

УДК 539.374; 621.983

Складкообразование при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала*


С.С. Яковлев, К.С. Ремнев

ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», 300012, Тула, Российская Федерация, пр-т Ленина, 92.

Wrinkling of axisymmetric parts made by drawing of an anisotropic material

S.S. Yakovlev, K.C. Remnev

Tula State University, Lenina ave., 92, 300012, Tula, Russian Federation.

 e-mail: mpf-tula@rambler.ru

i Часто при вытяжке происходит потеря устойчивости на сжатых и сжато-растянутых участках листовой заготовки в виде волнистости, что приводит к искажению формы изделия и последующему разрушению. В большинстве исследований этой проблемы рассматриваются изотропные материалы. Однако листовая материал, полученный прокаткой, обладает анизотропией механических свойств. Поэтому большой интерес представляет исследование потери устойчивости в виде волнистости листового анизотропного материала. В исследовании использован энергетический метод. Разработан критерий потери устойчивости в виде складкообразования при вытяжке заготовок из анизотропного материала. Показано влияние технологических параметров и анизотропии механических свойств материала заготовки на образование складок при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала. Приведены результаты экспериментальных исследований складкообразования анизотропных листовых заготовок при вытяжке. Установлено, что результаты экспериментальных исследований качественно и количественно согласуются с теоретическими данными.

Ключевые слова: анизотропия механических свойств, экспериментальные исследования, вытяжка, листовые заготовки, энергетический метод, потеря устойчивости.

i Deep drawing is often accompanied by buckling of compressed and compressed-stretched areas of a sheet material in the form of wrinkles, which leads to distortions of the original shape of the part and its subsequent failure. In the majority of studies of this problem, isotropic materials are considered. However, sheet materials obtained by rolling exhibit anisotropic mechanical properties. Therefore, buckling failure in the form of wrinkling of an anisotropic material is of great interest. In this paper, the energy method is used. A criterion for buckling in the form of wrinkling when drawing anisotropic sheet materials is developed. The influence of technological parameters and anisotropy of mechanical properties of a sheet material on wrinkling of anisotropic materials at axisymmetric drawing is studied. The results of experimental studies of wrinkling of anisotropic sheet materials at drawing are presented. The results of experimental studies are in good qualitative and quantitative agreement with theoretical data.

Keywords: anisotropy of mechanical properties, experimental study, drawing, sheet material, energy method, buckling.

* Работа выполнена в рамках государственного задания на проведение научно-исследовательских работ Министерства образования и науки Российской Федерации на 2014–2020 годы и гранта РФФИ № 14-08-00066 а.

Одним из видов потери устойчивости листовой заготовки при вытяжке вследствие потери устойчивости на сжатых и сжато-растянутых участках является волнистость (гофрообразование, выпучивание). Это приводит к искажению формы изделия и последующему разрушению. В большинстве исследований этой проблемы рассматриваются малые упругие и упруго-пластические деформации изотропных материалов. Однако потеря устойчивости при обработке металлов давлением происходит при значительных пластических деформациях, а листовой материал, полученный прокаткой, обладает анизотропией механических свойств. Поэтому большой интерес представляет потеря устойчивости в виде волнистости (гофрообразования) листового анизотропного материала [1].

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

Для предотвращения выпучивания и возникновения волнистости при вытяжке используют складкодержатели, перетяжные ребра и пороги, а также применяют меры конструктивного и технологического характера.

Цель работы — проведение теоретических и экспериментальных исследований влияния технологических параметров и анизотропии механических свойств материала заготовки на образование складок при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала.

Критерий потери устойчивости. Рассмотрим устойчивость криволинейного плоского участка фланца при вытяжке без перетяжных ребер. На этом участке фланца возникают окружные сжимающие σ_ϕ и радиальные растягивающие σ_r напряжения.

