

Научная статья  
УДК 621.983.3.539.376  
doi:10.30987/2223-4608-2022-2-22-25

## **Технологические режимы вытяжки анизотропного релаксирующего материала**

**Валерий Иванович Платонов**<sup>1</sup>, к.т.н., **Андрей Александрович Пасынков**<sup>2</sup>, к.т.н.,  
**Владимир Николаевич Чудин**<sup>3</sup>, д.т.н.

<sup>1,2</sup> Тульский государственный университет, г. Тула, Россия,

<sup>3</sup> Российский государственный университет транспорта «МИИТ», г. Москва, Россия  
<sup>1,2,3</sup>mpf-tula@rambler.ru

**Аннотация.** Предложены аналитические соотношения для расчета деформаций, напряжений и силы при вытяжке с нагревом листовой заготовки. Материал принят анизотропным, релаксирующим при вязко-пластическом деформировании. Установлены деформации и напряжения в плоской части фланца и в области изгиба заготовки на угловой поверхности матрицы. Используются уравнение состояния ползучести, уравнение равновесия и условия текучести для анизотропного материала. Рассмотрена кинематика повреждаемости материала. Приведены расчетные результаты.

**Ключевые слова:** вязкопластичность, релаксация, деформации, напряжения, скорость, сплошность материала

**Благодарности:** материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту НШ-2601.2020.8.

**Для цитирования:** Платонов В.И., Пасынков А.А., Чудин В.Н. Технологические режимы вытяжки анизотропного релаксирующего материала // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №2 (128). – С. 22-25.  
doi:10.30987/2223-4608-2022-2-22-25.

Original article

## **Technological modes of anisotropic relaxing material drawing**

**Valery I. Platonov**<sup>1</sup>, Can. Sn. Tech., **Andrey A. Pasyнков**<sup>2</sup>, Can. Sn. Tech.,  
**Vladimir N. Chudin**<sup>3</sup>, Dr. Sn. Tech.

<sup>1,2</sup>Tula State University, Tula, Russia,

<sup>3</sup>Russian State University of Transport "MIIT", Moscow, Russia  
<sup>1,2,3</sup>mpf-tula@rambler.ru

**Annotation.** Analytical relations for the calculation of deformations, strains and forces in the process of drawing with reheating of parent sheet of material are proposed. The material on a trial basis is anisotropic, relaxing under visco-plastic deformation. Deformations and strains are determined in the flattened portion of the flange and in the bending area of the workpiece on the angular surface of the matrix. Creep flow state equation, equilibrium equation and yield conditions for anisotropic material are used. The kinematics of material damaging has been viewed. The calculated results have been given.

**Keywords:** viscoplasticity, relaxation, deformations, strains, rapidity, continuity of material

**Acknowledgements:** the material was prepared within the framework of scientific research on the project NSH- 2601.2020.8.

**For citation:** Platonov V.I., Pasyнков A.A., Chudin V.N. Technological modes of anisotropic relaxing material drawing / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, No.2 (128), pp. 22-25.  
doi:10.30987/2223-4608-2022-2-22-25.

### Введение

Процессы вытяжки изделий из листовых высокопрочных материалов производят с локальным нагревом фланцевой части заготовок. При этом на режимы вытяжки существенно влияют температурно-скоростные условия обработки, так как деформируемый материал проявляет вязкие свойства [1, 2] (релаксирует). Технологическая подготовка производства изделий вытяжкой включает расчеты деформационных и силовых режимов процесса. Получим необходимые для расчета соотношения, используя аналитические методы теории обработки давлением анизотропного материала [3].

### Материалы и методы

Схема вытяжки без утонения стенки изделия показана на рис. 1.

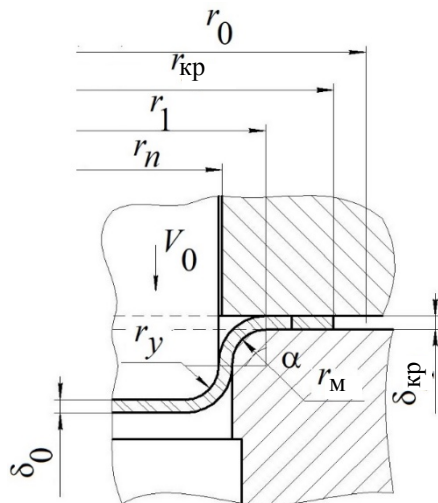


Рис. 1. Схема вытяжки

Имеются зона деформаций плоского фланца ( $r_0 \geq r \geq r_1$ ) и зона деформаций изгиба ( $r_1 \geq r \geq r_n$ ) на входе в матрицу. Во фланце деформационный режим при плоской схеме напряжений в условиях радиального течения выражается соотношениями:

$$\xi_r = \frac{\partial v_r}{\partial r}; \xi_\varphi = \frac{v_r}{r}; \xi_\delta = -\xi_r - \xi_\varphi. \quad (1)$$

