

УДК 621.983.3, 539.376

DOI: 10.30987/article\_5c129147c32b90.29812449

**А.В. Черняев**, д.т.н.

(ФГБОУ ВО Тульский государственный университет, 300012, Россия, г. Тула, проспект Ленина, 92)

**В.Н. Чудин**, д.т.н.

(ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)»,  
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9)

**Д.М. Тесаков**, инженер-конструктор

(АО КБ приборостроения им. академика А.Г. Шипунова,  
Россия, 300001, г. Тула, Щегловская засека, 59)

E-mail: sovet01tsu@rambler.ru

## Последовательно-совмещенная вытяжка заготовки при вязко-пластическом деформировании

Предложены схема и расчеты технологии вытяжки, при которой в ступенчатой матрице производится последовательно вытяжка без утонения (свертка) и с утонением (протяжка). Материал листовых заготовок принят вязко-пластическим. Использован энергетический метод расчета с применением разрывных полей скоростей перемещений. Приведены расчетные оценки силы вытяжки и повреждаемости материала.

**Ключевые слова:** вытяжка; вязко-пластический материал; мощность; давление; повреждаемость.

**A.V. Chernyaev**, Dr. Sc. Tech.

(FSBEI HE Tula State University, 92, Lenin Avenue, Tula, Russia, 300012)

**V.N. Chudin**, Dr. Sc. Tech.

(Federal State Institution of Higher Education «Russian University of Transport» (RUT - MIIT),  
127994, Moscow, 9b9 Obrazcova Street)

**D.M. Tesakov**, Design Engineer

(PC Academician Shipunov Design Office of Instrument Making, 59, Shcheglovskaya Zaseka, Tula, 300001, Russia)

## Serial-aligned blank drawing at visco-plastic deformation

A circuit and computations of drawing technology are offered at which a drawing without thinning (convolution) and with thinning (broach) is carried out in a step matrix. Visco-plastic material is used for sheet blanks. A power method of computation with the use of discontinuous fields of traverse speeds is used. There are shown design assessments of a drawing force and material damageability.

**Keywords:** drawing; visco-plastic material; power; pressure; damageability.

### Введение

Процессы вытяжки цилиндрических пустотелых деталей с донной частью используются в различных отраслях машиностроения [1, 2]. Предлагаемая схема процесса состоит из вытяжки без утонения стенки на первой (верхней) матрице и вытяжки с утонением на второй (нижней) матрице. В отличие от комбинированной вытяжки на одной матрице данная схема позволяет снизить технологическую силу операции и интенсифицировать процесс.

На рис. 1 показана установившаяся стадия процесса.

### Кинематика, мощность, давление

Рассмотрим кинематику деформирования. На первой (верхней) матрице точки конического фланца перемещаются при меридиональной скорости:

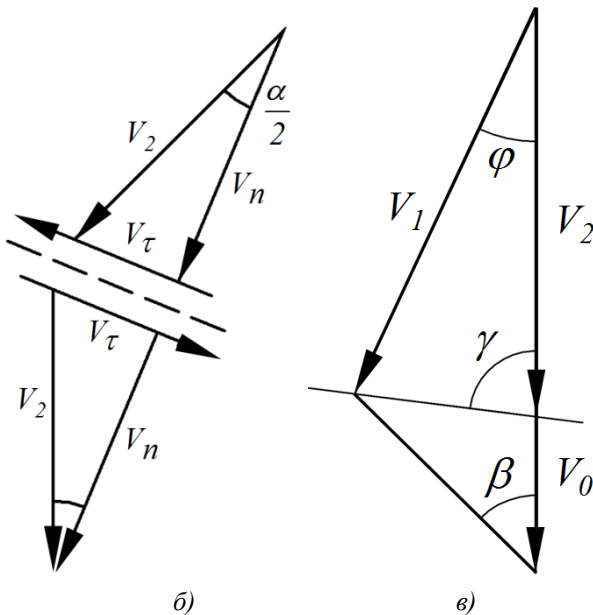
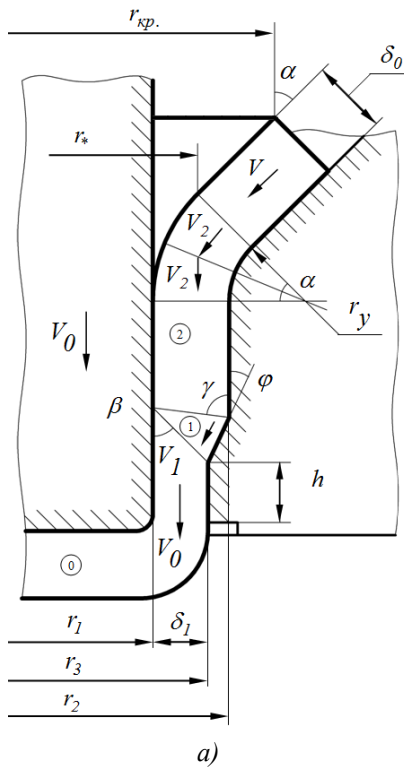
$$v = -v_2 \left( \frac{r_*}{r} \right)^f = -\eta v_0 \left( \frac{r_*}{r} \right)^f. \quad (1)$$

