

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. №3 (177). С. 23-27.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. №3 (177). P. 23-27.

Научная статья
УДК 621.774.374.573
doi: 10.30987/2223-4608-2026-3-23-27

Силовой режим горячего формообразования крутоизогнутых патрубков переменного сечения

Валерий Иванович Платонов¹, к.т.н.
Владимир Николаевич Чудин², д.т.н.

¹ Тульский государственный университет, Тула, Россия

² Российский университет транспорта «МИИТ», Москва, Россия

¹ pvi_1@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2632-1481>

² vladimir-chudin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Получены аналитические соотношения для расчета силового режима при изготовлении крутоизогнутых патрубков переменного сечения (газоводов). Формообразование патрубка осуществляется одновременно за счет изгиба и обжима горячей заготовки в разъемной матрице на гидропрессовом оборудовании. При этом деформируемый материал находится в состоянии вязкопластичности и существенна зависимость давления операции от скорости. Давление рассчитано энергетическим методом «верхних границ» в соответствии с экстремальной теоремой пластичности. Метод позволяет рассчитать давление исходя из мощностей внешних и внутренних сил. Мощности определяются с помощью разрывного поля скоростей перемещений. Произведен расчет напряжений из системы, включающей уравнение равновесия в напряжениях и условие текучести анизотропного материала. Определяются напряжения при изгибе и напряжения при обжиме цилиндрической пустотелой оболочки. Данная система приводится к неоднородному уравнению, из решения которого определяются напряжения и, следовательно, силовой режим операции. Выполнен пример расчета давлений формообразования крутоизогнутого патрубка верхнеграницным методом по мощностям и расчет по напряжениям в зависимости от скорости деформирования для заготовки из титанового сплава ВТ14. Приведены графики изменения деформирующих давлений. Установлено, что при изотермическом деформировании происходит релаксация напряжений, увеличивающаяся при малых скоростях операции. Таким образом, силовой режим изготовления патрубка зависит от скорости операции, т.е. при снижении скорости уменьшается внешнее давление гидравлического пресса. Этот фактор позволяет интерпретировать процесс в части достижения высоких степеней формообразования. Представлены образцы газоводных патрубков различных типоразмеров.

Ключевые слова: вязкопластичность, мощность, скорость, напряжения, давление

Для цитирования: Платонов В.И., Чудин В.Н. Силовой режим горячего формообразования крутоизогнутых патрубков переменного сечения // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 3 (177). С. 23–27
doi: 10.30987/2223-4608-2026-3-23-27

Power mode of hot forming for steeply curved fitting pipes of variable cross section

Valery I. Platonov¹, Ph.D Eng.
Vladimir N. Chudin², D. Eng.

¹ Tula State University, Tula, Russia

² Russian University of Transport «MIIT», Moscow, Russia

¹ pvi_1@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2632-1481>

² vladimir-chudin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Abstract. Analytic relationship has been obtained for calculating force conditions in the manufacture of steeply curved fitting pipes of variable cross-section (gas ducts). The pipe is formed simultaneously by bending and crimping a hot stock blanks in a split die on hydro-pressing equipment. In this case, the strain sensitive material is in viscoplastic deformation state when the dependence of the pressure of the operation on the speed is significant. The pressure is calculated using the energy method of "upper limits" in accordance with the extreme plasticity theorem. The method allows calculating the pressure based on the activities of external and internal forces. The latter are determined using a discontinuous velocity diagram. The stresses are calculated from a system that includes both stress equilibrium equation and flow condition of an anisotropic material. Stresses under bending and crimping of a cylindrical hollow shell are determined. This system is reduced to an inhomogeneous equation, from the solution of which the stresses and, consequently, the power mode of the operation is determined. An example of calculating the molding pressures of a steeply curved fitting pipe by the upper boundary method of capacity and stress calculation depending on the deformation rate for a blank made of titanium alloy VT14 is performed. Graphs of changes in deforming forces are given. It has been established that stress relaxation occurs under isothermal deformation, which increases at low operating speeds. Thus, the power mode of the pipe production depends on the speed of the operation, i.e. when the speed decreases, the external pressure of the hydraulic press decreases. This factor allows interpreting the process in terms of achieving high degrees of generation of geometry. Samples of gas fitting pipes of various sizes are presented.