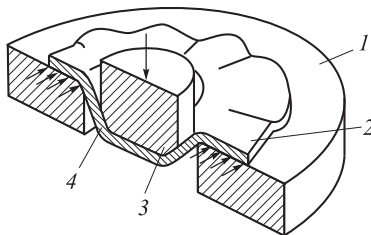


Рис. 1. Схема образования волнистости при вытяжке

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, 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 листовой 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 [2]. Рассмотрим некоторые зависимости малых прогибов теории круглых пластин для несимметричной изогнутой поверхности при потере устойчивости. Используем цилиндрическую систему координат, основная плоскость которой совпадает со срединной плоскостью заготовки. Длину радиус-вектора обозначим r , полярный угол — ϕ . Применим все известные соотношения теории прямоугольных пластинок, перейдя к новой системе координат.

Формулы перехода можно получить, совместив ось x прямоугольной системы координат с радиус-вектором r .

В работе [3] приведены соотношения деформационной теории пластичности в цилиндрической системе координат между деформациями ϵ_r , ϵ_ϕ , $\gamma_{r\phi}$ и напряжениями для материала с цилиндрической анизотропией:

$$\epsilon_r = \beta \frac{\epsilon_i}{\sigma_i} (c_{11}\sigma_r + c_{12}\sigma_\phi);$$

$$\epsilon_\phi = \beta \frac{\epsilon_i}{\sigma_i} (c_{12}\sigma_r + c_{22}\sigma_\phi); \quad \gamma_{r\phi} = \beta \frac{\epsilon_i}{\sigma_i} c_{33}\tau_{r\phi}, \quad (1)$$

где $\beta = 3/[2(1+1/R_r+1/R_\phi)]$; $c_{11} = 1+1/R_r$; $c_{12} = -1$; $c_{22} = 1+1/R_\phi$; $c_{33} = 2/R_{r\phi}$; $R_r = R_0$; $R_\phi = R_{90}$; $R_{r\phi} = R_0/[2(R_{45}+0,5)]$; R_r , R_ϕ , $R_{r\phi}$, R_0 , R_{90} и R_{45} — коэффициенты анизотропии; σ_i — интенсивность напряжений,

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

ϵ_i — интенсивность деформаций,

$$\epsilon_i = \sqrt{\frac{1}{\beta} \left[g(c_{22}\epsilon_r^2 - 2c_{12}\epsilon_r\epsilon_\phi + c_{11}\epsilon_\phi^2) + \frac{1}{c_{33}}\gamma_{r\phi}^2 \right]}. \quad (3)$$

Решая зависимости (1) относительно напряжений, получим

$$\sigma_r = \frac{1}{\beta g} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (c_{22}\varepsilon_r - c_{12}\varepsilon_\varphi);$$

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

Используем энергетический метод исследования потери устойчивости в виде гофров тонколистовой заготовки (пластины), которая является следствием потери устойчивости на сжатых и сжато-растянутых участках заготовки и приводит к искажению формы изделия и последующему разрушению [4, 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 форму, которая равна

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

Здесь ΔU_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 ввиду 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 Π системы. Полная потенциальная энергия

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

где Π_0 — потенциальная энергия заготовки (пластины) до выпучивания (к выпучиванию не имеет отношения).

В работе [3] получены выражения для определения величин изменения потенциальной энергии деформации срединной плоскости листовой заготовки при выпучивании ΔU_0 , потенциальной энергии деформации изгиба и кручения заготовки U_1 , изменения потенциала внешних сил, приложенных к заготовке U_2 , входящие в формулу (6). На основании полученных выражений запишем формулу для

определения изменения полной потенциальной энергии кольцевой пластины с внутренним радиусом $r = r_b$ и внешним $r = r_h$ при асимметричной потере устойчивости:

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

Здесь

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

$$\chi_{r\varphi} = -\frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \varphi} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \varphi}; \quad \chi = \sigma_{rcp} \chi_r + \sigma_{\varphi cp} \chi_\varphi;$$

$$E_p = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}; \quad J = \frac{1}{3} t \left(\frac{b t'}{r_h^0 - m_1} \right)^2;$$

$$t' = \frac{t}{2r_0}; \quad r_h^0 = \frac{r_h}{r_0}; \quad m_1 = \frac{r_b}{r_0};$$

$$N_r = -\sigma_{rcp} \frac{r_h + r_b}{2} \frac{\pi}{2}; \quad N_\varphi = -\sigma_{\varphi cp} (r_h - r_b);$$

E_p — модуль пластичности; χ_r , χ_φ и $\chi_{r\varphi}$ — кривизна и кручение соответственно; N_r , N_φ — нормальные силы, действующие на выделенный элемент; J — момент инерции; t , t' — толщина и относительная толщина заготовки; r_h^0 — относительный наружный радиус; m_1 — коэффициент вытяжки; σ_{rcp} , $\sigma_{\varphi cp}$ — средние величины радиального и окружного напряжений.