Здесь

$$v_2 = \frac{r_3^2 - r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} v_0 = \eta v_0; \quad (2)$$

$$f = \frac{R}{1+R};$$

где  $R$  – коэффициент анизотропии материала;  $r_*$  – граница фланца;  $r_* \leq r \leq r_{kp}$  – координата произвольной точки фланца;  $r_{kp}$  – текущий радиус края фланца;  $v_0$  – скорость перемещения пуансона.



**Рис. 1. Схема последовательной вытяжки:**  
 а – поле скоростей; б – скорости на линии разрыва в угловой зоне заготовки; в – годограф скоростей при утонении

Граница фланца определится, исходя из схемы процесса, выражением

$$r_* = r_1 + (r_y + \delta_0)(1 - \cos \alpha),$$

где  $r_1$  – радиус пуансона;  $r_y$  – угловой радиус матрицы;  $\delta_0$  – толщина заготовки;  $\alpha$  – угол конуса матрицы.

По уравнению (1) можно установить зависимости для эквивалентных скорости деформаций и деформации:

$$\xi_e = k \eta r_*^f r^{-1-f} v_0; \quad (3)$$

$$\varepsilon_e = k \ln \frac{r}{r_*}, \quad (4)$$

где  $k = \frac{2}{\sqrt{3}} (1 - f + f^2)^{\frac{1}{2}}$ .

При вытяжке с нагревом состояние деформируемого материала выражается уравнением [2]:

$$\sigma_e = A \varepsilon_e^m \xi_e^n, \quad (5)$$

где  $\sigma_e$ ,  $\varepsilon_e$ ,  $\xi_e$  – соответственно эквивалентные напряжение, деформация, скорость деформаций;  $A$ ,  $m$ ,  $n$  – константы материала при данной температуре обработки. Учитывая выражения (3), (4) запишем в соответствии с уравнением (5), что

$$\sigma_e = A k^{m+n} (r_*^f r^{-1-f} \eta v_0)^n \left( \ln \frac{r}{r_*} \right)^m. \quad (6)$$

С помощью выражений (3), (6) можно представить мощность деформаций во фланце, т.е.

$$N_{\phi.n.} = \int \sigma_e \xi_e dW = A k^{1+m+n} r_*^{(1+n)f} \delta_0 (\eta v_0)^{1+n} \int_{r_*}^{r_{kp}} \left( \frac{1}{r} \right)^{n(1+n)f} \left( \ln \frac{r}{r_*} \right)^m. \quad (7)$$

Заготовка претерпевает изгиб и спрямление на угловой поверхности матрицы. Положим, что здесь происходят деформации меридиональные и по толщине листа, т.е. схема деформаций плоская. Введем линию разрыва скорости, как показано на схеме операции. Скорости на этой линии изображены на рис. 1, б. В соответствии с этим представим формулы касательной и нормальной скоростей:

$$\left. \begin{aligned} v_\tau &= 2v_2 \sin \frac{\alpha}{2} = 2\eta v_0 \sin \frac{\alpha}{2}; \\ v_n &= v_2 \cos \frac{\alpha}{2} = \eta v_0 \cos \frac{\alpha}{2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Эквивалентные деформацию, скорость деформаций и напряжение запишем, учитывая выражения (8) и уравнение (5), как

