t' = \frac{t}{2r_0};$$

$$r_n^0 = r_n / r_0; \quad m_1 = r_6 / r_0; \quad N_r = -\sigma_{rcc} \frac{(r_n + r_6) \pi}{2}; \quad N_\varphi = -\sigma_{\varphi cp} (r_n - r_6);$$

$\chi_r$ ,  $\chi_\varphi$  и  $\chi_{r\varphi}$  – кривизна и кручение соответственно;

$E_p$  – модуль пластичности;

$J$  – момент инерции;

$t$ ,  $t'$  – толщина и относительная толщина заготовки;

$r_n^0$  – относительный наружный радиус;

$m_1$  – коэффициент вытяжки;

$N_r$ ,  $N_\varphi$  – нормальные силы, действующие на выделенный элемент;

$\sigma_{rcc}$ ,  $\sigma_{\varphi cp}$  – средние величины радиального и окружного напряжений.

Рассмотрим потерю устойчивости кольцевого плоского участка фланца при вытяжке. На этом участке возникают окружные сжимающие напряжения  $\sigma_\varphi$  и радиальные растягивающие напряжения  $\sigma_r$ . Под влиянием вытяжки возможно выпучивание фланца. Из данного

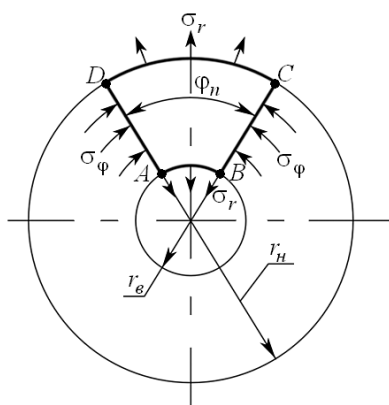


Рис. 2. Элемент кольцевой пластины, потерявший устойчивость

участка фланца вырежем элемент  $ABCD$ , образованные двумя радиальными и двумя угловыми сечениями (рис. 2), угол  $\varphi_n$  которого равен углу полуволны:

$$\varphi_n = \frac{2\pi}{n}, \quad (8)$$

где  $n$  – число полуволн.

Условия выпучивания каждого из подобных элементов аналогичны между собой. Поэтому при исследовании устойчивости фланца в целом или его отдельных участков достаточно рассмотреть лишь один элемент, подобный выделенному с двумя сторонами  $AD$ ,  $BC$  ( $r_n - r_в$ ) и  $DC$ ,  $AB$  ( $r_n \varphi_n$ ), ( $r_в \varphi_n$ ).

Срединную плоскость элемента совместим с координатной плоскостью  $r\varphi$ . При этом внутренний край фланца, прилегающий к вытяжной кромке, обозначится  $AB$   $r = r_в$ , наружный край фланца  $CD$   $r = r_n$ , а радиальные сечения  $AD$   $\varphi = 0$  и  $BC$   $\varphi = \varphi_n$ .

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 функцией прогиба:

$$w = w(r, \varphi). \quad (9)$$

По линии  $AB$  заготовка плотно огибает рабочую кромку матрицы вдоль прямых  $AD$ ,  $BC$  и внешней радиусной кромке заготовки имеет место свободное опирание на плоскость матрицы. Вытяжка осуществляется без прижима или со складкодержателем. Поэтому граничные условия элемента записываются следующим образом. Сторона  $AB$  ( $r = r_в$ ) зацеплена жестко, стороны  $AD$ ,  $BC$ ,  $DC$  ( $\varphi = 0$ ;  $\varphi = \varphi_n$ ;  $r = r_n$ ) свободно опираются на плоскость матрицы, т. е.:

