

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №5 (155). С.9-13.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №10 (155). P. 9-13.

Научная статья  
УДК 621.774.4;374.001.573  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-9-13

## Изотермическое прессование в конической матрице релаксирующего материала

Владимир Николаевич Чудин<sup>1</sup>, д.т.н.

Андрей Александрович Пасынков<sup>2</sup>, к.т.н.

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

<sup>1,2</sup> mpf-tula@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8757-9411>

**Аннотация.** Предложены соотношения для расчета деформационного и силового режимов изотермического прессования заготовок из высокопрочных металлических сплавов. При изотермическом деформировании происходит упрочнение материала и разупрочнение, что связано с проявлением вязких свойств материала (ползучестью). В этой связи принято состояние вязкопластичности. Деформационное состояние сопровождается релаксацией напряжений, которое тем больше, чем меньше скорость (больше длительность) операции. На основе механики деформирования зависимости режимов прессования (деформации, сила, повреждаемость материала заготовки) выражаются аналитическими соотношениями. Силовой режим определяется с помощью энергетического метода, связанного с мощностями внешних и внутренних сил. Баланс мощностей этих сил приводит к оценке давления изотермического прессования. При этом используется разрывное поле скоростей перемещений, которое состоит из блока деформаций и жестких блоков. Блоки разделены поверхностями разрыва скоростей перемещений. Деформации происходят в блоке деформаций и на поверхностях разрыва скоростей. Так как прессование приводит к возникновению микрповреждений, то произведена оценка повреждаемости материала заготовки. При этом использованы критерии кинетики разрушения: энергетическое и деформационное уравнения. Повреждаемость материала зависит от скорости и степени деформирования или только от степени деформирования. Для ряда материалов снижение скорости способствует уменьшению повреждаемости и, следовательно, возможности увеличения степени формоизменения исходной заготовки. Приведены соотношения для расчета жесткости схемы напряжений, от которой так же зависит повреждаемость. Произведены расчеты давления и повреждаемости материала при прессовании заготовок из титанового и высокопрочного алюминиевого сплавов. Показано, что при малых скоростях операции на соответствующем гидропрессовом оборудовании давление прессования значительно уменьшается. Повреждаемость алюминиевого сплава также уменьшается, а для титанового зависит только от степени формоизменения.

**Ключевые слова:** вязкопластичность, кинематика, поле скоростей, мощность, давление, повреждаемость материала

**Для цитирования:** Чудин В.Н., Пасынков А.А. Изотермическое прессование в конической матрице релаксирующего материала // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 5 (155). С. 9–13 doi: 10.30987/2223-4608-2024-9-13

## Isothermal extrusion in a cone-type matrix of a relaxing material

Vladimir N. Chudin<sup>1</sup>, D. Eng.

Andrey A. Pasyunkov<sup>2</sup>, Ph.D. Eng.

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

<sup>1,2</sup> mpf-tula@rambler.ru

**Abstract.** The relations for calculating the deformation mode and force conditions of isothermal extrusion of blanks made of high-strength metallic alloys are proposed. Under isothermal deformation, the material is hardened and softened, which is associated with the manifestation of the viscous properties of the material (creep). In this regard, the state of viscoplasticity is taken on. The deformation state is accompanied by stress relaxation, which is greater the lower the speed (longer duration) of the operation. Based on the mechanics of deformation, the dependence of moulding conditions (deformation, force, damage to the work material)

is expressed by analytical relations. The power balance of activity of forces results in a pressure estimation for isothermal exposure. In this case, a discontinuous field of path velocities is used, which consists of a block of deformations and rigid blocks. The blocks are separated by slip surfaces. Deformations occur in the deformation block and on slip surfaces. Since pressing leads to the occurrence of micro-damages, the damage rate of the coating material was estimated. In this case, the criteria of fracture kinetics are used: energy and deformation equations. The damage rate of the material depends on the speed and degree of deformation, or solely on the degree of deformation. For a number of materials, reducing the speed helps to reduce damage and, consequently, the possibility of increasing the degree of shaping of the primary blank. The relations for stiffness analysis of the stress pattern are given, on which the damage also depends. Calculations of the pressure and damage of the material under compaction for blanks made of titanium and high-strength aluminum alloys have been performed. It is shown that at low operation speeds on the appropriate hydraulic forging equipment, the exposure pressure decreases significantly. The aluminum alloy damaging is also reduced, and for titanium it depends only on the degree of forming.

