

Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2025. №2 (164). С.23-29.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №2 (164). P. 23-29.

Научная статья  
УДК 621.98; 539.375  
doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-23-29

## Верхнеграничный расчет изотермической осадки кольцевой заготовки

Алексей Владимирович Черняев<sup>1</sup>, Д.Т.Н.  
Владимир Николаевич Чудин<sup>2</sup>, Д.Т.Н.

<sup>1</sup> Тульский государственный университет, Тула, Россия

<sup>2</sup> Российский университет транспорта, Москва, Россия

<sup>1</sup> sovet01tsu@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

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

**Аннотация.** Высокопрочные материалы обрабатывают давлением в изотермических условиях с нагревом в оснастке на гидропрессовом оборудовании. При этом наряду с деформационным упрочнением материал заготовки проявляет вязкие свойства, т. е. является вязко-пластичным. Этот фактор необходимо учитывать при разработке технологии обработки давлением, т. к. силовые режимы штамповки и предельные возможности формоизменения существенно зависят от скорости операции. Рассмотрена осадка с нагревом кольцевой заготовки в условиях вязко-пластичности. Предложены соотношения для расчета силового и деформационного режимов осадки кольцевой заготовки при схеме осевой симметрии. Для расчета силового режима использован энергетический метод баланса мощностей внутренних и внешних сил. На контактных поверхностях инструмента и кольцевой заготовки принят закон трения Кулона. Расчет мощностей внутренних сил производился в блоке деформаций и на поверхностях разрыва скоростей перемещений в соответствии с выбранным кинематически возможным полем скоростей, включая поверхности трения. Оптимизация поля скоростей проводилась по принципу минимума давления операции. Оценка повреждаемости материала заготовки выполнена по энергетическому и деформационному критериям разрушения. Представлены расчетные результаты силы осадки и повреждаемости материала для высокопрочных сплавов алюминия и титана. Показано, что при изотермической осадке кольцевой заготовки сила уменьшается при низких скоростях операции. Повреждаемость ряда материалов, поведение которых описывается энергетической теорией разрушения, снижается при уменьшении скорости операции. Для материалов, подчиняющихся деформационной теории разрушения, скорость деформирования не оказывает влияния на повреждаемость, которая определяется только степенью деформации.

**Ключевые слова:** вязкопластичность, мощность, скорость, давление, повреждаемость материала

**Для цитирования:** Черняев А.В., Чудин В.Н. Верхнеграничный расчет изотермической осадки кольцевой заготовки // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 2 (164). С. 23–29 doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-23-29

## Upper boundary calculation of isothermal yield of a ring blank

Alexey V. Chernyaev<sup>1</sup>, D. Eng.

Vladimir N. Chudin<sup>2</sup>, D. Eng.

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

<sup>2</sup> Russian University of Transport, Moscow, Russia

<sup>1</sup> sovet01tsu@rambler.ru

<sup>2</sup> vladimir-chudin@yandex.ru

**Abstract.** High-strength materials are pressure-treated under isothermal conditions with heating using a hydraulic forging equipment. At the same time, along with strainer-hardening, the workpiece material exhibits viscous properties, i.e. it is viscoplastic. This factor must be taken into account when developing pressing technology, since the power modes of stamping and the maximum possibilities of shaping depend significantly on the speed of the operation. A yield with heating of a ring blank under viscoplastic conditions is viewed. The relations for calculating the force and deformation modes of a ring blank yield under the axial symmetry scheme are proposed. The energy method of balancing the capacities of internal and external forces was used to calculate the power regime. Coulomb's law of friction is adopted on both: tool contact surfaces and the ring blank. The internal force capacities were calculated in the deformation block and on the fracture surfaces of the displacement velocities in accordance with the selected kinematically possible velocity field, including the friction surfaces. The optimization of the velocity field was carried out according to the principle of minimum operating pressure. The assessment of the damage to the material of the blank is carried out according to the energy and deformation criteria of destruction. The calculated results of the yield force and material damage for high-strength aluminum and titanium alloys are presented. It is shown that under isothermal yield of a ring blank, the force decreases at low operating speeds. The damage rate of a number of materials, the behavior of which is described by the energy theory of destruction, decreases with a decrease in the speed of the operation. For materials subject to the deformation theory of fracture, the rate of deformation has no effect on damage, but is determined only by the degree of deformation.