Keywords: viscoplasticity, power, velocity, stresses, pressure

For citation: Platonov V.I., Chudin V.N. Power mode of hot forming for steeply curved fitting pipes of variable cross section / Science intensive technology in mechanical engineering. 2026. № 3 (177). P. 23–27. doi: 10.30987/2223-4608-2026-3-23-27

Введение

Крутоизогнутые патрубки переменного сечения (газоводы) используются в реактивных жидкостных двигателях. Их изготавливают из высокопрочных сплавов методами горячей (изотермической) обработки давлением на гидропрессовом оборудовании. Горячий материал при медленных процессах формообразования проявляет вязкие свойства (ползучесть). Наряду с деформационным упрочнением материала происходит релаксация напряжений. Возникает зависимость давления и степени деформирования от скорости операции. В этой связи принято, что материал заготовки находится в состоянии вязкопластичности [1, 2].

Рассмотрим процесс формообразования газоводного патрубка. Схема процесса изображена на рис. 1. Цилиндрическая пустотелая заготовка (труба) подвергается изгибу и обжиму в разъемной матрице давлением гидропресса с регулируемой скоростью. Соотношения для расчета давления формообразования получим на основе энергетического верхнеграницного метода и метода расчета напряжений [1]. Изгиб и обжим рассмотрим при плоских схемах деформаций и напряжений соответственно.

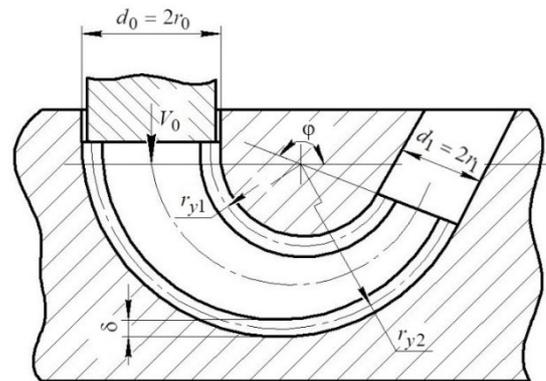


Рис. 1. Расчетная схема формообразования патрубка

Fig. 1. Design scheme of fitting pipe geometry

Верхнеграницный расчет

Рассмотрим стадию изгиба. Выражения для эквивалентных деформаций и скорости деформаций при плоской схеме деформаций запишем в виде [3, 4]

$$\varepsilon_e = \frac{\lambda_1 \delta}{r_y}; \quad \xi = \frac{v_0}{\Delta h}; \quad \varepsilon_e = \frac{\lambda_1 \delta v_0}{r_y \cdot \Delta h}. \quad (1)$$

Эквивалентное напряжение выразим при учете выражений (1) в соответствии с уравнением состояния вязкопластичности [1, 2].

$$\sigma_e = A \varepsilon_e^m \cdot \xi_e^n = A \left(\frac{\lambda_1 \delta}{r_y} \right)^{m+n} \left(\frac{v_0}{\Delta h} \right)^n. \quad (2)$$

В выражениях (1), (2) обозначено: $r_y = r_{y1}$; $r_y = r_{y2}$ – угловые радиусы нейтральных слоев стенок заготовки; δ – толщина стенки изделия; Δh – рабочий ход пресса; v_0 – скорость хода пресса;

$$\lambda_1 = \left[\frac{2(1+R)(2+R)}{3(1+2R)} \right]^{\frac{1}{2}} -$$

коэффициент учета анизотропии при плоской деформации [5]; R – коэффициент анизотропии материала.

Мощность внутренних сил при изгибе представим соотношением

$$N_{\text{изг}} = \sigma_e \xi_e W = A \left[\lambda_1 \delta \left(\frac{1}{r_{y1}} + \frac{1}{r_{y2}} \right) \right]^{1+m+n} \left(\frac{v_0}{\Delta h} \right)^{1+n} \cdot W. \quad (3)$$

Здесь

$$W = \frac{\pi l}{12} [d_0^2 + d_0 d_1 + d_1^2 - (d_0 - 2\delta)^2 - (d_0 - 2\delta)(d_1 - 2\delta) - (d_1 - 2\delta)], \quad (4)$$

где W – объем изделия; l – длина продольной оси; $d_0 = 2r_0$; $d_1 = 2r_1$ – диаметры и радиусы изделия на входе и выходе из области деформаций; φ – угол изгиба изделия.