Рассмотрим потерю устойчивости кольцевого плоского участка фланца при вытяжке. На этом участке возникают окружные сжимающие напряжения σ_φ и радиальные растягивающие напряжения σ_r . Под влиянием вытяжки возможно выпучивание фланца. Из данного участка фланца вырежем элемент $ABCD$, образованный двумя радиальными и двумя угловыми сечениями (рис. 2), угол φ_n которого равен углу полутолны

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

где n — число полутолн.

Условия выпучивания каждого из подобных элементов аналогичны. Поэтому при исследовании устойчивости фланца в целом или его

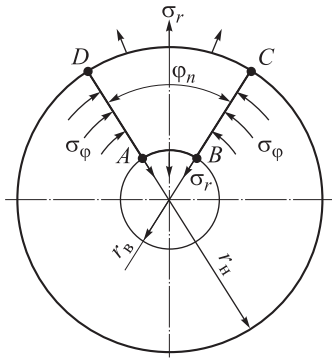


Рис. 2. Элемент кольцевой пластины, потерявший устойчивость

отдельных участков достаточно рассмотреть лишь один элемент, подобный выделенному с двумя сторонами AD , BC ($r_n - r_b$) и DC , AB ($r_n \varphi_n$), ($r_b \varphi_n$).

Срединную плоскость элемента совместим с координатной плоскостью $r\varphi$. При этом внутренний край фланца, прилегающий к вытяжной кромке AB , обозначим $r = r_b$, 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 кромки заготовки. Имеет место свободное опирание на плоскость матрицы. Вытяжка осуществляется без прижима или со складкодержателем. Поэтому граничные условия элемента записываются следующим образом: сторона AB ($r = r_b$) закреплена жестко, стороны AD , BC , DC ($\varphi = 0$; $\varphi = \varphi_n$, $r = r_n$) свободно опираются на плоскость матрицы, т. е.

- при $r = r_b$ $w = 0$, $\partial w / \partial r = 0$, $\varphi = 0$, $\varphi = \varphi_n$, $w = 0$, $\partial^2 w / \partial \varphi^2 = 0$;
- при $r = r_n$ $\varphi = \pi/4$,

$$\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} \right) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} \right) \right] = 0. \quad (10)$$

Пусть в элементе под действием внешних контурных сил, расположенных в плоскости

$r\varphi$, на определенной стадии вытяжки создается однородное плоское сжато-растянутое напряженное состояние $\sigma_\varphi < 0$, $\sigma_r \geq 0$, где σ_r и σ_φ — главные нормальные напряжения, равные средним значениям окружных σ_φ и радиальных σ_r напряжений,

$$\sigma_{\varphi \text{ ср}} = \frac{1}{2} (\sigma_{\varphi_n} + \sigma_{\varphi_b});$$

$$\sigma_{r \text{ ср}} = \frac{1}{2} (\sigma_{r_n} + \sigma_{r_b}).$$

Здесь σ_{φ_n} , σ_{φ_b} и σ_{r_n} , σ_{r_b} — значения окружного σ_φ и радиального σ_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 σ_φ определяет наименьшую величину. Последней соответствуют критические размеры элемента и критическая относительная толщина заготовки. Для определения этих величин необходимо задать функцию прогибов, удовлетворяющую граничным условиям. Проинтегрировав выражение (7), определяющее изменение полной потенциальной энергии элемента кольцевой заготовки и минимизируя его значение, найдем искомые параметры — критическое значение напряжения σ_φ , критические геометрические соотношения размеров элемента заготовки и относительную величину t .