**Keywords:** viscoplasticity, power, speed, pressure, material damage

**For citation:** Chernyaev A.V., Chudin V.N. Upper boundary calculation of isothermal yield of a ring blank / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 2 (164). P. 23–29. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-23-29

## Введение

Процессы горячей осадки заготовок применяют в кузнечно-штамповочном производстве [1]. Высокопрочные материалы обрабатывают давлением в изотермических условиях с нагревом в оснастке на гидропрессовом оборудовании. При этом наряду с деформационным упрочнением материал заготовки проявляет вязкие свойства, т. е. является вязкопластичным. При заданной степени формообразования происходит релаксация напряжений, которая тем больше, чем меньше скорость деформирования [2 – 5]. Этот фактор необходимо учитывать при разработке технологии обработки давлением. Рассмотрим осадку с нагревом кольцевой заготовки в условиях вязкопластичности. Схему деформаций примем осесимметричной. Оценку силового режима операции произведем энергетическим методом [6, 7], используя кинематику процесса осадки. Схема осадки приведена на рис. 1.

## Кинематика, мощность, давление

Для расчета давления осадки установим кинематику процесса. Воспользуемся разрывным полем скоростей перемещений (рис. 1, а), которое состоит из блока деформаций  $I$  и жестких блоков  $0, 2$ , разделенных линиями разрыва  $02, 12$  скоростей. Линии разрыва являются образующими поверхностей вращения относительно оси координат  $x$ . Деформации происходят в блоке и на поверхностях разрыва скоростей. Скорость в блоке  $I$  зададим функцией:

$$v_1 = v_0 \left[ 1 + \frac{k(y-y_{01})}{y_{01}-r_2} \right] \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha+\beta)}, \quad (1)$$

где

$$k = 1 - \frac{(r_2^2 - r_1^2) \sin(\alpha+\beta)}{2r_2 h \sin \alpha \sin \beta},$$

$y$  – ордината вектора скорости;  $y_{01}$  – уравнение линии «01»;  $r_1, r_2$  – внутренний и внешний радиусы кольцевой заготовки;  $h$  – конечная высота заготовки;  $\alpha, \beta$  – углы поля скоростей. Функция (1) соответствует граничным условиям на входе в блок деформаций и на выходе из него, т. е.

$$v_{\text{вх}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \text{ при } y_{01} = -x \operatorname{tg} \alpha + r_2; \quad v_{\text{вых}} = \frac{v_0 (r_2^2 - r_1^2)}{2r_2 h \sin \beta} \text{ при } y = r_2.$$