**Keywords:** viscoplasticity, kinematics, velocity field, power, pressure, material damage rate

**For citation:** Chudin V.N., Pasyukov A.A. Isothermal extrusion in a cone-type matrix of a relaxing material / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 5 (155). P. 9–13. doi: 10.30987/2223-4608-2024-9-13

### Введение

Процессы изотермического прессования применяют в обработке давлением заготовок из высокопрочных сплавов [1]. Нагрев производят в штампе и поддерживают в процессе формоизменения. При этом деформируемый материал проявляет вязкие свойства. Происходит его упрочнение и разупрочнение в связи с релаксацией напряжений. Релаксация увеличивается при снижении скорости операции, что влияет на силовой и деформационный режимы [2, 3]. Это влияние необходимо учитывать при технологических расчетах. Для ряда процессов изотермической объемной штамповки такие расчеты приведены в работе [4]. Схема прессования приведена на рис. 1, а. Используется верхнеграничный энергетический метод расчета используя кинематику деформирования с

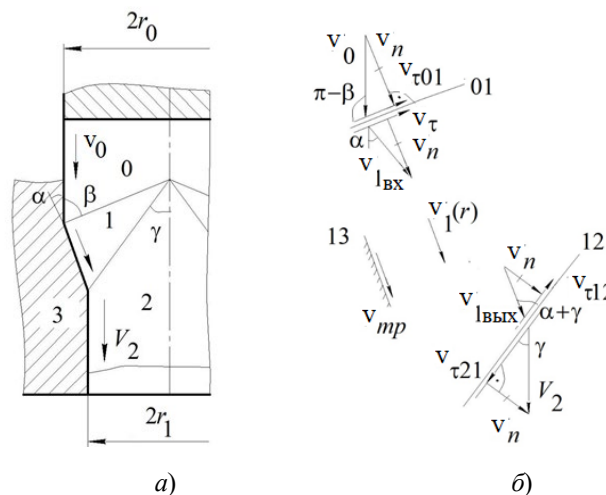
помощью разрывного поля скоростей перемещений [3, 4].

### Кинематика, мощность, давление

Установим кинематику деформирования, введя разрывное поле скоростей перемещений (см. рис. 1, а). Поле состоит из блока деформаций «1» и жестких блоков «0», «2». Оснастка обозначена как блок «3». Блоки разделены поверхностями разрыва скоростей с образующими линиями «01» и «12» и ограничены контактной поверхностью трения «13». Длины образующих линий «01», «12» и «13» соответственно:

$$l_{01} = \frac{r_0}{\sin \beta}; l_{12} = \frac{r_1}{\sin \gamma}; l_{13} = l_{тр} = \frac{r_0 - r_1}{\sin \alpha}, \quad (1)$$

где  $r_0, r_1$  – радиусы исходной и конечной заготовок;  $\alpha$  – угол конуса матрицы.



**Рис. 1.** Схема прессования, поле (а) и план скоростей перемещений (б)

**Fig. 1.** Extrusion scheme, field (a) and path velocity plan (b)

Углы  $\beta, \alpha$  связаны с выражением:

$$\gamma = \arctg \operatorname{ctg} \frac{1}{r_1} [(r_0 - r_1) \operatorname{ctg} \alpha + r_0 \cdot \operatorname{ctg} \beta].$$

Деформации происходят в блоке «1» и на поверхностях разрыва скоростей. В блоке деформаций скорость перемещения материала заготовки по конусу представим функцией текущего радиуса заготовки на конусе матрицы

$$v_1(r) = v_0 [1 - k(r_0 - r)] \sin \beta, \quad (2)$$

где  $k = \left[ 1 - \left( \frac{r_0}{r_1} \right)^2 \frac{\sin \gamma}{\sin \beta \cdot \sin(\alpha + \gamma)} \right] / (r_0 - r_1)$ .