Распределение напряжений во фланце анизотропной заготовки при вытяжке. Рассмотрим распределение напряжений во фланце заготовки в направлении оси симметрии фестоны или впадины, составляющем угол β_1 с направлением прокатки. Это направление оси симметрии и ему перпендикулярное будут главными направлениями напряжений и скоростей деформации. Обозначим их r и φ , а соответствующие им напряжения и скорости деформации — σ_r ; σ_φ и $\dot{\epsilon}_r$; $\dot{\epsilon}_\varphi$.

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

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

где r — расстояние рассматриваемой точки от центра заготовки; t — соответствующая ему

толщина; f — величина, определяемая выражением

$$f = -\zeta_1 / \eta_1.$$

Здесь

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

Введем параметрические выражения для главных напряжений, удовлетворяющих условию текучести Мизеса–Хилла [3] для плоского напряженного состояния:

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

где

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

ω — параметр, характеризующий положение точки на эллипсе текучести;

$$F = \frac{1}{\sigma_{s90}^2 (1 + R_\varphi)};$$

$$\sigma_{s90} = \sqrt{2(R_r + R_r R_\varphi + R_\varphi) / [3R_r (R_\varphi + 1)]} \sigma_i.$$

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

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

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 $r = r_n$, $\sigma_r = 0$ (на свободном от напряжений контуре заготовки), получим

$$\begin{aligned} 4 \ln \frac{R}{r_n} &= (1 + \varphi_1) \operatorname{tg} \omega_0 \left(\omega - \omega_0 - \frac{\pi}{2} \right) + \\ &+ \frac{2 + (1 - \varphi_1) \operatorname{tg} \omega_0 \operatorname{tg} \omega}{1 + \operatorname{tg}^2 \omega} - 1. \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь r_n — текущий радиус наружного края заготовки в рассматриваемом направлении.

Уравнение (15) используют для определения параметра ω по заданному отношению r/r_n для исследуемой точки в рассматриваемый момент деформации заготовки.

Зная значение параметра ω , по формулам (11) находят значения главных напряжений σ_r и σ_φ .

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

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

Используем кривую упрочнения материала вида

$$\sigma_i = B \varepsilon_i^m,$$

где B , m — константы материала.

Упрочнение материала учитываем осредненно по очагу пластической деформации. Величину σ_{icp} определим по кривой упрочнения (16), исходя из средней интенсивности деформаций

$$\varepsilon_{icp} = \sqrt{\frac{2(R_r + R_r R_\varphi + R_\varphi)}{3R_r (R_\varphi + 1)}} \frac{1}{2} (|\varepsilon_{\varphi n}| + |\varepsilon_{\varphi b}|).$$

Здесь $\varepsilon_{\varphi n}$ и $\varepsilon_{\varphi b}$ — значения окружной деформации ε_φ на наружном и внутреннем краях фланца,

$$\varepsilon_{\varphi n} = \ln \frac{r_0 - |u_n|}{r_0}; \quad \varepsilon_{\varphi b} = \ln \frac{r_b}{r_b + |u_b|},$$

где $|u_n| = r_0 - r_n$ и $|u_b|$ — радиальные смещения (по абсолютной величине) наружного и внутреннего краев фланца, соответствующие данной стадии вытяжки; r_0 — радиус плоской заготовки; r_b — внутренний радиус фланца.

Из условия постоянства объема заготовки, если считать толщину фланца неизменной, смещение (рис. 3)

$$|u_b| = r_b \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2}{m_1} - \frac{|u_n|}{r_b} \right) \frac{|u_n|}{r_b}} \right].$$

Здесь $m_1 = r_b / r_0$ — коэффициент вытяжки.

Аппроксимируем функцию прогиба выражением

$$\omega = \varpi_0 \left[1 - \cos \frac{\pi}{2b} (r - r_b) \right] \sin \frac{i\varphi}{2}, \quad (17)$$

где ϖ_0 — постоянная, равная максимальной амплитуде полуволны.