$$\begin{aligned} r = r_в; \quad w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial r} = 0; \quad \varphi = 0; \quad \varphi = \varphi_n, \quad w = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} = 0; \\ \text{при } r = r_n, \quad \varphi = \frac{\pi}{4}, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} \right) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} \right) \right] = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Пусть в элементе под действием внешних контурных сил, расположенных в плоскости  $r\varphi$ , на определенной стадии вытяжки создается однородное плоское сжато-растянутое напряженное состояние  $\sigma_\varphi < 0$ ,  $\sigma_r \geq 0$ , в которых  $\sigma_r$  и  $\sigma_\varphi$  – главные нормальные напряжения, равные средним значениям окружных  $\sigma_\varphi$  и радиальных  $\sigma_r$  напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\varphi cp} &= \frac{1}{2} (\sigma_{\varphi_n} + \sigma_{\varphi_в}); \\ \sigma_{r cc} &= \frac{1}{2} (\sigma_{r_n} + \sigma_{r_в}), \end{aligned} \right\}$$

где  $\sigma_{\varphi n}$ ,  $\sigma_{\varphi в}$  и  $\sigma_{r n}$ ,  $\sigma_{r в}$  – значения окружного  $\sigma_{\varphi}$  и радиального  $\sigma_r$  напряжений по наружному и внутреннему краям фланца, которые определяются путем решения задачи о вытяжке до потери устойчивости при заданном перемещении края заготовки.

Критическое значение напряжения  $\sigma_{\varphi}$  будет определять наименьшую его величину. Последней соответствуют критические размеры элемента и критическая относительная толщина заготовки.

Для определения этих величин необходимо задать функцию прогибов, удовлетворяющую граничным условиям, содержащую геометрические параметры. Интегрирование выражения (7), определяющее изменение полной потенциальной энергии элемента кольцевой заготовки и минимизируя его величину, найдем искомые параметры – критическую величину напряжения  $\sigma_{\varphi}$ , критические геометрические соотношения размеров элемента заготовки и относительную величину  $t$ .

Рассмотрим распределение напряжений во фланце заготовки в направлении оси симметрии фистона или впадины, составляющем угол  $\beta_1$  с направлением прокатки. Это направление оси симметрии и ему перпендикулярное будут главными направлениями напряжений и скоростей деформации. Обозначим их  $r$  и  $\varphi$ , а соответствующие им напряжения и скорости деформации –  $\sigma_r$ ;  $\sigma_{\varphi}$  и  $\dot{\varepsilon}_r$ ;  $\dot{\varepsilon}_{\varphi}$ .

Используя соотношения, связывающие скорости деформации и напряжения [2], и принимая равенство параметров анизотропии  $F=G$  (механические свойства материала вдоль и поперек прокатки одинаковы), можно показать, что:

$$\frac{1}{t} \cdot \frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{rdr}{d\tau} f,$$

где  $r$  – расстояние рассматриваемой точки от центра заготовки;  $t$  – соответствующая ему толщина;  $f$  – величина, определяемая выражениями:

$$\left. \begin{aligned} f &= -\zeta_1 : \eta_1; \quad \zeta_1 = 2(\sigma_r + \sigma_{\varphi}); \\ \eta_1 &= \sigma_r + \sigma_{\varphi} - (\sigma_r - \sigma_{\varphi})\varphi_1; \\ \varphi_1 &= 1 + 2(R_0 \cos^2 2\beta_1 + R_{45} \sin^2 2\beta_1). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Введем параметрические выражения для главных напряжений, удовлетворяющих условию текучести Мизеса-Хилла [4] для плоского напряженного состояния:

$$\sigma_r = 2k_0 \cos(\omega - \omega_0); \quad \sigma_{\varphi} = 2k_0 \cos(\omega + \omega_0), \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} 2k_0 &= \left(1 + \frac{l^2}{m^2}\right)^{1/2} : l; \quad l = \sqrt{2F}; \\ \text{где} \quad \operatorname{tg} \omega_0 &= \frac{l}{m} = \left[1 + 2R_0 + 2(R_{45} - R_0) \sin^2 2\beta_1\right]^{-1/2}; \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$\omega$  – параметр, характеризующий положение точки на эллипсе текучести;

$$F = \frac{1}{\sigma_{s90}^2 (1 + R_{\varphi})}; \quad \sigma_{s90} = \sqrt{\frac{2(R_r + R_r R_{\varphi} + R_{\varphi})}{3R_r (R_{\varphi} + 1)}} \sigma_i.$$