Рассмотрим стадию обжима. Эквивалентные деформация, скорость деформации и напряжение при плоской схеме напряжений определяются как [6]

$$\varepsilon_e = \lambda_2 \ln \frac{r_0}{r}; \quad \xi_e = \frac{d\varepsilon_e}{dt} = \lambda_2 \frac{v_r}{r}; \quad (5)$$

$$\sigma_e = A \lambda_2^{m+n} \cdot \left(\ln \frac{r_0}{r} \right)^m \left(\frac{v_r}{r} \right)^n. \quad (6)$$

где

$$v_r = v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^f \quad (7)$$

радиальная скорость;

$$f = \frac{R}{1+R}; \quad \lambda_2 = \left[\frac{2(2+R)}{3(1+R)} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Мощность при обжиме при учете выражений (5) – (7) представим соотношением

$$N_{\text{обж}} = \int \sigma_e \xi_e dW = A \lambda_2^{1+m+n} \cdot r_0^{(1+n)f} \cdot v_0^{1+n} \left[\int_{r_0}^{r_1} \left(\frac{1}{r} \right)^{1+n(2+f)} \cdot \left(\ln \frac{r_0}{r} \right)^m dr \right] W, \quad (8)$$

где объем W изделия определяется по выражению (4).

Давление операции при мощности внешних сил

$$N = \pi q (2r_0 - \delta) \delta \cdot v_0 \quad (9)$$

выражается соотношением, следующим из равенства мощностей внешних и внутренних сил [1, 7], т.е.

$$q \leq (N_{\text{изг}} + N_{\text{обж}}) / \pi (2r_0 - \delta) \delta v_0. \quad (10)$$

Давление, как следует из соотношения (10), зависит от степени формообразования заготовки и скорости операции.

Расчет по напряжениям

Рассчитаем давление по напряжениям. Меридиональное напряжение при изгибе определяется как [8]

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{\delta}{4} \left(\frac{1}{r_{y1}} + \frac{1}{r_{y2}} \right) \sigma_e, \quad (11)$$

где эквивалентное напряжение выражается соотношением (2), которое запишем в виде

$$\sigma_e = A \left[\lambda_1 \delta \left(\frac{1}{r_{y1}} + \frac{1}{r_{y2}} \right) \right]^{m+n} \cdot \left(\frac{v_0}{\Delta h} \right)^n. \quad (12)$$

Для расчета напряжений при обжиме воспользуемся уравнением равновесия и условием текучести анизотропного материала [5, 6]

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\theta; \left. \begin{array}{l} \\ \sigma_\theta = -\gamma\sigma_e \end{array} \right\} \quad (13)$$

где σ_r , σ_θ – напряжения меридиональные и окружные; σ_e – эквивалентное напряжение

$$(6); \quad \gamma = \frac{2}{\sqrt{2}} \left(\frac{1+R}{1+2R+\mu_\sigma^2} \right)^{\frac{1}{2}} - \text{коэффициент}$$

учета анизотропии материала при плоском напряженном состоянии [5]; $\mu_\sigma = -1$ – коэффициент вида напряженного состояния.

Система уравнений (13) приводится к неоднородному уравнению [6]

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r = -\gamma\sigma_e,$$

решение которого устанавливает соотношение для меридионального напряжения в виде

$$\sigma_r = -\frac{\gamma}{\eta} K v_0^n \left[1 - \left(\frac{r_1}{r} \right)^\eta \right] r^{\eta-1}, \quad (14)$$

где $\eta = 1 - n(1 + f)$; $K = A \lambda_2^{m+n} \cdot r_0^{nf} \cdot \left(\ln \frac{r_0}{r_1} \right)^m$.

Наибольшее напряжение достигается на входе в матрицу при $r = r_0$. Давление определяется суммой напряжений (11) и (14)

$$q = \sigma_{\text{изг}} + \sigma_r \quad (15)$$

и зависит, как и давление (10), от степени формообразования и скорости.

При штамповке без нагрева заготовки скорость операции не влияет на давление и во входящих в выражения (10) и (15) $n = 0$.

Расчетные данные

Расчеты произведены для формообразования патрубка из титанового сплава ВТ14 при 850°C . Константы уравнения состояния сплава $A = 70$ МПа; $m = 0,07$; $n = 0,05$. Приняты размеры: $r_0 = 70$ мм; $r_1 = 50$ мм; $\delta = 2$ мм; $\Delta h = 250$ мм; $r_{y1} = 20$ мм; $r_{y2} = 80$ мм; $\phi = 160^\circ$. Коэффициент анизотропии материала заготовки $R = 1,2$.