Функция (2) соответствует граничным условиям для скорости на входе и выходе из блока деформаций, т. е.:

$$v_1(r) = v_{1\text{вх}} = v_0 \sin \beta, \text{ при } r = r_0;$$

$$v_1(r) = v_{1\text{вых}} = v_0 \left( \frac{r_0}{r_1} \right)^2 \frac{\sin \gamma}{\sin(\alpha + \gamma)}, \text{ при } r = r_1.$$

Эквивалентные деформацию и ее скорость запишем в виде:

$$\varepsilon_e = \ln \frac{r_0}{r}; \quad \xi_e = \frac{d\varepsilon_e}{dt} = \frac{1}{r} v_1(r). \quad (3)$$

Эквивалентное напряжение здесь с учетом уравнения состояния при вязкопластичности [3, 4] и выражений (3):

$$\sigma_e = A \varepsilon_e^m \xi_e^n = A \left( \ln \frac{r_0}{r_1} \right)^m \left[ \frac{v_1(r)}{r} \right]^n. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) позволяют представить мощность внутренних сил в данном блоке соотношением:

$$N_1 = \int \sigma_e \xi_e dW_1 = \pi A \frac{r_1 (r_0 - r_1) \sin(\alpha + \gamma)}{\sin \alpha \sin \gamma} \left( \ln \frac{r_0}{r_1} \right)^m \int_{r_1}^{r_0} \left[ \frac{1}{r} v_1(r) \right]^{1+n} dr. \quad (5)$$

Соотношение (5) интегрируется аналитически при разложении функции скорости в виде [5]:

$$[v_1(r)]^{1+n} = (v_0 \sin \beta)^{1+n} [1 - k(1+n)(r_0 - r)]. \quad (6)$$

Обратимся к поверхностям разрыва скоростей, используя план скоростей (рис. 1, б). На поверхности  $S_{01}$  имеем:

$$v_n = v_0 \sin \beta; \quad v_\tau = v_0 [\text{ctg} \beta - \text{ctg}(\alpha + \beta)] \sin \beta, \quad (7)$$

где  $v_n$  и  $v_\tau$  – нормальная и касательная скорости.

Запишем соотношения для эквивалентных деформации, скорости деформации и напряжения, учитывая выражения (7). Таким образом:

$$\varepsilon_e = \frac{v_\tau}{\sqrt{3} v_n}; \quad \xi_e = \frac{1}{t} \varepsilon_e = \frac{v_\tau}{l_{01}} \varepsilon_e = \frac{\varepsilon_e}{r_0} v_\tau \sin \beta; \quad (8)$$

$$\sigma_e = A \varepsilon_e^{m+n} \left( \frac{v_\tau}{r_0} \sin \beta \right)^n. \quad (9)$$

Мощность на поверхности разрыва скорости запишем, используя выражения (7) – (9) соотношением:

$$N_{01} = \sigma_e v_\tau S_{01} = \pi A \frac{r_0^{2-n} v_\tau^{1+m+2n}}{(\sqrt{3} v_n)^{m+n}} \left( \frac{1}{\sin \beta} \right)^{1-n}. \quad (10)$$

Соответствующие выражения для поверхности  $S_{12}$  запишем аналогичным образом, т. е.:

$$v_n = v_0 \left( \frac{r_0}{r_1} \right)^2 \sin \gamma; \quad v_\tau = v_0 \left( \frac{r_0}{r_1} \right)^2 [\text{ctg} \gamma + \text{ctg}(\alpha + \gamma)] \sin \lambda; \quad (11)$$

$$\varepsilon_e = \frac{v_\tau}{\sqrt{3} v_n}; \quad \xi_e = \frac{1}{l_{12}} \varepsilon_e = \frac{\varepsilon_e}{r_1} v_\tau \sin \gamma; \quad (12)$$

$$\sigma_e = A \varepsilon_e^{m+n} \left( \frac{v_\tau}{r_1} \sin \gamma \right)^n. \quad (13)$$

Мощность на этой поверхности при учете выражений (11) – (13) имеет вид:

$$N_{12} = \sigma_e v_\tau S_{12} = \pi A \frac{r_1^{2-n} v_\tau^{1+m+2n}}{(\sqrt{3} v_n)^{m+n}} \left( \frac{1}{\sin \gamma} \right)^{1-n}. \quad (14)$$