В случае изотропного тела выражения (12) сводятся к формулам В. В. Соколовского [1]. Используя выражения (12) и (13), получим:

$$f = -\frac{2}{1 - \varphi_1 \operatorname{tg} \omega_0 \operatorname{tg} \omega}.$$

Из уравнения равновесия:

$$\frac{d}{dr} t(\sigma_r) + t \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} = 0 \quad (14)$$

с учетом уравнений (11) и (14) найдем:

$$\frac{dr}{r} = -\frac{1}{2} \frac{(\operatorname{tg} \omega - \operatorname{tg} \omega_0)(1 - \varphi_1 \operatorname{tg} \omega_0 \operatorname{tg} \omega)}{1 + \operatorname{tg}^2 \omega} d\omega.$$

Интегрируя последнее уравнение при граничном условии  $r = r_H$ ,  $\sigma_r = 0$  (на свободном от напряжений контуре заготовки), получим:

$$4 \ln \frac{R}{r_H} = (1 + \varphi_1) \operatorname{tg} \omega_0 \left( \omega - \omega_0 - \frac{\pi}{2} \right) + [2 + (1 - \varphi_1) \operatorname{tg} \omega_0 \operatorname{tg} \omega] : (1 + \operatorname{tg}^2 \omega) - 1, \quad (15)$$

где  $r_H$  – текущий радиус наружного края заготовки в рассматриваемом направлении.

Уравнение (15) служит для определения параметра  $\omega$  по заданному отношению  $\frac{r}{r_H}$  для исследуемой точки в рассматриваемый момент деформации заготовки. Зная величину параметра  $\omega$ , по формулам (11) находят величины главных напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_\varphi$ .

В частности, для изотропного тела соотношение (15) принимает вид:

$$\ln \frac{R}{r_H} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ \omega - \frac{2}{3} \pi - \frac{1}{2} \sin 2 \left( \omega - \frac{\pi}{6} \right) \right]. \quad (16)$$

Используем кривую упрочнения материала вида:

$$\sigma_i = B \varepsilon_i^m, \quad (17)$$

где  $B, m$  – константы материала.

Упрочнение материала учитываем осредненно по очагу пластической деформации. Величину  $\sigma_{icp}$  определяют по кривой упрочнения (16), исходя из средней интенсивности деформаций  $\varepsilon_{icc}$ , принимаемой равной:

$$\varepsilon_{icc} = \sqrt{\frac{2(R_r + R_r R_\varphi + R_\varphi)}{3R_r(R_\varphi + 1)}} \frac{1}{2} (|\varepsilon_{\varphi H}| + |\varepsilon_{\varphi \mathcal{B}}|),$$

здесь  $\varepsilon_{\varphi H}$  и  $\varepsilon_{\varphi \mathcal{B}}$  – значения окружной деформации  $\varepsilon_\varphi$  на наружном и внутреннем краях фланца, равные:

$$\varepsilon_{\varphi H} = \ln \frac{r_0 - |u_H|}{r_0}; \quad \varepsilon_{\varphi \mathcal{B}} = \ln \frac{r_{\mathcal{B}}}{r_{\mathcal{B}} + |u_{\mathcal{B}}|},$$

где  $|u_H| = r_0 - r_H$  и  $|u_{\mathcal{B}}|$  – радиальные смещения (по абсолютной величине) наружного и внутреннего краев фланца, соответствующие данной стадии вытяжки;

$r_0$  – радиус плоской заготовки;

$r_{\mathcal{B}}$  – внутренний радиус фланца.