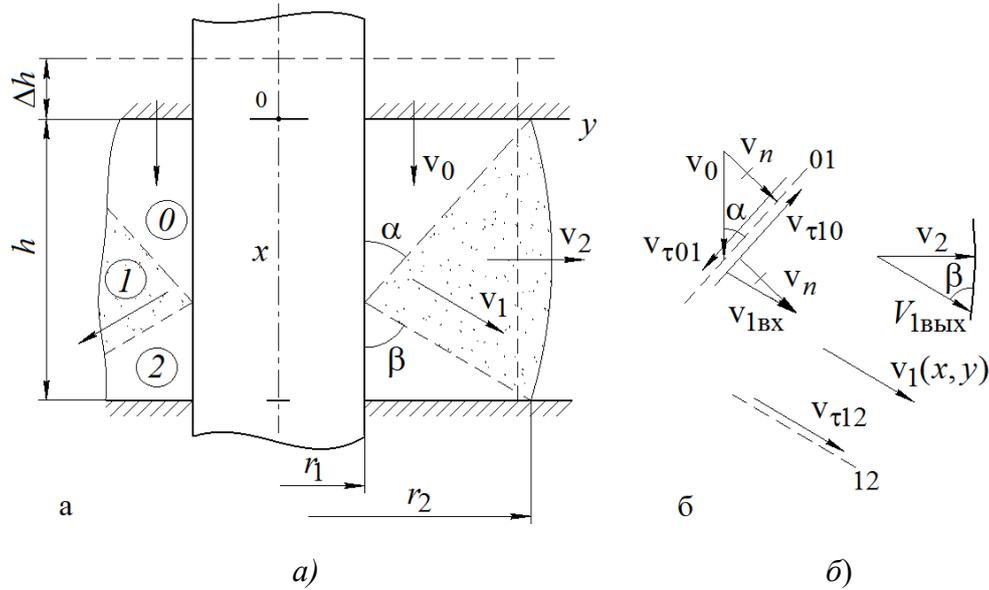


Рис. 1. Схема осадки:

a – поле; б – план скоростей перемещений материала заготовки

Fig. 1. Yield scheme:

a – field; b – plan of the speeds of movement of the blank material

Эквивалентная скорость деформаций в блоке 1 при осевой симметрии выражается соотношением [6]

$$\xi_e = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 2(\xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_\phi^2) + \xi_{xy}^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где

$$\xi_x = \frac{\partial v_{1x}}{\partial x}; \quad \xi_y = \frac{\partial v_{1y}}{\partial y}; \quad \xi_\phi = \frac{v_{1y}}{y}; \quad \xi_{xy} = \frac{\partial v_{1y}}{\partial x} + \frac{\partial v_{1x}}{\partial y} - \text{компоненты скорости деформаций};$$

$$v_{1x} = v_1 \cos \beta; \quad v_{1y} = v_1 \sin \beta - \text{проекции скорости на оси координат } x, y.$$

Эквивалентная деформация в блоке 1 определяется как:

$$\varepsilon_e = \xi_e t = \frac{\Delta h}{v_0} \xi_e. \quad (3)$$

Эквивалентное напряжение представим, учитывая состояние материала при вязкопластичности [2, 5] в виде:

$$\sigma_e = A \varepsilon_e^m \xi_e^n = A \left( \frac{\Delta h}{v_0} \right)^m \xi_e^{m+n}, \quad (4)$$

где  $\Delta h$  – рабочий ход плиты штампа;  $A$ ,  $m$ ,  $n$  – константы материала заготовки. Соотношение для мощности в рассматриваемом блоке деформаций получим с учетом выражений (1), (2), (4). Таким образом:

$$N_1 = \int \sigma_e \xi_e dw = 2\pi A y_{ц.т.} \left( \frac{\Delta h}{v_0} \right)^m h \int_0^{r_2} \int_{y_{01}} \xi_e^{1+m+n} dy dx, \quad (5)$$

где  $w$  – объем блока  $l$ ;  $y_{ц.т.}$  – ордината центра тяжести площади блока в продольном сечении.

Обратимся к линии разрыва скорости  $0I$ . В соответствии с планом скоростей (рис. 1, б)

$$v_{n01} = v_0 \sin \alpha; \quad v_{\tau 01} = v_0 [\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg}(\alpha + \beta)] \sin \alpha \quad (6)$$

где  $v_{n01}$ ,  $v_{\tau 01}$  – нормальная и касательная скорости. Эквивалентные скорость деформаций, деформацию и напряжение запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} \xi_{01} &= \frac{v_{\tau 01}}{l_{01}} = \frac{v_{\tau 01} \sin \alpha}{r_2 - r_1}; \quad \varepsilon_{01} = \xi_{01} t = \frac{\Delta h}{v_0} \xi_{01}; \\ \sigma_{01} &= A \left( \frac{\Delta h}{v_0} \right)^m \left( \frac{v_0 \sin \alpha}{r_2 - r_1} \right)^{m+n}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Мощность на данной поверхности разрыва скорости запишем, учитывая выражения (6) и (7), т. е.