При использовании выражений (1) эквивалентные скорость деформаций и деформации получим в виде:

$$\xi_e = k v_0 r_1^f r^{-1-f}; \quad (2)$$

$$\varepsilon_e = \int \xi_e \frac{dr}{v_r} = k \ln \frac{r}{r_1}. \quad (3)$$

где  $\xi_r, \xi_\varphi, \xi_\delta$  – компоненты скоростей деформаций по радиальному, окружному направле-

ниям и по толщине фланца;  $r_1$  – внутренний радиус плоской части фланца;  $r$  – произвольная точка плоского фланца;  $r_n$  – радиус пунсона;  $v_0$  – скорость вытяжки;

$$v_r = -v_0 \left( \frac{r_1}{r} \right)^f - \quad (4)$$

– радиальная скорость точек фланца;

$$k = \frac{2}{\sqrt{3}} (1 - f + f^2)^{1/2}; \quad f = \frac{R}{1 + R}; \quad R - \text{коэффициент анизотропии материала заготовки.}$$

Для изотропного материала  $R = 1, k = 1,$

$f = 1/2.$

### Результаты

Силовой режим вытяжки определяется величинами напряжений в материале заготовки. Для расчета напряжений во фланце запишем приближенное уравнение равновесия и линейное условие текучести анизотропного (трансверсально-изотропного) материала при плоском напряженном состоянии [3, 4]:

$$\left. \begin{aligned} r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\varphi &= 0; \\ \sigma_r - \sigma_\varphi &= \gamma_1 \sigma_e, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $\sigma_r, \sigma_\varphi$  – напряжения радиальные и окружные;

$$\sigma_e = A \left( \int d\varepsilon_e \right)^m \xi_e^n - \quad (6)$$

– эквивалентное напряжение при вязкопластичности [1];  $A, m, n$  – константы материала;

$$\gamma_1 = \frac{2}{\sqrt{2}} \left( \frac{1 + R}{\mu_\sigma^2 + 2R + 1} \right)^{1/2}; \quad \mu_\sigma = 0,55.$$

Для изотропного материала  $\gamma_1 = 2/\sqrt{3}.$

Уравнение (6) отображает состояние вязкопластичности деформируемого с нагревом материала, когда деформационное упрочнение сопровождается разупрочнением (релаксация напряжений), и оно тем больше, чем меньше скорость деформирования.

Система (6) сводится к уравнению:

$$d\sigma_r = -\gamma_1 \frac{\sigma_e}{r} dr. \quad (7)$$

Считая, что деформационное упрочнение определяется перемещением края фланца, запишем, учитывая выражения (2), (3) и уравнение (6):

$$\sigma_e = A k^{m+n} v_0^n r_1^{nf} \left( \ln \frac{r_0}{r_{кр}} \right)^m r^{-n(1+f)} = A K v_0^n r^{-n(1+f)}, \quad (8)$$

где  $K = k^{m+n} r_1^{nf} \left( \ln \frac{r_0}{r_{кр}} \right)^m$ ;  $r_0, r_{кр}$  – начальный и

текущий радиусы края фланца заготовки.

Воспользуемся условием для меридионального напряжения на крае фланца [3, 4]:

$$(\sigma_r)_{кр} = \frac{\mu Q}{\pi r_{кр} \delta_{кр}}, \text{ где } \delta_{кр} = \delta_0 \left( \frac{r_0}{r_{кр}} \right)^{\frac{1}{1+R}}; \quad (9)$$

где  $\delta_0, \delta_{кр}$  – толщины заготовки и края фланца при вытяжке;  $Q$  – давление прижима;  $\mu$  – коэффициент трения.