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_e &= \frac{v_\tau}{\sqrt{3}v_n} = \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}; \quad \xi_e = \frac{\varepsilon_e}{t}; \\ \sigma_e &= A \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^{m+n} t^{-n} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Здесь время прохождения точки по угловой поверхности:

$$t = \frac{\alpha}{v_n} \left( r_y + \frac{\delta_0}{2} \right) = \frac{\alpha \left( r_y + \frac{\delta_0}{2} \right)}{\eta v_0 \cos \frac{\alpha}{2}} \quad (10)$$

Мощность, используя выражения (9), (10), запишем в следующем виде:

$$N_{\text{изз.}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_e v_\tau S = A \pi (r_2^2 - r_1^2) \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^{1+m+n} \left[ \alpha \left( r_y + \frac{\delta_0}{2} \right) \right]^{-n} \left( \eta v_0 \cos \frac{\alpha}{2} \right)^{1+n} \quad (11)$$

Сила вытяжки на первой (верхней) матрице определяется условием баланса мощностей (7) и (11) [3], т.е.

$$F_1 \leq \frac{1}{v_0} [N_{\text{фл.}} \sin \nu + N_{\text{изз.}}] (1 + \mu \alpha), \quad (12)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения.

На второй (нижней) матрице происходит утонение стенки полуфабриката. При небольших относительных степенях утонения схема деформаций принимается плоской. Кинематику деформирования установим с помощью разрывного поля скоростей перемещений, приведенного на схеме процесса. Поле состоит из жестких блоков «0», «1», «2», ограниченных линиями разрыва скоростей «01», «12» и контактной границей конуса матрицы. Углы поля связаны зависимостью:

$$\eta = \frac{\sin \beta \sin(\gamma + \varphi)}{\sin \gamma \sin(\beta + \varphi)}, \quad (13)$$

где  $\varphi$  – угол конуса матрицы. Длины линий разрыва скоростей находим по формулам:

$$l_{01} = \frac{r_3 - r_1}{\sin \beta}; \quad l_{12} = \frac{r_2 - r_1}{\sin \gamma} \quad (14)$$

Используя годограф скоростей (рис. 1, в), запишем скорости блоков:

$$\left. \begin{aligned} v_0, \quad v_1 &= \frac{v_0 \sin \beta}{\sin(\beta + \varphi)} = \frac{\eta v_0 \sin \gamma}{\sin(\gamma + \varphi)}; \\ v_2 &= \frac{r_3^2 - r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} v_0 = \eta v_0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

На линии «01» имеем:

$$v_{\tau 01} = \frac{v_0 \sin \varphi}{\sin(\beta + \varphi)}; \quad v_{n 01} = v_0 \sin \beta \quad (16)$$

– касательная и нормальная скорости.

Эквивалентные деформация, скорость деформаций и напряжение вычисляем по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{e 01} &= \frac{v_{\tau 01}}{\sqrt{3}v_{n 01}} = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3} \sin \beta \sin(\beta + \varphi)}; \\ \xi_{e 01} &= \frac{\varepsilon_{e 01}}{t_1}; \quad \sigma_e = A \varepsilon_{e 01}^{m+n} t^{-n} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Здесь

$$t_1 = \frac{l_k}{v_1} = \frac{(r_2 - r_3) \sin(\beta + \varphi)}{v_0 \sin \beta \sin \varphi} \quad (18)$$

– время прохождения точки по блоку «1»;  $l_k$  – длина контактной линии конуса матрицы. Аналогичные соотношения получим для линии «12»:

$$v_{\tau 12} = \frac{\eta v_0 \sin \varphi}{\sin(\gamma + \varphi)}; \quad v_{n 12} = \eta v_0 \sin \gamma \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{e 12} &= \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3} \sin \gamma \sin(\gamma + \varphi)}; \quad \xi_{e 12} = \frac{\varepsilon_{e 12}}{t_2}; \\ \sigma_{e 12} &= A \varepsilon_{e 12}^{m+n} t^{-n}, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$$\text{где } t_2 = t_1 = \frac{(r_2 - r_3) \sin(\gamma + \varphi)}{\eta v_0 \sin \gamma \sin \varphi} \quad (21)$$

