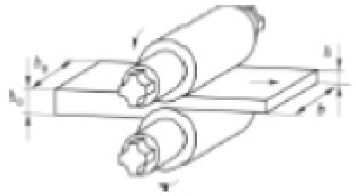
Технология и оборудование обработки металлов давлением



Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2025. №11 (173). С. 18-23.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №11 (173). P. 18-23.

Научная статья
УДК 621.983.3.539.376
doi: 10.30987/2223-4608-2025-11-18-23

Листовая вытяжка с нагревом ортотропного релаксирующего материала

Владимир Николаевич Чудин[1], д.т.н.
Валерий Иванович Платонов[2], к.т.н.
[1] *Российский университет транспорта «МИИТ», Москва, Россия*
[2] *Тульский государственный университет, Тула, Россия*
[1] vladimir-chudin@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0000-0000-0000
[2] pvi_1@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-2632-1481

Аннотация. *Предложены соотношения для расчета силового и деформационного режимов при вытяжке с нагревом. Материал заготовки принят ортотропным, т.е. имеющим анизотропию механических свойств по осям координат. Для листового материала существенна анизотропия в плоскости листа (плоскостная анизотропия) по направлению проката, под углом к нему и по толщине листа. В этих направлениях при вытяжке происходит радиальное течение материала листовой заготовки. Анизотропия приводит к неравномерности распределения напряжений, разнотолщинности стенки изделия, образованию краевых фестонов. При вытяжке с нагревом на гидропрессовом оборудовании материал проявляет вязкие свойства и при заданной степени формообразования происходит деформационное упрочнение и разупрочнение материала заготовки. Разупрочнение вызвано релаксацией напряжений, которая тем больше, чем меньше скорость процесса. Этот фактор приводит к уменьшению внутренних напряжений, силе вытяжки, повреждаемости деформируемого материала, возможному увеличению степени формообразования. Полученные аналитические зависимости с учетом анизотропии и релаксации позволяют рассчитать оптимальный технологический режим вытяжки. Напряжения и силовой режим рассчитаны на основе уравнения равновесия и условия текучести анизотропного материала по направлениям радиального течения. Предложен расчет контура заготовки для вытяжки без фестонов. Получено соотношение для расчета сплошности деформируемого материала. При этом использованы энергетические и деформационные уравнения повреждаемости с учетом скорости вытяжки. Выполнены расчеты режимов технологии вытяжки. Выполнены расчеты режимов технологии вытяжки на примере титанового сплава ВТ14. Показано, что применение фигурной заготовки для вытяжки обеспечивает снижение радиальных напряжений, силы операции и равномерность толщины края изделия.*

Ключевые слова: анизотропия, вязкопластичность, кинематика, напряжения, скорость, сплошность

Для цитирования: Чудин В.Н., Платонов В.И. Листовая вытяжка с нагревом ортотропного релаксирующего материала // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 11 (173). С. 18–23 doi: 10.30987/2223-4608-2025-11-18-23

Sheet drawing-out combined with orthotropic relaxing material heating

Vladimir N. Chudin[1], D. Eng.
Valery I. Platonov[2], PhD. Eng.
[1] *Russian University of Transport «MIIT», Moscow, Russia*
[2] *Tula State University, Tula, Russia*
[1] vladimir-chudin@yandex.ru
[2] pvi_1@rambler.ru