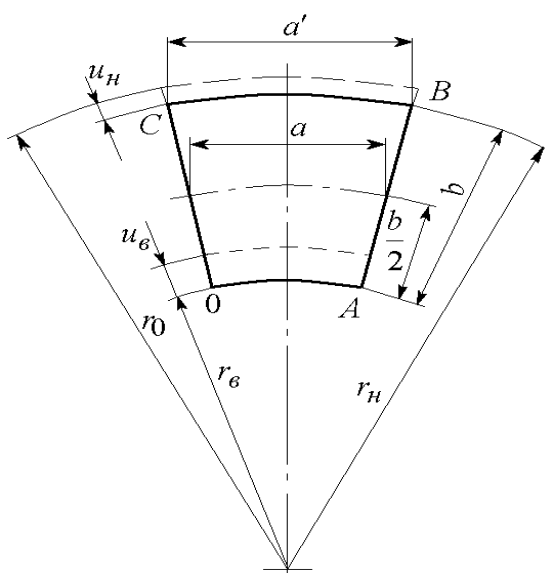


Рис. 3. Перемещения в элементе фланца

Из условия постоянства объема заготовки, если считать толщину фланца неизменной, смещение  $|u_0|$  будет равно (рис. 3):

$$|u_0| = r_0 \left[ -1 + \sqrt{1 + \left( \frac{2}{m_1} - \frac{|u_n|}{r_0} \right) \frac{|u_n|}{r_0}} \right],$$

где  $m_1 = r_0 / r_n$  – коэффициент вытяжки.

Аппроксимируем функцию прогиба выражением:

$$\omega = \varpi_0 \left[ 1 - \cos \frac{\pi}{2b} (r - r_0) \right] \sin \frac{i\varphi}{2}, \quad (18)$$

где  $\varpi_0$  – постоянная, равная максимальной амплитуде полуволны.

Функция (18) не удовлетворяет второму из граничных условий (10). Однако ошибка, возникающая вследствие этого, как показывает сравнение с точным решением аналогичной задачи [1], не превышает 2,5 % при  $a/b=1$  и 10 % при  $a/b=2$ .

Определены условия устойчивого протекания процесса вытяжки цилиндрических деталей из стали 08кп, алюминиевого сплава АМг6М и латуни Л63, механические свойства которых приведены в табл. 1. Расчеты выполнены при следующих геометрических размерах заготовки:  $r_0 = 100$  мм.

Таблица 1

Механические свойства исследуемых материалов

Материал	$R_0$	$R_{45}$	$B$ , МПа	$m$
Сталь 08 КП	1,706	0,704	802,5	0,173
Алюминиевый сплав АМг6М	0,540	0,950	461,3	0,124
Латунь Л63	0,808	1,108	665,1	0,278

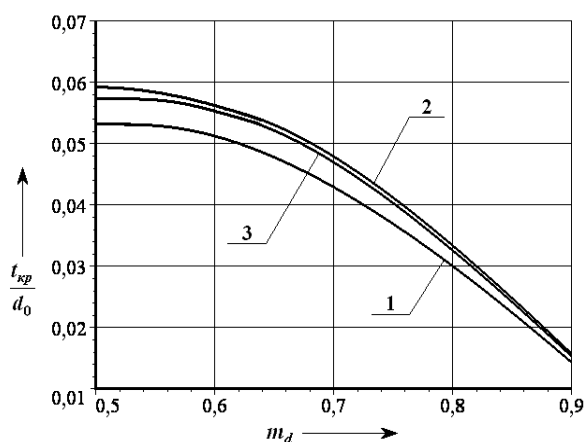


Рис. 4. Зависимости изменения  $t_{kp} / d_0$  от  $m_d$  ( $u_n = 1,5$  мм): кривая 1 – сталь 08кп; кривая 2 – алюминиевый сплав АМг6; кривая 3 – латунь Л63

На рис. 4 приведены графические зависимости изменения  $t_{kp} / d_0$  от  $m_d$  с учетом упрочнения при  $u_n = 1,5$  мм (рис. 4, а) и при  $u_n = 3,0$  мм (рис. 4, б).

