

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №7 (145). С.3-7.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №7 (145). P. 3-7.

Научная статья

УДК 621.983:539.374

doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-3-7

Технологические режимы раздачи и обжима при локальном нагреве

Владимир Николаевич Чудин, д.т.н.

МИИТ, г. Москва, Россия

vladimir-chudin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8757-9411>

Аннотация. Рассмотрены процессы раздачи и обжима с нагревом заготовок в условиях вязко-пластичности. Получено соотношение для расчета напряжений сил операций, повреждаемости материала заготовок. В отраслях специального машиностроения используются высокопрочные сплавы на основе титана и алюминия. Данные сплавы имеют анизотропию механических свойств. Обработка этих сплавов затруднительна. По этой причине операцию обработки давлением производят с нагревом зоны деформаций. Материал в зоне деформаций проявляет вязкие свойства. Происходит одновременно деформационное упрочнение и разупрочнение (релаксация напряжений) материала, причём, разупрочнение тем больше, чем меньше скорость деформирования. В этой связи принято уравнение состояния, отображающее эти процессы. Фактор упрочнения и разупрочнения создает условия для снижения силового режима операций обработки давлением и повышение степени формоизменения исходной заготовки. Учёт релаксации напряжений с помощью аналитических зависимостей необходим на этапе разработки процессов раздачи и обжима. Расчетные соотношения записаны в функции скорости этих операций. При этом учитывается заданная деформация (степень формоизменения), которые корректируются в зависимости от скорости и механических характеристик анизотропии исходного материала. Расчетные соотношения получены при плоской схеме напряжений, что соответствует раздаче и обжиму. Использовано уравнение равновесия в напряжениях и условие текучести анизотропного материала. Совместные решения этого уравнения и условия текучести устанавливает величины меридиональных и окружных напряжений, возникающих в материале заготовки. Величины напряжений позволяют рассчитать силы операций. Показано, что скорость раздачи и обжима и анизотропия механических свойств влияют на повреждаемость материала деформируемой заготовки. Зависимости для расчёта повреждаемости получены на основе энергетического и деформационного критериев прочности. Данные зависимости позволяют прогнозировать качество изделий. Показано также, что анизотропия влияет на технологические режимы раздачи и обжима. При увеличении коэффициента анизотропии напряжения и силы операций уменьшаются. Произведены расчёты напряжений, сил и повреждаемости материала при раздаче анизотропного титанового сплава ВТ14 при 875 °С.

Ключевые слова: анизотропия, вязко-пластичность, скорость, деформации, напряжения, сила, повреждаемость материала

Для цитирования: Чудин В.Н. Технологические режимы раздачи и обжима при локальном нагреве // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 7 (145). С. 3–7. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-3-7

Technological modes of expansion and pressing under selective heating

Vladimir N. Chudin, D.Eng.

MIIT, Moscow, Russia

vladimir-chudin@yandex.ru

Abstract. The processes of spread and reduction of a heated rough piece under visco-plasticity conditions are viewed. The ratio for force stress calculating in operations, damage to the material of the rough pieces is obtained. In the branches of special engineering, high-strength alloys based on titanium and aluminum are used. These alloys have mechanical properties anisotropy. Processing of these alloys is difficult. For this reason, the pressure treatment operation is performed with heating of the deformation zone. The material in the deformation zone exhibits viscous properties. Deformation hardening and softening (stress relaxation) of the material take place simultaneously. Besides, the lower the deformation rate, the greater the softening. In this regard, a constitutive equation representing these processes is found. The factor of hardening and softening creates conditions for reducing the power mode of pressure treatment operations and increasing the degree of primary part forming. Stress relaxation calculation with the help of analytical dependencies is necessary at the stage of expansion and pressing development. The calculated ratios are recorded as a function of the speed of these operations. In this case, the specified deformation (the change in the degree of forming) is taken into account, adjusted depending on the speed and mechanical characteristics of the bearing alloy anisotropy. The calculated ratios are obtained under conditions of a flat voltage scheme, which corresponds to expansion and pressing. Stress equilibrium equation and yield condition of anisotropic material are used. The joint solutions of this equation and yield conditions determine values of the meridional and circumferential stresses arising in the piece part material. The values of the stresses allow calculating the forces of operations. It is shown that the speed of expansion and pressing and mechanical properties anisotropy affect the damage to the material of the «green body». Dependences for the calculation of damage are obtained on the basis of energy and deformation strength criteria. These dependencies allow predicting the quality of products. It is also shown that anisotropy affects the technological modes of expansion and pressing. As the anisotropy coefficient increases, the stresses and forces of operations decrease. Calculations of stresses, forces and material damage in the process of expansion of anisotropic titanium alloy VT14 at 875 °C are made.