Abstract. *Correlations for the calculation of force and deformation modes during sheet drawing-out under heating are proposed. Work material is assumed to be orthotropic, i.e. having anisotropy of mechanical properties along the coordinate axes. In-plane anisotropy of the sheet (planar anisotropy) is significant in case of sheet material in the direction of the rolled stock, angle-wise and along the gage. In these directions, the radial flow of the sheet blank material occurs during drawing-out operation. Anisotropy contributes to uneven stress distribution, gage variation within a sidewall, and edge ear formation. When drawn with heating on a hydraulic ram equipment, the material exhibits viscous properties and, at a given degree of shaping, deformation hardening and softening of the work material occur. Such softening is caused by stress relaxation, which is greater the lower the speed of the process. This factor leads to a decrease in internal stresses, drawing force, tends to the damage of the deformable material, and a possible increase in the degree of shaping. The obtained analytical dependences, taking into account anisotropy and relaxation, make it possible to calculate the optimal technological mode for drawing-out operation. The stresses and force conditions are calculated on the basis of the equilibrium equation and the flow conditions of the anisotropic material in the directions of radial flow. The calculation of the blank shape for earless drawing-out is proposed. The ratio for calculating the continuity of the deformable material is obtained. In this case, the energy and deformation equations with fault probability formulas are used, taking into account of the drawing-out speed. Calculations of drawing-out technology modes have been performed. Calculations of extraction technology modes are made using the example of titanium alloy VT14. It is shown that the use of a shaped billet for drawing provides a reduction in radial stresses, the force of the operation and the uniformity of the edge gage of the product.*

Keywords: anisotropy, viscoplasticity, kinematics, stresses, velocity, continuity

For citation: Chudin V.N., Platonov V.I. Sheet drawing-out combined with orthotropic relaxing material heating / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 11 (173). P. 18–23. doi: 10.30987/2223-4608-2025-11-18-23

Введение

Процессы вытяжки изделий с нагревом заготовки применяют в листоштамповочном производстве при обработке высокопрочных материалов [1, 2]. Листовые материалы, имеющие текстуру прокатки, анизотропны в плоскости листа [3]. Их механические характеристики вдоль проката и под углом к ней различны, и различны, следовательно, коэффициенты анизотропии, определяющие эти характеристики. Кроме того, горячий материал при медленном деформировании на гидропрессовом оборудовании проявляет свойства вязкопластичности: деформационно упрочняется и одновременно разупрочняется вследствии релаксации внутренних напряжений. Названные факторы значительно влияют на режим вытяжки, что необходимо учитывать при разработке техпроцесса.

Схема вытяжки приведена на рис. 1. Состояние материала заготовки выражается уравнением вязкопластичности [4, 5]

$$\sigma_e = A\varepsilon_e{}^m \xi_e^n, \qquad (1)$$

где σ_e, ε_e, ξ_e − эквивалентные напряжение, деформация и скорость деформаций; A, m, n − константы горячего материала.

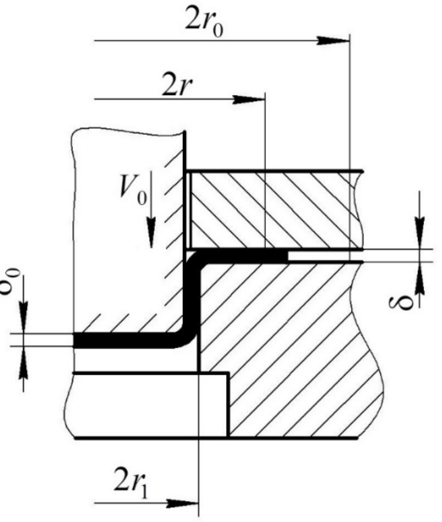


Рис. 1. Схема вытяжки

Fig. 1. Drawing out outline

Уравнение (1) учитывает деформационное упрочнение и разупрочнение в связи с релаксацией напряжений, зависящей от скорости. При плоском напряженном состоянии листового анизотропного материала эквивалентные деформация и ее скорость выражаются соотношениями

$$\varepsilon_e = \lambda \ln\frac{r}{r_1};\ \xi_e = \frac{d\varepsilon_e}{dt} = \frac{\lambda}{r}\mathrm{v}_r. \qquad (2)$$

Скорость перемещения точек фланца [3]:

$$|\mathrm{v}_r| = \mathrm{v}_0 \left(\frac{r_1}{r}\right)^f; \tag{3}$$

$$\lambda = \left[2(2+R_\alpha)/3(1+R_\alpha)\right]^{\frac{1}{2}};\ f = \frac{R_\alpha}{1+R_\alpha},$$