Анализ графических зависимостей и результатов расчетов показывает, что с увеличением коэффициента вытяжки  $m_d$  с 0,5 до 0,8 критическое значение  $t_{kp} / d_0$ , соответствующее устойчивому протеканию процесса вытяжки, уменьшается на 50 %. Установлено, что с увеличением перемещения края  $u_n$  критическое значение  $t_{kp} / d_0$  увеличивается на 10 %.

Выявлено влияние коэффициентов анизотропии механических свойств на устойчивость листовой заготовки при вытяжке цилиндрических деталей. Расчеты выполнены при  $B = 803,0$  МПа;  $m = 0,18$ .

Установлено, что коэффициенты плоскостной анизотропии механических свойств оказывают существенное влияние на критическую величину  $t_{кр} / d_0$ . У материалов с  $R_0 < 1$  и  $R_{45} > 1$  при  $m_d = 0,5$  величина  $t_{кр} / d_0$  больше на 8 %; у материалов с  $R_0 > 1$  и  $R_{45} < 1$  при  $m_d = 0,5$  величина  $t_{кр} / d_0$  меньше на 14 % по сравнению с изотропным материалом ( $R_0 = 1$ ,  $R_{45} = 1$ ).

Анализ результатов расчетов показывает, что с увеличением размеров заготовки критическое значение  $t_{кр} / d_0$ , соответствующее устойчивому протеканию процесса вытяжки, уменьшается. При этом, чем меньше коэффициент вытяжки  $m_d$  (больше степень деформации заготовки), тем большее влияние оказывают размеры заготовки на величину  $t_{кр} / d_0$ : при  $m_d = 0,5$  и изменении  $r_0$  от 100 мм до 2000 мм  $t_{кр} / d_0$  уменьшается на 62 %; при  $m_d = 0,9$  и таком же изменении  $r_0$  величина  $t_{кр} / d_0$  уменьшается на 57 %.

Результаты теоретических расчетов качественно согласуются с экспериментальными данными, опубликованными в работах [1–3].

Работа выполнена по государственным контрактам в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы и грантам РФФИ.

## ВЫВОДЫ

Предложено условие потери устойчивости в виде гофров кольцевой заготовки из анизотропного материала за пределом упругости; приведен анализ влияния технологических параметров на образование складок при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головлев В. Д. *Расчеты процессов листовой штамповки* / В. Д. Головлев. – М. : Машиностроение, 1974. – 136 с.
2. *Ковка и штамповка. Справочник в 4-х т. Т. 4. Листовая штамповка* / Ред. совет: Е. И. Семенов и др.; под ред. С. С. Яковлева. – М. : Машиностроение, 2010. – 544 с.
3. Романовский В. П. *Справочник по холодной штамповке* / В. П. Романовский. – Л. : Машиностроение, 1979. – 520 с.
4. Яковлев С. П. *Обработка давлением анизотропных материалов* / С. П. Яковлев, С. С. Яковлев, В. А. Андрейченко. – Кишинев : Квант, 1997. – 331 с.
5. Вольмир А. С. *Устойчивость деформируемых систем* / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с.
6. Кухарь В. Д. *Влияние технологических параметров на образование складок при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала* / В. Д. Кухарь, С. С. Яковлев, К. С. Ремнев // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2011. – № 12. – С. 3–10.

Яковлев С. С. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ТулГУ;

Ремнев К. С. – канд. техн. наук, доц., докторант ТулГУ;

Калашников А. Е. – аспирант ТулГУ.

ТулГУ – Тульский государственный университет, г. Тула, Россия.

E-mail: mpf-tula@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 09.02.2012 г.