Подстановка выражения (8) в уравнение (7) при граничном условии (9) приводит к решению для напряжений в плоской части фланца, то есть:

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_r)_{фл} &= (\sigma_r)_{кр} + \frac{\gamma_1 A K V_0^n r_{кр}^{-n(1+f)}}{n(1+f)} \left[ \left( \frac{r_{кр}}{r} \right)^{n(1+f)} - 1 \right]; \\ (\sigma_\varphi)_{фл} &= (\sigma_r)_{фл} - \gamma_1 A K V_0^n r^{-n(1+f)}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

При изгибе заготовки на угловой поверхности матрицы примем схему осесимметричной деформации при плоском напряженном состоянии. Так как  $R = \varepsilon_\varphi / \varepsilon_\delta$ , то по условию несжимаемости деформации меридиональную,

окружную и по толщине запишем в виде:

$$\varepsilon_r = \ln \frac{r_1}{r_n}; \quad \varepsilon_\varphi = -\frac{R}{1+R} \varepsilon_r; \quad \varepsilon_\delta = -\frac{1}{1+R} \varepsilon_r. \quad (11)$$

Напряжения при этом:

$$(\sigma_r)_{угл} \neq 0; \quad (\sigma_\varphi)_{угл} \neq 0; \quad (\sigma_\delta)_{угл} = 0.$$

Эквивалентные деформация, скорость деформаций и напряжение выражаются здесь соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_e &= \lambda \ln \frac{r_1}{r_n}; \quad \xi_e = \frac{\lambda v_0}{\alpha r_m} \ln \frac{r_1}{r_n}; \\ \sigma_e &= A \left( \frac{v_0}{\alpha r_m} \right)^n \left( \lambda \ln \frac{r_1}{r_n} \right)^{m+n}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\text{где } \lambda = \left[ \frac{1+4R(1+R)}{3(2+R)} \right]^{1/2}.$$

Для изотропного материала  $\lambda = 1$ .

Интегрированием уравнения (7) в пределах  $r_1 - r_n$  и  $(\sigma_r)_{фл} - (\sigma_r)_{угл}$  с учетом трения получим полное меридиональное напряжение в угловой части заготовки:

$$(\sigma_r)_\Sigma = \left[ (\sigma_{r=r_1})_{фл} + \gamma_1 A \left( \frac{v_0}{\alpha r_m} \right)^n \left( \ln \frac{r_1}{r_n} \right)^{1+m+n} \right] (1 + \mu \alpha), \quad (13)$$

где  $(\sigma_{r=r_1})_{фл}$  – меридиональное напряжение (10) при  $r = r_1$ ;  $\sigma_e$  – эквивалентное напряжение (12).

Сила вытяжки при этом:

$$F = 2\pi \delta_0 \left( \frac{\delta_0}{2} + r_n \right) (\sigma_r)_\Sigma, \quad (14)$$

где  $r_n$  – радиус поперечного сечения вытяжного пуансона.

Максимум напряжения и силы достигается при начальном полном охвате заготовкой вытяжкой радиальной поверхности матрицы [4].

Сплошность деформируемого материала рассчитаем при входе полуфабриката в вытяжной цилиндрический поясок матрицы, т.е. при максимальной силе вытяжки. Считаем, что здесь материал находится в состоянии осевого растяжения и получил деформацию:

$$\varepsilon_e = k \ln \frac{r_0}{r_{кр}} + \lambda \ln \frac{r_1}{r_n} = \ln \left[ \left( \frac{r_0}{r_{кр}} \right)^k \left( \frac{r_1}{r_n} \right)^\lambda \right]. \quad (15)$$

При осевом растяжении эквивалентное напряжение:

$$\sigma_e = \gamma_2 (\sigma_r)_\Sigma, \quad (16)$$

где  $\gamma_2 = \left( \frac{3}{2+R} \right)^{1/2}$ ;  $(\sigma_r)_\Sigma$  – напряжение (13).

По энергетическому уравнению кинетики повреждаемости [1, 2] запишем, используя выражения (15):

$$\psi = 1 - \frac{1}{A_{пр}} \int \sigma_e d\varepsilon_e = 1 - \frac{\gamma_2}{A_{пр}} (\sigma_r)_\Sigma \varepsilon_e. \quad (17)$$

По деформационному уравнению:

$$\psi = 1 - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{епр}}. \quad (18)$$

В данных уравнениях  $A_{пр}, \varepsilon_{епр}$  предельные константы разрушения материала.

Условие  $\psi = 0$  соответствует полной потере сплошности и возможному разрушению материала.

### Обсуждение

Расчеты выполнены для вытяжки титанового сплава ВТ14 при 850 °С. Константы материала  $A = 70 \text{ МПа} \cdot \text{с}^n$ ;  $m = 0,1$ ;  $n = 0,025$ . Приняты размеры:  $r_0 = 100 \text{ мм}$ ;  $r_n = 60 \text{ мм}$ ;  $r_1 = 66 \text{ мм}$ ;  $r_{кр} = 93 \text{ мм}$ ;  $\delta_0 = 2 \text{ мм}$ ;  $r_m = 6 \text{ мм}$ ;  $r_y = 3 \text{ мм}$ ;  $\mu = 0,15$  для материалов с коэффициентами анизотропии  $R = 0,7$  и  $R = 1$ .