где R_α – коэффициент анизотропии вдоль и поперек проката листа ($\alpha = 0{,}90°$) и под углом к ней ($\alpha = 45\ °$); v_0 – скорость вытяжки; r_1, r – радиусы изделия и точек фланца заготовки; t – время. Для трансверсально-изотропного материала $R_\alpha = R_{cp} = (R_0 + R_{90} + R_{45})/3$; для изотропного $R_\alpha = 1$.

Так как

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} = \frac{r}{dr}\frac{d\delta}{\delta} = f - 1, \tag{4}$$

то интегрированием этого соотношения получим

$$\delta = \delta_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{f-1}, \tag{5}$$

где δ – текущая толщина в точках фланца по направлениям R_α; δ_0 – исходная толщина листовой заготовки.

По названным выше направлениям коэффициентов анизотропии происходит радиальное течение материала, где радиальные и окружные напряжения являются главными. Запишем уравнение равновесия и линейное условие текучести анизотропного материала [3, 4], учитывая сказанное. Таким образом

$$r\frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\varphi = 0; \tag{6}$$

$$\sigma_r - \sigma_\varphi = \gamma\sigma_e, \tag{7}$$

где σ_r, σ_φ – напряжения радиальные и окружные; σ_e – эквивалентное напряжение;

$$\gamma = \frac{2}{\sqrt{2}}\left(\frac{1+R_\alpha}{1+2R_\alpha+\mu_\sigma^2}\right)^{\frac{1}{2}};\ \mu_\sigma = -\frac{\sigma_r+\sigma_\varphi}{\sigma_r-\sigma_\varphi}.$$

Эквивалентное напряжение представим в соответствии с уравнением состояния при вязко-пластичности, используя уравнение (1) и выражение (2), в виде

$$\sigma_e = A\lambda^{m+n}\left(ln\frac{r}{r_1}\right)^m \cdot \left(\frac{1}{r}\mathrm{v}_r\right)^n, \tag{8}$$

Совместное решение выражений (6), (7) при учете соотношения (8) приводит к зависимостям

$$\left.\begin{aligned} \sigma_r &= \gamma\lambda^{m+n} \cdot Ar_1^{nf} \cdot \mathrm{v}_0^n \int_r^{r_0}\left(\frac{1}{r}\right)^{1+n(1+f)} \cdot \left(ln\frac{r}{r_1}\right)^m dr; \\ \sigma_\varphi &= \sigma_r - \gamma\sigma_e. \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

Интеграл упрощается при разложении входящей функции [6]. Соотношения (9) можно уточнить внесением напряжения трения заготовки между прижимом и матрицей $\sigma_{тр} = 2\mu q_{пр}$, где $q_{пр}$ – давление прижима; μ – коэффициент трения. Суммарные напряжения в соответствии с этим получат вид

$$\left.\begin{aligned} (\sigma_r)_\Sigma &= \sigma_r + \sigma_{тр}; \\ (\sigma_\varphi)_\Sigma &= (\sigma_r)_\Sigma - \gamma\sigma_e. \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

Расчет напряжений производится при R_0 (по текстуре проката) и R_{45} (под углом 45 ° к текстуре) с изменением параметров λ, f, γ.

Распределение радиальных напряжений вдоль вытяжной кромки матрицы можно задать уравнением

$$(\sigma_r)_\alpha = \frac{1}{2}\left[(\sigma_{r\max} + \sigma_{r\min}) + (\sigma_{r\max} - \sigma_{r\min})\cos 4\alpha\right]. \tag{11}$$

Максимальная сила вытяжки определяется при учете выражения (11) зависимостью

$$F_{max} = 8r_1\delta_0 \int_0^{\frac{\pi}{4}} (\sigma_r)_\alpha \cdot d\alpha\,; \qquad (12)$$

для материала с плоскостной анизотропией и

$$F_{max} = 2r_1\delta_0(\sigma_r)_\Sigma \qquad (13)$$

для трансверсально-изотропного материала.