$$N_{01} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_{01} v_{\tau 01} S_{01} = \frac{\pi A (r_2^2 - r_1^2) \Delta h^m v_{\tau 01} v_0^n}{\sqrt{3} (\sin \alpha)^{1-m-n} (r_2 - r_1)^{m+n}} \quad (8)$$

На линии «12» имеем

$$v_{n12} = 0; \quad v_{\tau 12} = v_1 \text{ при } y = y_{12}; \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \xi_{12} &= \frac{v_{\tau 12}}{l_{12}} = \frac{v_{\tau 12} \sin \beta}{r_2 - r_1}; \quad \varepsilon_{12} = \frac{\Delta h}{v_0} \xi_{12}; \\ \sigma_{12} &= A \left( \frac{\Delta h}{v_0} \right)^m \left( \frac{v_{\tau 12} \sin \beta}{r_2 - r_1} \right)^{m+n}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где скорость

$$v_{\tau 12} = v_1 = v_0 \left[ 1 + \frac{k(y_{12} - y_{01})}{y_{01} - r_2} \right] \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}, \quad (11)$$

где  $y_{12} = (x - h) \operatorname{tg} \beta + r_2$ . Мощность на этой поверхности

$$N_{12} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_{12} v_{\tau 12} S_{12} = \frac{\pi A (r_2 + r_1) \Delta h^m v_0^{-m}}{\sqrt{3} (\sin \beta)^{1-m-n} (r_2 - r_1)^{m+n}} \int_c^h v_{\tau 12}^{1+m+n} dx, \quad (12)$$

где  $c = (r_2 - r_1) \operatorname{ctg} \beta$ .

Учтем трение на плоскостях кольцевой заготовки. Скорость движения материала на этих поверхностях выразим уравнением

$$v_{\text{тр.}} = \frac{v_2}{r_2 - r_1} (r - r_1) = \eta v_0 (r - r_1), \quad (13)$$

где  $\eta = (r_1 + r_2)/(2r_2h)$ ;  $v_2 = v_{1\text{ВЫХ}} \sin \beta$ . Мощность трения представим, учитывая скорость (13), соотношением

$$N_{\text{тр.}} = \tau_{\text{тр.}} S_{\text{тр.}} \int v_{\text{тр.}} dr = \frac{\pi}{2} \mu q (r_2^2 - r_1^2)^2 \left(1 - \frac{2r_1}{r_1 + r_2}\right) \frac{v_0}{r_2 h}. \quad (14)$$

Примем, что  $\tau_{\text{тр.}} = \mu q$ ;  $q$  - давление осадки;  $\mu$  - коэффициент трения.

Давление операции определяется в соответствии с верхнеграничной теоремой пластичности [6, 7] с учетом выражений для мощностей (5), (8), (12), (14), т.е.

$$q \leq \frac{N_1 + N_{01} + N_{12} + N_{\text{тр.}}}{\pi(r_2^2 - r_1^2)v_0}. \quad (15)$$

Давление необходимо минимизировать по углу  $\alpha$ , используя связь

$$\beta = \text{arccctg} \left( \frac{h}{r_2 - r_1} - \text{ctg} \alpha \right).$$

Давление, как следует из выражения (15), зависит от скорости осадки.

### Повреждаемость материала

Оценку повреждаемости материала заготовки в результате осадки произведем в соответствии с уравнениями механики разрушения [6,7]. По энергетическому уравнению получим зависимость

$$\omega = \frac{1}{A_{\text{пр.}}} \int \sigma_e \xi_e dt = \frac{A}{(1+m)A_{\text{пр.}}} \left( \frac{\Delta h}{v_0} \right)^{1+m} \xi_e^{1+m+n}, \quad (16)$$

по деформационному уравнению

$$\omega = \frac{1}{\varepsilon_{\text{епр.}}} \int \xi_e d \left( \frac{\Delta h}{v_0} \right) = \frac{\Delta h \xi_e}{v_0 \varepsilon_{\text{епр.}}} \quad (17)$$

Здесь

$$\xi_e = \frac{1}{\sqrt{3}} \int_0^h \left[ \int_{y_{01}}^{r_2} \left( 2(\xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_\varphi^2) + \xi_{xy}^2 \right)^{1/2} dy \right] dx;$$

$0 \leq \omega \leq 1$  - повреждаемость материала;  $A_{\text{пр.}}$ ,  $\varepsilon_{\text{епр.}}$  - предельные константы разрушения.