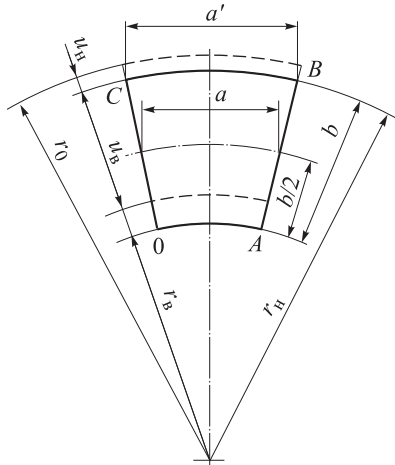


Рис. 3. Перемещения в элементе фланца

Функция (17) 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 $a/b=2$.

Результаты расчетов. Определены условия устойчивого протекания процесса вытяжки цилиндрических деталей из стали 08кп, алюминиевого сплава АМг6М и латуни Л63. Расчеты выполнены при $B = 803,0$ МПа, $m = 0,18$ радиусе заготовки $r_0 = 100$ мм.

Механические свойства исследуемых материалов

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

Зависимости $t_{кр}/d_0$ от m_d с учетом упрочнения приведены на рис. 4.

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

Зависимость коэффициентов анизотропии механических свойств на устойчивость листовой заготовки при вытяжке цилиндрических деталей приведена на рис. 5.

Экспериментальные исследования. Цель экспериментальных исследований — определение

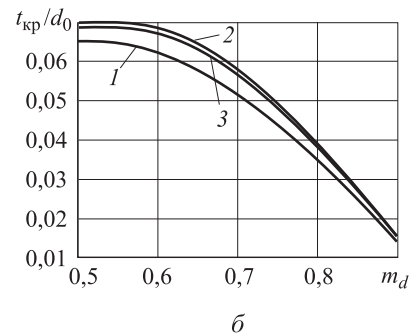
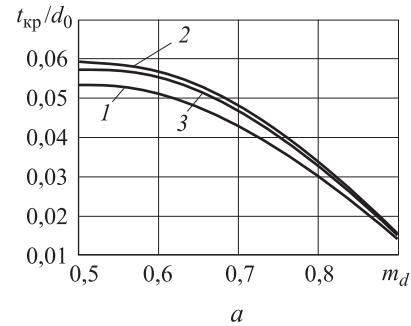


Рис. 4. Зависимости изменения $t_{кр}/d_0$ от m_d : а — $u_n = 1,5$ мм; б — $u_n = 3,0$ мм; 1 — сталь 08кп; 2 — алюминиевый сплав АМг6; 3 — латунь Л63

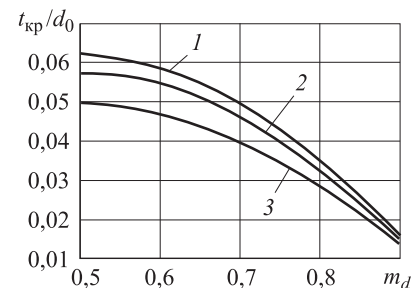


Рис. 5. Зависимость $t_{кр}/d_0$ от m_d при $u_n = 1,5$ мм: 1 — $R_0 = 0,2, R_{45} = 2,0$; 2 — $R_0 = 1,0, R_{45} = 1,0$; 3 — $R_0 = 2,0, R_{45} = 0,2$

предельных возможностей вытяжки плоских круглых заготовок без образования складок для материалов, имеющих плоскостную анизотропию механических свойств и изотропного упрочняющихся.

Эксперимент проводили на испытательном комплексе INSTRON 59-82, позволяющем с высокой точностью регистрировать силу вытяжки, перемещение пуансона в процессе выполнения операции и полученные результаты выводить в виде графиков и таблиц.