По линиям максимального коэффициента анизотропии при вытяжке круглой заготовки образуются фестоны [3]. Фестоны можно устранить применением заготовки, контур которой определяется из условия равенства времени перемещения по линиям коэффициентов R_{max} и R_{min}, т.е.

$$\int_{r_1}^{r_0} \frac{dr}{\mathrm{v}_r} = \int_{r_1}^{r_*} \frac{dr}{\mathrm{v}_r},$$

где r_* – радиус контура по линиям R_{max}.

Из условия равенства времени получим

$$r_* = \left[\frac{1+f_1}{1+f_2} r_1^{f_1 - f_2}\left(r_0^{1+f_2} - r_1^{1+f_2}\right) + r_1^{1+f_1}\right]^{\frac{1}{1+f_1}}, \qquad (14)$$

где $f_1 = \dfrac{R_{max}}{1+R_{max}}$; $f_2 = \dfrac{R_{min}}{1+R_{min}}$.

Точки радиусом r_* по линиям коэффициента R_{max} плавно соединяют с исходным контуром круглой заготовки r_0, образуя контур расчетной заготовки.

При вытяжке материал заготовки теряет исходную сплошность (повреждается). В критическом состоянии возможно разрушение заготовки, которое происходит на выходе из матрицы, т.е. при $r = r_1$. Материал здесь находится в условиях осевого растяжения ($\sigma_r \neq 0$, $\sigma_\varphi = 0$). Разрушение происходит по направлению минимального коэффициента анизотропии R_{min}. Здесь по условию текучести

$$\sigma_e = (\sigma_r)_\Sigma\,. \qquad (15)$$

Сделаем оценку конечной сплошности на основе энергетического уравнения кинетики повреждаемости [2, 4]. Учтем выражения (2), (10), (15) и уравнение для времени перемещения $dt = dr/\mathrm{v}_r$. Получим соотношение

$$\psi = 1 - \frac{1}{A_{np}}\int \sigma_e \xi_e dt = 1 - \frac{\lambda}{A_{np}}\int_{r_1}^{r_0} \frac{1}{r}(\sigma_r)_\Sigma\, dr\,. \qquad (16)$$

Здесь $1 \geq \psi \geq 0$ – сплошность материала заготовки при данной температуре; $A_{пр}$ – предельная удельная работа разрушения. Сплошность, как следует из соотношения (16), зависит от скорости вытяжки. Для деталей специального назначения рекомендуется $\psi \geq 0{,}7$ [7 − 9].

Расчеты выполнены применительно к титановому сплаву ВТ14 при 850 °С [10]. Размеры заготовки: $r_0 = 30$ мм; $r_1 = 18$ мм; $\delta_0 = 1$ мм; $\mu = 0{,}1$. Константы материала приведены в табл. 1.

1. Константы материала

1. Material constants

A, МПа·с^n	m	n	$R_0 = R_{90}$	R_{45}	$R_{ср}$	A, МПа
70	0,1	0,07	0,7	1,2	0,87	$5 \cdot 10^2$

Рассчитаны максимальные суммарные радиальные напряжения при $r = r_1$ по направлениям R_{max} и R_{min} для ортотропного материала и $R = R_{ср}$ для трансверсального изотропного материала в функции скорости вытяжки. Для материала с плоскостной анизотропией ($R_0 \neq R_{45}$) максимум радиальных напряжений на вытяжной кромке матрицы ($r = r_1$) возникает по направлению коэффициента анизотропии $R = R_{\min}$. Здесь же возможна наибольшая потеря сплошности (повреждаемость) материала заготовки, что может привести к его разрушению. Для трансверсально-изотропного материала напряжения, сила вытяжки и повреждаемость материала уменьшаются при увеличении коэффициента анизотропии и снижении скорости операции. Графики напряжений и сплошности приведены на рис. 2.