Keywords: anisotropy, visco-plasticity, velocity (speed), deformations, stresses, strength, material damage

For citation: Chudin V.N. Technological modes of expansion and pressing under selective heating / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 7 (145). P. 3–7. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-3-7

Введение

Процессы раздачи и обжима труб применяются в обработке давлением [1, 2]. Заготовки из высокопрочных материалов обрабатывают при изотермическом нагреве зоны деформаций с регламентированной скоростью формоизменения [3]. При этом материал заготовки проявляет вязкие свойства [4, 5], деформационное упрочнение сопровождается разупрочнением (релаксацией напряжений). Релаксация увеличивается при низких скоростях операций, что приводит к уменьшению силового режима раздачи и обжима. Скорость формоизменения заготовки и анизотропия механических характеристик материала являются одними из факторов технологии, влияющими на режим операции в части допустимых степеней формоизменения, сил, повреждаемости материала заготовки [6 – 8]. Учёт этих факторов позволяет проектировать оптимальные процессы обработки металлов давлением.

Материалы и методы решения задачи с нагревом

Рассмотрим расчеты технологических режимов раздачи и обжима с нагревом. Схемы этих процессов приведены на рис. 1.

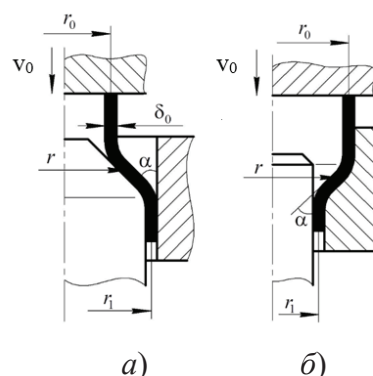


Рис. 1. Схемы процессов:

а – раздача; б – обжим

Fig. 1. Process diagrams:

а – expansion; б – pressing

При плоском напряженном состоянии анизотропного материала на конусе оснастки эквивалентные деформация, скорость деформаций и напряжение выражаются соотношениями [8, 9]:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_e &= \pm \lambda f n \frac{r}{r_0}, \\ \xi_e &= \pm \frac{d\epsilon_e}{dt} = \pm \lambda_1 \frac{v_r}{r}, \\ \sigma_e &= A \epsilon_e^m \cdot \xi_e^n = A \lambda_1^{m+n} \cdot r_0^{nf} \cdot r^{-n(1+f)} \cdot \left(\ln \frac{r}{r_0} \right)^m \cdot v_0^n. \end{aligned} \right\} (1)$$

Здесь скорость движения точек конуса заготовки по оправке определяется:

$$v_r = \pm v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^f, \quad (2)$$

где знак «+» соответствует раздаче; «-» – обжиму;

$$\lambda_1 = \left[\frac{2(2+R)}{3(1+R)} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad f = \frac{R}{1+R} \quad - \text{коэффициенты,}$$

учитывающие анизотропию материала заготовки; R – коэффициент анизотропии; r_0, r – радиус заготовки и текущий радиус на конусе; v_0 – скорость раздачи; A, m, n – константы материала, связанные с деформационным упрочнением и разупрочнением при вязко-пластическом деформировании.

Рассмотрим операцию раздачи, где меридиональное и окружное напряжения соответственно $\sigma_r < 0, \sigma_\phi > 0$. Система из уравнения равновесия и условия текучести анизотропного материала имеет вид [11]:

$$\left. \begin{aligned} r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\phi &= 0, \\ \sigma_\phi - \sigma_r &= \gamma \sigma_e. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$(4)$$

Подстановка условия (4) в уравнение (3) позволяет установить радиальные и окружные напряжения в виде:

$$\sigma_r = -\frac{\gamma K}{\eta} (r^\eta - r_1^\eta) v_0^n; \quad (5)$$

$$\sigma_f = \sigma_r + \gamma K v_0^n. \quad (6)$$

Здесь при учете выражений (1), (2)

$$K = \lambda_1^{m+n} \cdot A r_0^{nf} \cdot \left(\ln \frac{r_1}{r_0} \right)^m; \quad \eta = -n(1+f);$$

$$\gamma = \frac{2}{\sqrt{2}} \left(\frac{1+R}{1+2R+\mu_\sigma^2} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где γ – коэффициент, учитывающий анизотропию материала [10];

$$\mu_\sigma = -\frac{\sigma_f + \sigma_r}{\sigma_f - \sigma_r},$$

где μ_σ – коэффициент вида напряженного состояния.