Эксперимент проводился на опытной штамповой оснастке для вытяжки, показанной на рис. 6. Использовались радиальная матрица диаметром $d_m = 36,6$ мм с радиусом закругления рабочего профиля $r_m = 4$ мм; пуансоны диаметрами $d_n = 33,6$ мм или $d_n = 33,0$ мм в зависимости от толщины исследуемого материала

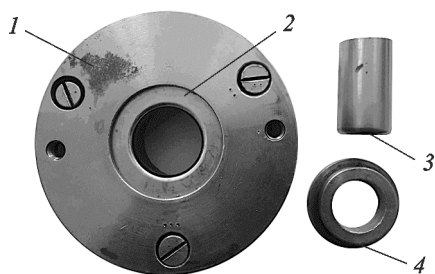


Рис. 6. Опытная штамповая оснастка:
1 — матрицедержатель; 2 — матрица; 3 — пуансон;
4 — центратор

Результаты исследований устойчивости к складкообразованию

Материал	Параметр				
	s_0 , мм	d_0 , мм	m_d	h , мм	$\bar{t}_{кд} = s_0/d_0$
Сталь 08кп	1,2	54,5	0,644	3,5	0,0220
		49,2	0,714	6,0	0,0244
		48,0	0,731	> 6,0	≤ 0,0250
Латунь Л63	1,42	52,7	0,661	6,0	0,0269
		48,1	0,723	9,0	0,0295
		47,0	0,740	> 9,0	≤ 0,0302

с радиусом закругления рабочего профиля $r_{п} = 4$ мм.

Исследования проводились на опытной штамповой оснастке без прижима листовых заготовок. Для заготовок использовались сталь 08кп и латунь Л63 толщиной $s_0 = 1,2$ мм и $s_0 = 1,42$ мм соответственно.

Толщина листового материала выбиралась по эмпирической формуле Шофмана

$$D - d_1 \leq (18...22)s_0, \tag{18}$$

где D — диаметр плоской заготовки; d_1 — диаметр матрицы; s_0 — толщина заготовки.

Опытная штамповая оснастка позволяла осуществлять вытяжку заготовок диаметром не более 60 мм. При соблюдении неравенства (18) процесс вытяжки проходит без образования складок для заготовок толщиной $s_0 \geq 1,1...1,3$ мм.

Исследование устойчивости плоской заготовки к складкообразованию при вытяжке проводилось по следующей методике. Изготавливались кружки различного диаметра 47...60 мм. Осуществлялась вытяжка кружков в три этапа на заданную глубину. Испытанию подвергалось не менее шести кружков. После каждого этапа определялись: конечный диаметр, наличие, высота и количество складок.

Образцы из латуни Л63 после испытаний при различной глубине внедрения пуансона h и сочетания технологических параметров, которые обеспечивают устойчивое протекание операции вытяжки, представлены на рис. 7 и в таблице.

Данные, приведенные на рис. 5 и в таблице, показывают, что на складкообразование оказывают влияние следующие факторы: коэффициент вытяжки, глубина внедрения пуансона и

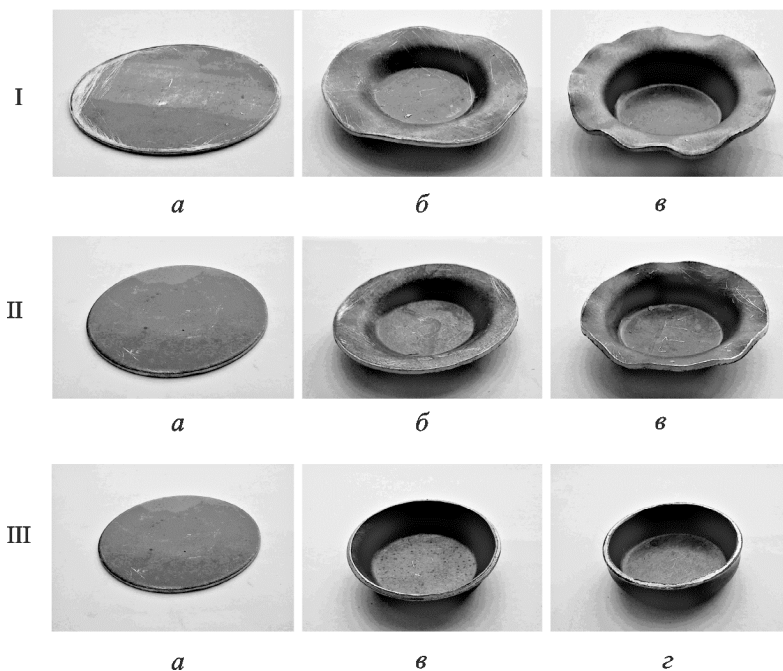


Рис. 7. Образцы из латуни Л63 после испытаний:
 a — исходная заготовка; b — заготовка при $h = 6,0$ мм; v — заготовка при $h = 9,0$ мм; z — колпачок;
I — $d_0 = 59,9$ мм; II — $d_0 = 56,0$ мм; III — $d_0 = 49,0$ мм