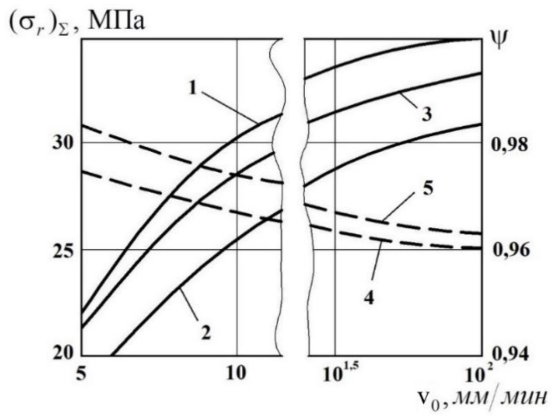


Рис. 2. Графики радиальных напряжений и повреждаемостей материала:

1 – напряжение $(\sigma_r)_\Sigma$ по направлению $R_{\min}$ при $r = r_1$; *2* – то же по направлению $R_{\max}$; *3* – то же при $R = R_{\text{ср}}$; *4* – сплошность при $R = R_{\min}$

Fig. 2. Graphs of radial stresses and material damage:

1 – stress $(\sigma_r)_\Sigma$ in the direction of $R_{\min}$ at $r = r_1$; *2* – the same in the direction of $R_{\max}$; 3 – the same at $R = R_{av}$; *4* – continuity at $R = R_{\min}$

Толщины края изделия составили для ортотропного материала $\delta = 1{,}35$ мм по направлению $R_0 = R_{min}$ и $\delta = 1{,}2$ мм по направлению $R_{45} = R_{\max}$. Для трансверсально-изотропного материала $\delta = 1{,}3$ мм при $R = R_{\text{ср}}$. Рассчитана заготовка для вытяжки изделия без фестонов (рис. 3).

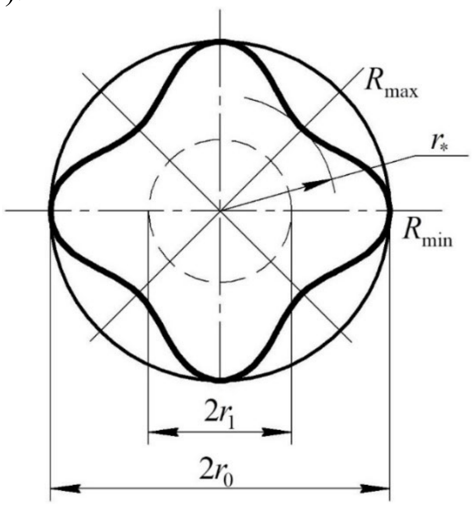
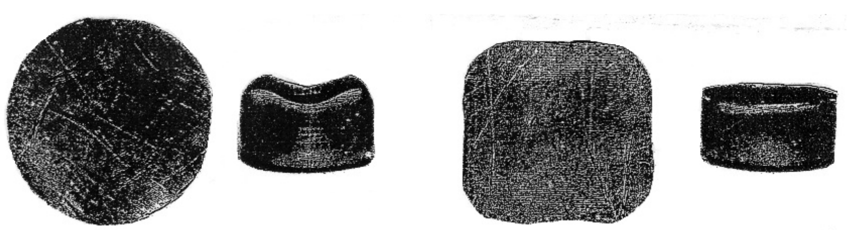


Рис. 3. Профильная заготовка

Fig. 3. Profile blank

Такая заготовка обеспечивает снижение радиальных напряжений, силы вытяжки и равномерность толщины края изделия. Образцы изделий, вытянутых из круглой заготовки и заготовки с расчетным внешним контуром представлены на рис. 4. Расчетные данные соответствуют опытным режимам технологии вытяжки и получили промышленное применение при изготовлении деталей из высокопрочных сплавов [2].