При обжиме трубы напряжения $\sigma_r < 0; \sigma_\phi < 0$. Условие текучести:

$$\sigma_\phi = -\gamma \sigma_e \quad (7)$$

при подстановке в уравнение (3) приводит к неоднородному уравнению:

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

решение которого получим в виде:

$$\sigma_r = -\frac{\gamma K}{\eta r} (r^\eta - r_1^\eta) v_0^n, \quad (8)$$

где $\eta = 1 - n(1+f)$.

Увеличение меридионального напряжения вызывает трение заготовки на конусе инструмента. Контактное нормальное напряжение можно определить по формуле равновесия Лапласа [3]:

$$\frac{\sigma_r}{\rho} + \frac{\sigma_\phi}{r} \cos \alpha = -\frac{\sigma_k}{\delta_0}. \quad (9)$$

При этом $\rho = \infty$ – меридиональный радиус заготовки; σ_k – контактное давление; δ_0 – толщина стенки трубы; α – угол конуса изделия. Из формулы (9) следует, что

$$\sigma_k = -\frac{\delta_0}{r} \sigma_\phi \cos \alpha.$$

Дополнительное напряжение в связи с трением определим как

$$\sigma_{\text{доп}} = -\mu \sigma_k = -\frac{\mu \delta_0}{r} \sigma_\phi \cos \alpha, \quad (10)$$

где μ – коэффициент трения.

Учитывая выражения (8) и (10), запишем суммарное меридиональное напряжение в виде:

$$(\sigma_r)_\Sigma = \sigma_r + \sigma_{\text{доп}}. \quad (11)$$

Максимальная сила операций может быть рассчитана по выражению:

$$F = 2\pi r_0 \delta_0 (\sigma_r)_\Sigma \cdot \sin \alpha \quad (12)$$

при $r = r_0$; $|\mu_c| = 1$.

Напряжения и сила зависят от степени деформирования и скорости операции. В соответствии с условием несжимаемости материала заготовки

$$\xi_r + \xi_\phi + \xi_z = \frac{dv_r}{dr} + \frac{v_r}{r} + \frac{v_r d\delta}{\delta dr} = 0$$

получим соотношение для расчета толщины стенки конуса изделия, т. е.

$$\delta_{кр} = \delta_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{1-f}. \quad (13)$$

Рассчитаем повреждаемость материала исходной заготовки по уравнениям кинетики повреждаемости [3, 8, 11]. Используем выражения (1) и (2) для конической части заготовки. По деформационному уравнению получим:

$$\omega = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{епр}} = \frac{\lambda}{\varepsilon_{епр}} \ln \frac{r_1}{r_0}. \quad (14)$$

По энергетическому уравнению

$$\omega = \frac{1}{A_{пр}} \int \sigma_e \xi_e dt = \frac{\lambda_1}{\eta A_{пр}} K v_0^n \cdot r_0^\eta \left[\left(\frac{r_1}{r_0} \right)^\eta - 1 \right], \quad (15)$$

где $1 \geq \omega \geq 0$ – повреждаемость материала на свободном крае конуса изделия; $\varepsilon_{епр}$, $A_{пр}$ – предельные константы разрушения.

Разрушение материала краевой части заготовки возможно при $\omega = 1$. Соотношения (14), (15) позволяют установить критические условия операций по степени деформирования или скорости.

Результаты расчета

Расчетные данные получены для раздачи краевой части трубы из титанового сплава BT14 при 875 °С. Константы материала: $A = 70$ МПа; $m = 0,1$; $n = 0,07$; $A_{пр} = 630$ МПа. Приняты размеры: $r_0 = 50$ мм, $r_1 = 70$ мм, $\delta_0 = 2$ мм; $\alpha = 45^\circ$. Расчетные максимальные сжимающие напряжения, силы раздачи и повреждаемости края заготовки в зависимости от скорости операции приведены в табл. 1.

1. Расчетные результаты 1. Calculated results

R	v_0 , мм/мин	σ_r , МПа	$\sigma_{доп}$, МПа	$(\sigma_r)_\Sigma$, МПа	F , кН	ω
1,0	10	25,2	0,6	25,8	11,5	0,020
	10^2	30,6	0,8	31,4	13	0,023
2,0	10	20,3	0,5	20,8	9	0,038
	10^2	24,6	0,7	25,3	11	0,044

Обсуждение результатов

Расчетом показано, что напряжения и силы при раздаче и обжиме уменьшаются на 15...20 % в принятом диапазоне скоростей. Снижение силового режима операций связано с релаксацией напряжений, что является проявлением вязких свойств горячего деформируемого материала при медленных внешних нагрузках. При этом снижается повреждаемость материала, что влияет на качество

изделий. Увеличение коэффициента анизотропии также способствует уменьшению силы. Относительная толщина края заготовки после раздачи составила $\delta_{кр} / \delta_0 = 0,8$ при $R = 1$ и $\delta_{кр} / \delta_0 = 0,9$ при $R = 2$. Край утоняется в меньшей степени при увеличении коэффициента анизотропии.