механические характеристики материала заготовки:

- для стали 08кп

$$\bar{t}_{кр.пр} = 0,0247 \pm 0,0003;$$

- для латуни Л63

$$\bar{t}_{кр.пр} = 0,0299 \pm 0,0004.$$

Результаты экспериментальных исследований качественно и количественно согласуются с теоретическими данными (до 5...10 %), опубликованными в работах [1, 3, 5, 11–14].

Выводы

1. Определено влияние коэффициентов анизотропии механических свойств на устойчивость листовой заготовки при вытяжке цилиндрических деталей (см. рис. 5).

2. 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 $m_d = 0,5$ значение $t_{кр}/d_0$ больше на 8 %; у материалов с $R_0 > 1$ и $R_{45} < 1$ при $m_d = 0,5$ меньше на 14 % по сравнению с изотропным материалом ($R_0 = 1$, $R_{45} = 1$).

Литература

- [1] Шофман Л.А. *Теория и расчеты процессов холодной штамповки*. Москва, Машиностроение, 1964. 365 с.
- [2] Бебрис А.А. *Устойчивость заготовки в формообразующих операциях листовой штамповки*. Рига, Зинатие, 1978. 125 с.
- [3] Романовский В.П. *Справочник по холодной штамповке*. Ленинград, Машиностроение, 1979. 520 с.
- [4] Яковлев С.С., ред. *Ковка и штамповка: Справочник. В 4 т. Т. 4: Листовая штамповка*. Москва, Машиностроение, 2010. 732 с.
- [5] Головлев В.Д. *Расчеты процессов листовой штамповки*. Москва, Машиностроение, 1974. 136 с.
- [6] Адамеску Р.А., Гельд П.В., Митюшков Е.А. *Анизотропия физических свойств металлов*. Москва, Металлургия, 1985. 136 с.
- [7] Микляев П.Г., Фридман Я.Б. *Анизотропия механических свойств металлов*. Москва, Металлургия, 1986. 224 с.
- [8] Гречников Ф.В. *Деформирование анизотропных материалов*. Москва, Машиностроение, 1998. 446 с.
- [9] Яковлев С.П., Кухарь В.Д. *Штамповка анизотропных заготовок*. Москва, Машиностроение, 1986. 136 с.
- [10] Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А. *Обработка давлением анизотропных материалов*. Кишинев, Квант, 1997. 331 с.
- [11] Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Трегубов В.И. *Теория и технология штамповки анизотропных материалов*. Москва, Машиностроение, 2012. 400 с.
- [12] Кухарь В.Д., Яковлев С.С., Ремнев К.С. Влияние технологических параметров на образование складок при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2011, № 11, с. 3–10.
- [13] Грязев М.В., Яковлев С.С., Ремнев К.С. Гофрообразование при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропных материалов. *Международ. науч.-техн. конф. Современные металлические материалы и технологии*. Санкт-Петербург, 2013, с. 331–336.
- [14] Рузанов Ф.И. Определение критических деформаций при формообразовании детали из анизотропного листового металла. *Машиноведение*, 1974, № 2, с. 103–107.

References

- [1] Shofman L.A. *Teoriia i raschety protsessov kholodnoi shtampovki* [Theory and calculations cold forming processes]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1964. 365 p.
- [2] Bebris A.A. *Ustoichivost' zagotovki v formoobrazuiushchikh operatsiiakh listovoi shtampovki* [Resilience preform shaping operations stamping]. Riga, Zinatie publ., 1978. 125 p.