Деформации заготовок (15) при входе на цилиндрический поясok матриц составили соответственно  $\varepsilon_e = 0,171$  и  $\varepsilon_e = 0,154$ . Предельная эквивалентная деформация  $\varepsilon_{em} = 0,47$ . Графики максимальной силы  $F(v_0)$  и сплошности  $\psi(v_0)$  рассчитаны при  $r_0/r_{кр} = 1,1$  и  $\alpha = \pi/2$  (рис. 2) в зависимости от скорости вытяжки.

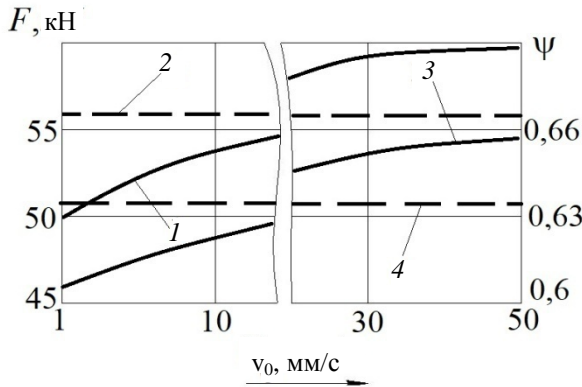


Рис. 2. Графики силы вытяжки  $F(v_0)$  и сплошности  $\psi(v_0)$  материала:

1, 2 –  $F, \psi$  соответственно при  $R = 0,7$ ; 3, 4 – то же при  $R = 1$

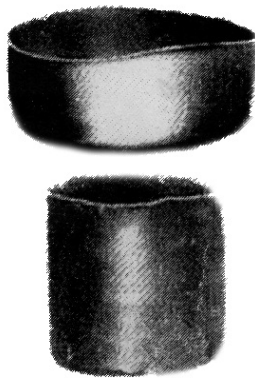


Рис. 3. Образцы вытянутых изделий

Графики показывают, что сила уменьшается при уменьшении скорости. При этом постоянна потеря сплошности материала заготовки, зависящая от степени формоизменения и анизотропии механических свойств материала.

Конечная сплошность материалов  $\psi > 0,5$ , что обеспечивает качество изделия. Отметим, что в работе [5] рассмотрена технология со-

вмещённой вытяжки-протяжки. На рис. 3 представлены образцы вытянутых изделий.

### Выводы

1. Сила вытяжки с нагревом уменьшается при уменьшении скорости (времени) операции.

2. Потеря сплошности деформируемого материала зависит от температурно-скоростных условий. Для ряда материалов существенно влияние скорости. Для других материалов такого влияния нет.

3. Увеличение коэффициента анизотропии механических свойств материала также способствует снижению силы вытяжки при незначительном увеличении потери сплошности материала заготовки.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Малинин, Н.Н.** Ползучесть в обработке металлов. – М.: Машиностроение, 1986. – 216 с.
2. **Изотермическое** деформирование высокопрочных анизотропных материалов / Яковлев С.С. и др. М.: Машиностроение. – 2009. – 427 с.
3. **Яковлев, С.П., Яковлев, С.С., Андрейченко, В.А.** Обработка давлением анизотропных материалов. – Кишинев: Квант, 1997. – 331 с.
4. **Попов, Е.А.** Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
5. **Черняев, А.В., Чудин, В.Н., Тесаков, Д.М.** Последовательно-совмещенная вытяжка заготовки при вязкопластическом деформировании // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2019. – №1 (91). – С. 3-7.

### REFERENCES

1. Malinin, N.N. Creep in Metal Processing. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 216 p.
2. Isothermal deformation of high-endurance anisotropic materials / Yakovlev S.S. et al. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 427 p.
3. Yakovlev, S.P., Yakovlev, S.S., Andreichenko, V.A., Pressure Treatment of Anisotropic Materials, Chisinau: Kvant, 1997, 331 p.
4. Popov, E.A. Fundamentals of sheet stamping theory, Moscow: Mechanical Engineering, 1977, 278 p.
5. Chernyaev, A.V., Chudin, V.N., Tesakov, D.M. Serial-aligned blank drawing at visco-plastic deformation / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2019, No.1 (91), pp. 3-7.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.10.2021; одобрена после рецензирования 20.10.2021; принята к публикации 01.12.2021.

The article was submitted 05.10.2021; approved after reviewing 20.10.2021; accepted for publication 01.12.2021.