### Результаты и обсуждение

Расчеты выполнены для осадки кольцевой заготовки из титанового и алюминиевого сплавов. Константы сплавов приведены в табл. 1 [5].

## 1. Константы сплавов

### 1. Constants of alloys

Сплав	$T, ^\circ\text{C}$	$A, \text{МПа}\cdot\text{с}^n$	$m$	$n$	$A_{\text{пр.}}, \text{МПа}$	$\varepsilon_{\text{ср.}}$
АМг6	450	60	0,10	0,03	500	—
ВТ6С	900	70	0,03	0,05	—	1,2

Принято:  $r_1 = 20\text{мм}$ ;  $r_2 = 30\text{мм}$ ;  
 $h = 50\text{мм}$ ;  $\Delta h = 15\text{мм}$ ;  $\alpha = 15^\circ$ ;  $\beta = 35^\circ$ ;  
коэффициент трения  $\mu = 0,1$ . Получено, что в  
пределах скорости осадки  
 $10 \leq v_0 \leq 150\text{мм/мин}$  давление менялось в  
пределах  $106 \leq q \leq 116 \text{ МПа}$  для сплава

АМг6 и  $120 \leq q \leq 138 \text{ МПа}$  для сплава ВТ6С  
(рис. 2). Таким образом, уменьшение скорости  
операции приводит к уменьшению давления.  
При малых скоростях осадки увеличивается  
релаксация напряжений и, следовательно,  
уменьшается давление.

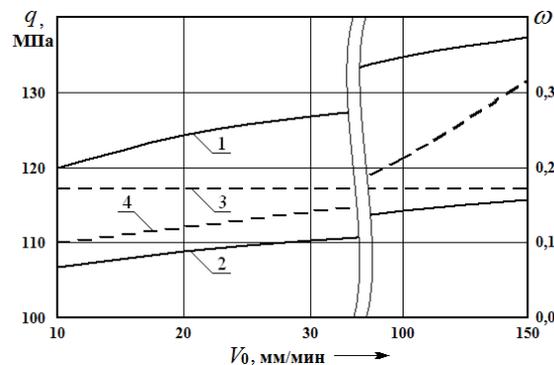


Рис. 2. Графики удельной силы и повреждаемости:

1, 2 –  $q(v_0)$ ; 3, 4 –  $\omega(v_0)$  для сплавов ВТ6С и АМг6, соответственно.

Fig. 2. Graphs of specific force and damage:

1, 2 –  $q(v_0)$ ; 3, 4 –  $\omega(v_0)$  for VT6C and AMg6 alloys, respectively.

Уменьшение давления с понижением скорости операции происходит также в процессах объемной [3, 4, 8] и листовой [5, 9 - 11] штамповки с нагревом на гидропрессовом оборудовании. Повреждаемость сплава АМг6 зависит от скорости осадки и в пределах указанной скорости составила  $0,10 \leq \omega \leq 0,32$ . Повреждаемость сплава ВТ6С при заданной температуре  $\omega = 0,18$  зависит только от степени осадки.

### Выводы

1. Горячая осадка на гидропрессовом оборудовании при малых скоростях деформирования происходит в условиях вязкопластичности. Материал заготовки релаксирует, что приводит к снижению давления

формоизменения. Давление снижается тем больше, чем меньше скорость операции.