Мощность на двух линиях разрыва скорости получим, учитывая выражения (16) – (21), в виде

$$\begin{aligned} N_p = N_{01} + N_{12} &= \frac{\pi A v_0^{1+n}}{\sqrt{3}^{1+m+n} (r_2 - r_3)^n} \left[ (r_3^2 - r_1^2) \left( \frac{1}{\sin \beta} \right)^{1+m} \times \right. \\ &\times \left. \left( \frac{\sin \varphi}{\sin(\beta + \varphi)} \right)^{1+m+2n} + \eta^{1+n} (r_2^2 - r_1^2) \left( \frac{1}{\sin \gamma} \right)^{1+m} \left( \frac{\sin \varphi}{\sin(\gamma + \varphi)} \right)^{1+m+2n} \right] \quad (22) \end{aligned}$$

Касательные напряжения трения на конусе и пояске матрицы примем, как

$$\tau_{тр.} = \mu q \sin \varphi, \quad \tau_{тр.} = \mu q,$$

где  $q$  – давление;  $\mu$  – коэффициент трения. Скорости перемещения заготовки соответственно:

$$v_{тр.} = v_1, \quad v_{тр.} = v_0.$$

Мощность трения на этих поверхностях выразим, учитывая принятые соотношения. Таким образом

$$N_{тр.} = \pi \mu q v_0 \left[ (r_2^2 - r_3^2) \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \varphi)} + r_3 h \right], \quad (23)$$

где  $h$  – высота пояски матрицы.

Сила при вытяжке с утонением определяет-

Используя выражения (1) – (5), получим по уравнению энергетической теории [2]:

$$\omega_{фл.} = \frac{A}{A_{пр.}} \int_{r_*}^{r_{кр.}} \frac{1}{v} \sigma_e \xi_e dr = \frac{A k^{m+n}}{A_{пр.}} (\eta v_0)^n r_*^{nf} \int_{r_*}^{r_{кр.}} \left( \frac{1}{r} \right)^{1+n(1+f)} \left( \ln \frac{r}{r_*} \right)^m dr. \quad (25)$$

При изгибе на угловой поверхности верхней матрицы с учетом выражений (9), (10)

$$\omega_{изг.} = \frac{A}{A_{пр.}} \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^{1+m+n} \left[ \frac{\eta v_0 \cdot \cos \frac{\alpha}{2}}{\alpha \left( r_y + \frac{\delta_0}{2} \right)} \right]^n. \quad (26)$$

На линиях разрыва скоростей при утонении стенки полуфабриката

$$\omega_{ут.} = \frac{A}{A_{пр.}} \left[ \left( \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3} \sin \beta \cdot \sin(\beta + \varphi)} \right)^{1+m+n} + \left( \frac{\sin \gamma}{\sqrt{3} \sin \gamma \cdot \sin(\gamma + \varphi)} \right)^{1+m+n} \right] \times \left[ \frac{v_0 \cdot \sin \beta \cdot \sin \varphi}{(r_2 - r_3) \cdot \sin(\beta + \varphi)} \right]^n. \quad (27)$$

По уравнению деформационной теории прочности [2] имеем, учитывая выражения (4), (9), (17), (20) следующее:

$$\omega_{фл.} = \frac{k}{\varepsilon_{enn.}} \ln \frac{r_{кр.}}{r_*}; \quad (28)$$

$$\omega_{изг.} = \frac{2}{\sqrt{3} \varepsilon_{енр.}} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}; \quad (29)$$

$$\omega_{ут.} = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3} \varepsilon_{enn.}} \left[ \frac{1}{\sin \beta \cdot \sin(\beta + \varphi)} + \frac{1}{\sin \gamma \sin(\gamma + \varphi)} \right]. \quad (30)$$

### Расчетные данные

Расчеты выполнены для вытяжки заготовок из сплавов АМГ6 и ВТ6С при температуре обработки 450 и 930 °С, соответственно, в условиях нелинейно вязкого течения [2] при следующих геометрических параметрах:  $\delta_0 = 2$  мм;  $\delta_1/\delta_0 = 0,8$ ;  $r_1 = 25$  мм;  $r_1/r_0 = 0,7$ ;  $\alpha = \varphi = 18^\circ$ ;  $\mu = 0,1$  (рис. 2).

ся выражением

$$F_2 = \pi(r_2^2 - r_3^2) q \leq \frac{1}{v_0} (N_p + N_{тр.}). \quad (24)$$

При подстановке соотношений (22), (23) выражение (24) минимизируется по « $\beta$ » с учетом связи (13). Сила вытяжки при установившемся процессе определяется суммой выражений (12) и (24).