Расчет выполнен для интервала скорости $5 \leq v_0 \leq 10^2$ мм/мин. Верхнеграницный расчет по мощностям установил, что $74 \leq q \leq 86$ МПа. Давление уменьшилось в среднем на 20 % при понижении скорости формообразования. Графики давления приведены на рис. 2. Снижение давления при низких скоростях связано с релаксацией напряжений деформируемого материала, т. е. проявлением его вязких свойств при заданной температуре нагрева. Данный факт отмечен также в работах [3, 6].

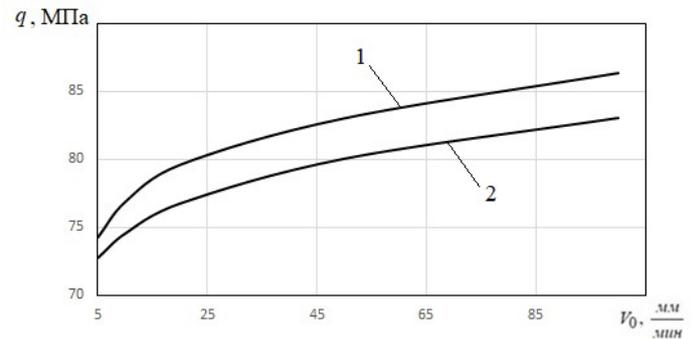


Рис. 2. Графики давления:
1 – по мощностям; 2 – по напряжениям

Fig. 2. Pressure graphs:
1 – capacity; 2 – stress

Изготовление патрубков из ряда других материалов может происходить без нагрева. При этом относительно тонкостенные заготовки получают вытяжкой и формообразуют с наполнителем для предотвращения складкообразования. Образцы патрубков приведены на рис. 3.

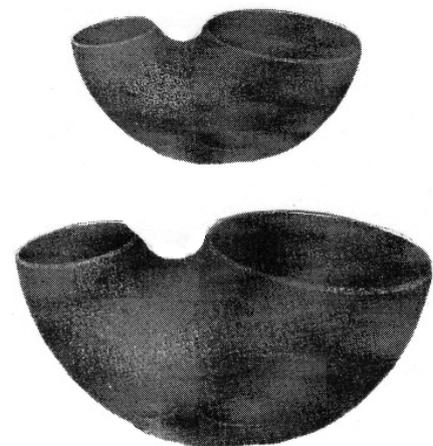


Рис. 3. Образцы типоразмеров газодных патрубков

Fig. 3. Samples of standard sizes of gas ducts

Выводы

1. Крутоизогнутые патрубки переменного сечения из высокопрочных материалов производят в изотермических условиях при одновременных процессах изгиба и обжима.

2. Материал патрубка при деформировании проявляет вязкие свойства (ползучесть) и в этой связи давление формообразования может быть значительно уменьшено при уменьшении скорости операции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голенков В.А., Яковлев С.П. и др. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.

2. Малинин Н.Н. Технологические задачи пластичности и ползучести. М.: Юрайт, 2025. 121 с.

3. Чудин В.Н., Платонов В.И. Верхнеграничный расчет силового режима обжима с локальным нагревом // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2023. № 8. С. 3–7.

4. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.

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

6. Чудин В.Н. Раздача и обжим труб при вязкопластичном деформировании / Вестник машиностроения. 2023. № 4. С. 349–352.

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

8. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1987. 278 с.

REFERENCES

1. Golenkov V.A., Yakovlev S.P. Theory of metal forming. Moscow: Mashinostroenie, 2009. 442 p.

2. Malinin N.N. Technological problems of plasticity and creep. Moscow: Yurait, 2025. 121 p.

3. Chudin V.N., Platonov V.I. Upper-boundary calculation of the power mode of crimping with local heating // Forging and stamping production. Pressure treatment of materials, 2023. No. 8, pp. 3–7.

4. Feodosiev V.I. Strength of materials. Textbook for universities. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 1999. 592 p.

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

6. Chudin V.N. Expansion and crimping of pipes during viscoplastic deformation / Bulletin of Mechanical Engineering. 2023. No. 4. pp. 349–352.

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

8. Popov E.A. Fundamentals of the theory of sheet stamping. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 278 p.

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 15.12.2025; одобрена после рецензирования 17.01.2026; принята к публикации 24.01.2026.

The article was submitted 15.12.2025; approved after reviewing 17.01.2026; assepted for publication 24.01.2026.