а) *б*)

Рис. 4. Детали, полученные из круглой (*а*) и профильной (*б*) заготовок

Fig. 4. Parts obtained from round (*a*) and profile (*b*) blanks

Выводы

1. Плоскостная анизотропия (ортотропия) механических характеристик приводит при вытяжке листового материала к неравномерности распределения напряжений, что вызывает разнотолщинность стенки изделия и фестонообразование, которое может быть уменьшено использованием исходной листовой заготовки с расчетным внешним контуром.

2. Вытяжка с нагревом на оборудовании сопровождается релаксацией напряжений. Релаксация тем больше, чем меньше скорость вытяжки, что снижает напряжения, силу вытяжки и способствует увеличению степени формообразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ковка** и штамповка: справочник в 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / под ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 732 с.

2. **Яковлев С.П., Чудин В.Н.** Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 2003. 440 с.

3. **Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А.** Обработка давлением анизотропных материалов. Кишинев: Квант, 1997. 330 с.

4. **Голенков В.А., Яковлев С.П.** Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.

5. **Малинин Н.Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Юрайт, 2020. 402 с.

6. **Двайт Г.Б.** Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1973. 228 с.

7. **Колмогоров В.Л.** Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.

8. **Чудин В.Н., Платонов В.И.** Вытяжка с утонением при вязкопластическом деформировании анизотропного материала // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2023. № 2 (145). С. 73–82. DOI: 10.18698/0236-3941-2023-2-73-82.

9. **Платонов В.И., Чудин В.Н.** Комбинированная вытяжка с нагревом в радиальной матрице // Технология машиностроения. 2023. № 11. С. 17−20.

10. **Исаева А.Н., Ларин С.Н., Платонов В.И., Коротков В.А.** Построение расширенной кривой упрочнения при помощи сжатия составных цилиндрических образцов // Черные металлы. 2022. № 3. С. 65−70. DOI: 10.17580/chm.2022.03.12

REFERENCES

1. Forging and Die Forging: Handbook. In 4 Volumes. Vol. 4. Sheet stamping / edited by E.I. Semenov. Moscow: Mashinostroenie, 2010. 732 p.

2. Yakovlev S.P., Chudin V.N. Isothermal deformation of high-strength anisotropic materials. Moscow: Mashinostroenie, 2003. 440 p.

3. Yakovlev S.P., Yakovlev S.S., Andreichenko V.A. Pressure treatment of anisotropic materials. Chisinau: Kvant, 1997. 330 p.

4. Golenkov V.A., Yakovlev S.P. Theory of the metal deformation process. Moscow: Mashinostroenie, 2009. 442 p.

5. Malinin N.N. Applied theory of plasticity and creep. Moscow: Yurait, 2020. 402 p.

6. Dwight G.B. Tables of integrals and other mathematical formulas. Moscow: Nauka Publ., 1973, 228 p.

7. Kolmogorov V.L. Mechanics of metal forming. Moscow: Metallurgiya, 1986. 688 p.

8. Chudin V. N., Platonov V.I. Drawing with thinning under viscoplasticity deformation of the anisotropic material. Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering, 2023, no. 2 (145), pp. 73−82. DOI: 10.18698/0236-3941-2023-2-73-82.

9. Platonov V.I., Chudin V.N. Combined drawing of sheet anisotropic materia with heating in a radial matrix // Technology of mechanical engineering. 2023, no. 11, pp. 17−20.

10. Isaeva A.N., Larin S.N., Platonov V.I., Korotkov V.A. Construction of an extended hardening curve by compression of composite cylindrical specimens // Ferrous Metals. 2022, no. 3, pp. 65−70. DOI: 10.17580/chm.2022.03.12

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 18.03.2025; одобрена после рецензирования 30.05.2025; принята к публикации 30.07.2025.

The article was submitted 18.03.2025; approved after reviewing 30.05.2025; assepted for publication 30.07.2025.