- [3] Romanovskii V.P. *Spravochnik po kholodnoi shtampovke* [Handbook of cold forming]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1979. 520 p.
- [4] *Kovka i shtampovka: Spravochnik: V 4 t. T. 4: Listovaia shtampovka* [Forging and Stamping: Reference: In 4 vol. Vol. 4: Stamping]. Ed. Iakovlev S.S. Moscow, Mashinostroenie publ., 2010. 732 p.
- [5] Golovlev V.D. *Raschety protsessov listovoi shtampovki* [Calculations stamping processes]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1974. 136 p.
- [6] Adamesku R.A., Gel'd P.V., Mitiushkov E.A. *Anizotropiia fizicheskikh svoystv metallov* [Anisotropy of physical properties of metals]. Moscow, Metallurgii publ., 1985. 136 p.
- [7] Mikliaev P.G., Fridman Ia.B. *Anizotropiia mekhanicheskikh svoystv metallov* [Anisotropy of mechanical properties of metals]. Moscow, Metallurgii publ., 1986. 224 p.
- [8] Grechnikov F.V. *Deformirovanie anizotropnykh materialov* [Deformation of anisotropic materials]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1998. 446 p.
- [9] Iakovlev S.P., Kukhar' V.D. *Shtampovka anizotropnykh zagotovok* [Stamping blanks anisotropic]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1986. 136 p.
- [10] Iakovlev S.P., Iakovlev S.S., Andreichenko V.A. *Obrabotka davleniem anizotropnykh materialov* [Forming anisotropic materials]. Kishinev, Kvant publ., 1997. 331 p.
- [11] Iakovlev S.S., Kukhar' V.D., Tregubov V.I. *Teoriia i tekhnologiiia shtampovki anizotropnykh materialov* [Theory and technology of forming anisotropic materials]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2012. 400 p.
- [12] Kukhar' V.D., Iakovlev S.S., Remnev K.S. Vliianie tekhnologicheskikh parametrov na obrazovanie skladok pri vytyazhke osesimmetrichnykh detalei iz anizotropnogo materiala [Influence of process parameters on the formation of folds at drawing axisymmetric parts of an anisotropic material]. *Kuznechno-shtampovnoe proizvodstvo* [Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure]. 2011, no. 11, pp. 3–10.
- [13] Griazev M.V., Iakovlev S.S., Remnev K.S. *Gofroobrazovanie pri vytyazhke osesimmetrichnykh detalei iz anizotropnykh materialov* [The formation of corrugations the draw-axisymmetric parts of anisotropic materials]. *Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia «Sovremennye metallicheskie materialy i tekhnologii»* [International scientific conference «Modern Metal Materials and Technologies»]. St.Peterburg, 2013, pp. 331–336.
- [14] Ruzanov F.I. Opredelenie kriticheskikh deformatsii pri formoobrazovanii detali iz anizotropnogo listovogo metalla [Determination of critical strain in forming parts of anisotropic sheet metal]. *Mashinovedenie* [Engineering science]. 1974, no. 2, pp. 103–107.

Статья поступила в редакцию 24.06.2014

Информация об авторах

ЯКОВЛЕВ Сергей Сергеевич (Тула) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Механика пластического формоизменения». ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» (300012, Тула, Российская Федерация, пр-т Ленина, 92, e-mail: mpf-tula@rambler.ru).

РЕМНЕВ Кирилл Сергеевич (Тула) — кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Механика пластического формоизменения». ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» (300012, Тула, Российская Федерация, пр-т Ленина, 92, e-mail: mpf-tula@rambler.ru).

Information about the authors

YAKOVLEV Sergey Sergeevich (Tula) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of «Mechanics of Plastic Forming» Department. Tula State University (TSU, Lenina ave., 92, 300012, Tula, Russian Federation, e-mail: mpf-tula@rambler.ru).

REMNEV Kirill Sergeevich (Tula) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Doctoral Student of «Mechanics of Plastic Forming» Department. Tula State University (TSU, Lenina ave., 92, 300012, Tula, Russian Federation, e-mail: mpf-tula@rambler.ru).