Учтем трение заготовки на конической контактной поверхности матрицы. Выражение для расчета мощности представим как

$$N_{mp} = \pi \mu q (r_0 + r_1) \int_{r_1}^{r_0} v_r(r) dr, \quad (15)$$

где  $q$  – внешнее давление;  $\mu$  – коэффициент трения. Используя выражения (5), (10), (14), (15) получим соотношение для давления прессования в виде:

$$q \leq \frac{N_1 + N_{01} + N_{12}}{\pi \left[ r_0^2 v_0 - \mu(r_0 + r_1) \int_{r_1}^{r_0} v_r(r) dr \right]}. \quad (16)$$

Здесь  $0 \leq \omega \leq 1$  – повреждаемости материала;  $A_{пр}$  – предельная удельная работа при разрушении. По деформационному уравнению:

$$\omega = \frac{1}{\varepsilon_{e пр}} \ln \frac{r_0}{r_1}, \quad (18)$$

где  $\varepsilon_{e пр}$  – предельная эквивалентная работа.

Соотношение (17) применимо для материалов, повреждаемость которых зависит от скорости прессования. Если такой зависимости нет, то используется соотношение (18).

Предельные константы  $A_{пр}$ ,  $\varepsilon_{e пр}$  зависят от жесткости системы напряжений [2, 6], которые определяются как  $\sigma_0/\sigma_e$ , где  $\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_\phi + \sigma_z)$ ;  $\sigma_r, \sigma_\phi, \sigma_z$  – компоненты напряжений по осям координат;  $\sigma_e$  – эквивалентное напряжение (4). Считаем, что  $\sigma_z = -q$ .

При осевой симметрии из условия текучести [3], следует, что

В соответствии с экстремальной верхнеграничной теоремой пластичности [3] соотношение (16) необходимо минимизировать, используя приведенную выше связь углов  $\alpha, \beta, \gamma$  поля скоростей, т. е.  $\partial q/\partial \beta = 0$ .

### Повреждаемость материала

Воспользуемся уравнениями кинетики повреждаемости [6, 7]. В блоке деформаций по энергетическому уравнению получим:

$$\omega = \frac{1}{A_{пр}} \int \sigma_e \xi_e \frac{dr}{v_1} = \frac{A}{A_{пр}} \left( \ln \frac{r_0}{r_1} \right)^m \int_r^{r_0} \left( \frac{1}{r} \right)^{1+n} [v_1(r)]^n dr. \quad (17)$$

$$\sigma_r = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e - q.$$

Так как при полной пластичности принимается  $\sigma_r = \sigma_\phi$ , то

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_e} = \frac{4}{3\sqrt{3}} - \frac{|q|}{\sigma_e}. \quad (19)$$

При известной жесткости (19) предельные константы определяются по выражениям [2]:

$$A_{пр} = c_1 \exp \left( A_1 \frac{\sigma_0}{\sigma_e} \right); \varepsilon_{e пр} = c_2 \exp \left( A_2 \frac{\sigma_0}{\sigma_e} \right), \quad (20)$$

где  $A_1, A_2, c_1, c_2$  – эмпирические коэффициенты.

### Расчетные результаты

Расчеты выполнены для прессования заготовок из сплавов титана и алюминия. Константы этих сплавов приведены в табл. 1.

## 1. Константы сплавов титана и алюминия

### 1. Constants of titanium and aluminum alloys

Сплав	$T, ^\circ\text{C}$	$A, \frac{H \cdot c^n}{M^2}$	$m$	$n$	$A_{пр}, \text{МПа}$	$\varepsilon_{e пр}$
BT6C	930	70	0,03	0,05	-	1,2
АлГ6	450	60	0,10	0,03	$5 \cdot 10^2$	-

Приняты размеры:  $r = 25$  мм;  $r_1 = 18$  мм;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $\beta = 70^\circ$ ;  $\gamma = 42^\circ$ . Коэффициент трения  $\mu = 0,1$ .

Установлено, что в процессе прессования наряду с упрочнением материала заготовки происходит разупрочнение, т. е. релаксация напряжений во времени. Давление прессования зависит, следовательно, от скорости операции.

При снижении скорости в пределах  $5 \cdot 10^2 \geq v_0 \geq 10$  мм/мин давление изменилось соответственно для сплава

BT6C  $33 \geq q \geq 25$  МПа и для сплава АлГ6  $43 \geq q \geq 33$  МПа, также зависит от скорости прессования. В пределах данной скорости она уменьшилась и составила  $0,27 \geq \omega \geq 0,2$ . Повреждаемость сплава BT6C от скорости не зависит и при заданной степени прессования составляет  $\omega = 0,27$ . Таким образом повреждаемость алюминиевого сплава незначительна по сравнению со сплавом титана. При других температурных условиях

повреждаемость титановых сплавов может зависеть от скорости формоизменения [2].