### Повреждаемость материала

Повреждаемость материала заготовки в процессе вытяжки рассчитаем как сумму по областям деформирования, т.е.

$$\omega = \omega_{фл.} + \omega_{изг.} + \omega_{ут.}$$

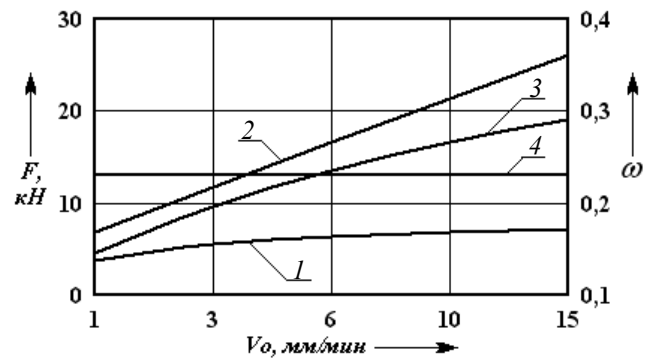


Рис. 2. Графики давления  $q$  ( $v_0$ ) и повреждаемости  $\omega(v_0)$ :

1, 3 – для сплава АМГ6; 2, 4 – для сплава ВТ6С

Установлено, что сила вытяжки существенно зависит от скорости деформирования: снижение скорости операции от 15 до 1,0 мм/мин приводит к уменьшению силы в 1,9 раз для сплава АМГ6 и в 3,8 раза для сплава ВТ6С. При этом конечная повреждаемость сплава АМГ6, подчиняющегося энергетиче-

ской теории, снижается в 2 раза. Повреждаемость сплава ВТ6С, поведение которого описывается деформационной теорией, не зависит от скорости операции.

Примеры полуфабрикатов с толстым дном и тонкой стенкой, полученных вытяжкой, приведены на рис. 3.

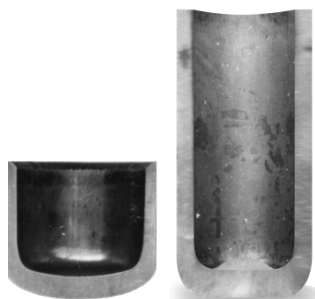


Рис. 3. Детали с толстым дном и тонкой стенкой

Отметим, что схема последовательной вытяжки увеличивает длительность процесса. С другой стороны, это способствует меньшей потере сплошности материала, чем при комбинированной вытяжке.

#### Выводы:

1. Технологические режимы последовательно-совмещенной вытяжки заготовок в режиме вязко-пластичности существенно зависят от скорости (длительности) деформирования в связи с развитием деформаций ползучести.

2. Снижение скорости операции приводит к снижению силы (давления) и повреждаемости

материала, подчиняющегося энергетическому критерию разрушения. Для материалов, разрушение которых описывается деформационным критерием, повреждаемость зависит только от степени формоизменения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.

2. Яковлев, С.С. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / С.С. Яковлев, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, В.И. Трегубов, А.В. Чернышев: монография / под ред. С.С. Яковлева. – М.: Машиностроение, 2009. – 412 с.

3. Гун, Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением (теория пластичности): учеб. для вузов / Г.Я. Гун; под ред. П.И. Полухина. – М.: Metallurgy, 1980. – 456 с.

#### REFERENCES

1. Popov, E.A. *Fundamentals of Sheet Stamping Theory*. – M.: Mechanical Engineering, 1977. – pp. 278.

2. Yakovlev, S.S. *Anisotropic Material Isothermal Forming with Rigid Tool in Short-Term Creep Mode* / S.S. Yakovlev, S.P. Yakovlev, V.N. Chudin, V.I. Tregubov, A.V. Chernyayev: monograph // under the editorship of S.S. Yakovlev. – M.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 412.

3. Gun, G.Ya. *Theoretical Fundamentals of Metal Forming (Theory of Plasticity)*: college manual / G.Ya. Gun; under the editorship of P.I. Polukhin. – M.: Metallurgy, 1980. – pp. 456.

Рецензент д.т.н. В.А. Дёмин

### Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: [naukatm@yandex.ru](mailto:naukatm@yandex.ru)