Процессы раздачи и обжима труб отработаны при изготовлении промышленных

изделий из титановых и алюминиевых сплавов. Образцы изделий приведены на рис. 2.

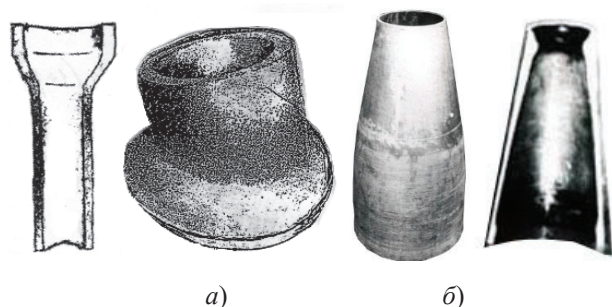


Рис. 2. Образцы изделий:

а – арматура трубопроводов (раздача); б – корпуса (обжим)

Fig. 2. Test parts:

a – pipeline fittings (expansion); b – bodies (pressing)

Вывод

Технологические режимы раздачи и обжима с нагревом в части напряжений, сил, степеней формообразования зависят от упрочнения и ползучести материала заготовок. Фактор ползучести, связанный с релаксацией напряжений, проявляется при низких скоростях операций тем больше, чем меньше скорость формообразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ковка и штамповка: Справочник под. ред. Семенова Е.И.: в 4 т. Т. 4. Листовая штамповка // М.: Машиностроение, 2010. 732 с.
2. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки // М.: Машиностроение, 1978. 278 с.
3. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов в режиме ползучести / С.С. Яковлев, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин и др. М., Машиностроение. 2009. 412 с.
4. Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. М.: Юрайт. 2020. 402 с.
5. Романов К.И. Механика горячего формоизменения металлов. М.: Машиностроение, 1993. 240 с.
6. Чудин В.Н. Процесс горячей раздачи при вязкопластическом деформировании // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. № 5. С. 217–220.
7. Платонов В.И. К расчёту напряжений при раздаче в условиях вязкопластичности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 8. С. 497–500.

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

9. Чудин В.Н. Вязко-пластическое растяжение отверстия при отбортовке нагретого листа // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 10. С. 10–13.

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

11. Теория обработки металлов давлением. В.А. Голеньков, С.П. Яковлев, С.А. Головин и др. / М. Машиностроение. 2009. 442 с.

12. Колмогоров В.А. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург. Уральский государственный технический университет. 2001. 836 с.

REFERENCES

1. Forging and stamping: Handbook, in 4 volumes. Vol. 4: Sheet-metal forming / ed. by E.I. Semenov. Moscow: Mashinostroenie, 2010. 732 p.
2. Popov E.A. Fundamentals of sheet stamping theory. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 278 p.
3. Isothermal shaping with a rigid tool of high-strength anisotropic materials / S.S. Yakovlev, V.N. Chudin et al. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 412 p.
4. Malinin N.N. Creep in metal working. Moscow: Yurayt, 2020, 402 p.
5. Romanov K.I. Mechanics of Hot Forming of Metals. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 240 p.
6. Chudin V.N. Hot expansion under viscoplastic deformation. Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyeni, 2017, no. 5, pp. 217219.
7. Platonov V.I. To the calculation of stresses during distribution under conditions of visco-plasticity/ Proceedings of Tula State University. Technical sciences, 2022, no. 8, pp. 497–500.
8. Chudin V.N. Pipe expansion and pressing under visco-plastic deformation / Vestnik mashinostroyeniya, 2023, no. 4, pp. 349–352.
9. Chudin V.N. Viscous-plastic hole extension when flanging a heated sheet / Science intensive technology in mechanical engineering, 2022, no. 10. pp. 10–13.
10. Iakovlev S.P., Iakovlev S.S., Andreichenko V.A. Forming anisotropic materials. Kishinev, Kvant publ., 1997. 331 p.
11. Theory of pressure metal treatment / ed. Golenkova V.A., Yakovleva S.P. et al. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 442 p.
12. Kolmogorov V.A. The Mechanics of Metal Processing under Pressure: Textbook, UGTU-UI, Ekaterinburg, 2001, 836 p.

Статья поступила в редакцию 19.04.2023; одобрена после рецензирования 27.04.2023; принята к публикации 11.05.2023.

The article was submitted 19.04.2023; approved after reviewing 27.04.2023; assepted for publication 11.05.2023.