2. Повреждаемость деформируемого материала может зависеть от скорости операции или только от степени формоизменения.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ковка и штамповка:** справочник: в 4 т. / ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) [и др.]. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2010. Т.2: Горячая объемная штамповка / А.П. Атрошенко [и др.]; под ред. Е.И. Семенова. 2010. 720 с.
2. **Малинин Н.Н.** Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.
3. **Чудин В.Н., Платонов В.И., Романов П.В.** Вариационная оценка режима осадки при сварке давлением // Научно-технические технологии в машиностроении. 2021. №3(117). С. 16–18. doi: 10.30987/2223-4608-2021-3-16-18

4. Черняев А.В., Чудин В.Н. Изотермическая безоблойная штамповка при нестационарном вязкопластическом деформировании // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2019. №2. С. 16–21.

5. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов / С.П. Яковлев, В.Н. Чудин и др. М: Машиностроение 1; Изд-во ТулГУ, 2004. 427 с.

6. Теория обработки металлов давлением / В.А. Голенков [и др.]; под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. 3-е изд. М: Машиностроение, 2013. 441 с.

7. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет (УПИ), 2001. 836 с.

8. Пасынков А.А. Высадка фланца на деталях трубопроводов при вязкопластическом нестационарном деформировании // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2021. № 3. С. 10–15.

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

10. Пасынков А.А., Яковлев Б.С. Горячий обжим крупногабаритных трубных заготовок // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 12 (126). С. 7–11. doi: 10.30987/2223-4608-2021-12-7-11

11. Ларин С.Н., Бессмертная Ю.В. Горячее деформирование корпусных заготовок в изотермических условиях // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 6 (156). С. 21–28. doi: 10.30987/2223-4608-2024-21-28

## REFERENCES

1. Forging and stamping: a reference book: in 4 volumes / ed. Council: E.I. Semenov (prev.) [et al]. 2nd ed.,

revised. Moscow: Mashinostroenie, 2010, vol. 2: Hot volumetric stamping / A.P. Atroshenko [et al.]; edited by E.I. Semenov, 2010, 720 p.

2. Malinin N.N. Creep in metalworking. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 216 p.

3. Chudin V.N., Platonov V.I., Romanov P.V. Variation assessment of yield mode at pressure welding // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2021, no.3(117), pp. 16–18. doi: 10.30987/2223-4608-2021-3-16-18

4. Chernyaev A.V., Chudin V.N. Isothermal flash-free stamping with non-stationary viscoplastic deformation // Forging and stamping production. Pressure treatment of materials, 2019, no. 2, pp. 16-21.

5. Isothermal deformation of high-strength anisotropic metals / S.P. Yakovlev, V.N. Chudin et al. Moscow: Mashinostroenie 1; TuSU Publishing House, 2004. 427 p.

6. Theory of metal processing by pressure / V.A. Golenkov [et al.]; edited by V.A. Golenkov, S.P. Yakovlev. 3rd ed. Moscow: Mashinostroenie, 2013, 441 p.

7. Kolmogorov V.L. The Mechanics of Metal Processing under Pressure: Textbook, Yekaterinburg: Ural State Technical University (UGTU-UPI), 2001, 836 p.

8. Pasinkov A.A. Upsetting of a flange on pipeline parts during viscoplastic unsteady deformation // Forging and stamping production. Pressure treatment of materials, 2021, no. 3, pp. 10-15.

9. Platonov V.I., Pasinkov 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

10. Pasinkov A.A., Yakovlev B.S. Hot crimping of large-sized pipe blanks // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2021, no. 12 (126). pp. 7-11. doi: 10.30987/2223-4608-2021-12-7-11

11. Larin S.N., Bessmertnaya Yu.V. Hot forming of box-shaped material blanks under isothermal conditions // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2024, no. 6 (156), pp. 21-28. doi: 10.30987/2223-4608-2024-21-28

**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 08.12.2024; одобрена после рецензирования 11.12.2024; принята к публикации 20.12.2024.

The article was submitted 08.12.2024; approved after reviewing 11.12.2024; accepted for publication 20.12.2024.