Расчетные данные соответствуют экспериментально-технологическим и использованы в производстве [2, 4].

### Выводы

1. Изотермическое прессование на гидропрессовом оборудовании производится в условиях вязкопластического деформирования. Деформационное упрочнение материала заготовки сопровождается релаксацией напряжений во времени.

2. Величина давления зависит от длительности операции и уменьшается при малых скоростях формоизменения.

3. Повреждаемость материала заготовки может зависеть от скорости или только от степени деформирования. На величину повреждаемости влияет так же жесткость схемы напряжений.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ковка** и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка / под ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 720 с.

2. **Изотермическое** формоизменение анизотропных материалов / С.С. Яковлев, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин и др. М.: Машиностроение, 2009. 412 с.

3. **Теория** обработки металлов давлением / под ред. Голенкова В.А., Яковлева С.П. и др. М. Машиностроение. 2009. 442 с.

4. **Чудин В.Н., Пасынков А.А.** Нестационарные процессы изотермической штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2018. №6. С. 23–28.

5. **Двайт Г.Б.** Таблицы интегралов. М.: Наука. 1973. 228 с.

6. **Колмогоров В.Л.** Механика обработки металлов давлением М.: Metallurgia, 1986. 688 с.

7. **Гун Г.Я.** Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Metallurgia. 1980. 456 с.

8. **Нуждин Г.А., Галкин Ю.С., Хрычев И.С.** Оценка характера течения металла при выдавливании с

подталкиванием // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 9. С. 631–634.

9. **Черняев А.В., Усенко Н.А., Коротков В.А., Платонов В.И.** Определение влияния скорости деформации на сопротивление деформированию при статическом растяжении с повышенной температурой // Цветные металлы. 2019. № 5. С. 60–66.

10. **Пасынков А.А., Ларин С.Н., Исаева А.Н.** Теоретическое обоснование схемы обратного изотермического выдавливания трубной заготовки с активным трением и вытяжкой ее краевой части // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. № 10. С. 462–465.

### REFERENCES

1. Forging and stamping: Handbook: in 4 volumes, vol. 2. Hot volume stamping / edited by E.I. Semenov. Moscow: Mashinostroenie, 2010, 720 p.

2. Isothermal shaping of anisotropic materials / S.S. Yakovlev, S.P. Yakovlev, V.N. Chudin et al. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 412 p.

3. Theory of metal forming by pressure / ed. Golenkova V.A., Yakovleva S.P. et al. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 442 p.

4. Chudin V.N., Pasynkov A.A. Nonstationary processes of isothermal stamping// Forging and stamping production. Pressure metal treatment. 2018, no.6, pp. 23–28.

5. Dwight G.B. Tables of integrals. Moscow: Nauka. 1973, 228 p.

6. Kolmogorov V.L. Mechanics of pressure metal treatment. Moscow: Metallurgia, 1986, 688 p.

7. Gong G.Ya. Theoretical foundations of pressure metal treatment. Moscow: Metallurgia, 1980, 456 p.

8. Nuzhdin G.A., Galkin Yu.S., Hrichev I.S. Assessment of the nature of metal flow under extrusion with squirting // News of TulSU. Technical sciences. 2023, issue 9, pp. 631–634.

9. Chernyaev A.V., Usenko N.A., Korotkov V.A., Platonov V.I. Understanding how deformation rate influences the resistance to deformation under static tension at high temperature // Non-ferrous metals, 2019, no. 5, pp. 60–66.

10. Pasynkov A.A., Larin S.N., Isaeva A.N. Theoretical substantiation of reverse isothermal extrusion scheme of pipe billet with active friction and drawing of its edge part // Blanking productions in mechanical engineering, 2020, no. 10, pp. 462–465.

**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 26.02.2024; одобрена после рецензирования 06.03.2024; принята к публикации 11.03.2024.

The article was submitted 26.02.2024; approved after reviewing 06.03.2024; assepted for publication 11.03.2024.