

Научная статья
УДК 621.983:539.374
doi:10.30987/2223-4608-2022-10-10-13

Вязко-пластическое растяжение отверстия при отбортовке нагретого листа

Владимир Николаевич Чудин, д.т.н.
МИИТ, г. Москва, Россия

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

Аннотация. Предложены соотношения для расчета деформаций и напряжений, возникающих при растяжении отверстия в операциях отбортовки с нагревом. Принято состояние вязко-пластичности анизотропного материала. Используются уравнения равновесия и условие текучести при схеме плоского напряжённого состояния. Получены соотношения для расчета сплошности материала заготовки. Приведены результаты расчетов.

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

Для цитирования: Чудин В.Н. Вязко-пластическое растяжение отверстия при отбортовке нагретого листа // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №10 (136). – С. 10-13. doi: 10.30987/2223-4608-2022-10-10-13.

Original article

Viscous-plastic hole extension when flanging a heated sheet

Vladimir N. Chudin, Dr.Sc.Tech.
MIIT, Moscow, Russia
vladimir-chudin@vandex.ru

Abstract. Correlations for stress-strain analysis for the cases of the hole extension in flanging when heated are recommended. The state of visco-plasticity of an anisotropic material, is approved in principle. Trim equations and yield conditions are used in the plane stress state sketch. Correlations for the work material continuity are obtained. The results of calculations are given.

Keywords: visco-plasticity, anisotropy, form alterations, strain rate, speed, continuity, material anisotropy

For citation: Chudin V.N. Viscous-plastic hole extension when flanging a heated sheet. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 10 (136), pp. 10-13. doi: 10.30987/2223-4608-2022-10-10-13.

Растяжение отверстия в листовой заготовке происходит при операции отбортовки, применяемой в штамповочном производстве [1, 2]. Технология отбортовки определяется режимами растяжения отверстия в части напряжений, допустимых деформаций и повреждаемости материала заготовки в области деформаций.

Обработка давлением высокопрочных материалов производится в определённых температурно-скоростных условиях. Материал в зонах деформаций наряду с упрочнением проявляет вязкие свойства (ползучесть), что влияет

на силовые режимы процессов [3, 4]. Для разработки техпроцессов обработки давлением необходим учет факторов, влияющих на энергетические режимы процесса и качество изделия. Эти факторы зависят от анизотропии механических свойств обрабатываемого материала и его вязкости (ползучести) при деформировании с нагревом.

На рис. 1 приведена расчетная схема растяжения отверстия в листовой заготовке в процессе отбортовки.

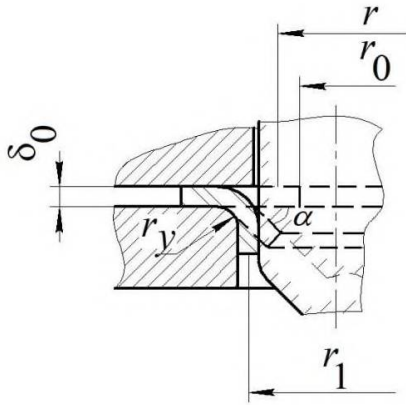


Рис. 1. Расчетная схема растяжения отверстия при отбортовке

Здесь обозначено: r_0 – исходный радиус отверстия в листовой заготовке; r_1 – конечный

$$\left. \begin{aligned} \xi_r &= \frac{dv_r}{dr}, \quad \xi_\varphi = \frac{v_r}{r}, \quad \xi_z = -\xi_r - \xi_\varphi; \\ \varepsilon_r &= \int \xi_r \frac{dr}{v_r} = -f \ln \frac{r}{r_0}, \quad \varepsilon_\varphi = \ln \frac{r}{r_0}, \quad \varepsilon_z = -\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $f = R/(1+R)$; R – коэффициент анизотропии материала заготовки.

Эквивалентные деформация и скорость деформации представим, учитывая выражения (1), (2), в виде:

$$\varepsilon_e = \lambda \ln \frac{r}{r_0}, \quad \xi_e = \frac{d\varepsilon_e}{dt} = \frac{\lambda}{r} v_r, \quad (3)$$

где

$$\lambda = \left[\frac{1+4R(1+R)}{3(2+R)} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Для изотропного материала $R = 1$, $\lambda = 1$.

Эквивалентное напряжение определяется по уравнению состояния при вязкопластичности [3], т.е.:

$$\sigma_e = A \varepsilon_e^m \xi_e^n = A \lambda^{m+n} \left(\ln \frac{r}{r_0} \right)^m \left(\frac{v_r}{r} \right)^n, \quad (4)$$

где A , m , n – константы материала при данной температуре.

Соотношение (4) показывает, что наряду с деформационным упрочнением происходит разупрочнение материала (релаксация напряжений), зависящее от скорости. Учитывая, что $\xi_z = d\delta/\delta dt$, $\varepsilon_z = d\delta/\delta$ с помощью выражений (2) получим толщину заготовки в области деформаций:

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

Для расчета напряжений в области дефор-

мации воспользуемся уравнением равновесия и условием пластичности для анизотропного материала при плоско-напряженном состоянии [6, 7]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r > 0, \quad \sigma_\varphi > 0, \quad \sigma_z = 0; \\ \varepsilon_r < 0, \quad \varepsilon_\varphi > 0, \quad \varepsilon_z < 0. \end{aligned} \right\}$$

При скорости перемещения точек заготовки в процессе деформирования [5, 6]:

$$v_r = v_0 \left(\frac{r_1}{r} \right)^f. \quad (1)$$

Компоненты скорости деформаций и деформаций определяются как:

маций воспользуемся уравнением равновесия и условием пластичности для анизотропного материала при плоско-напряженном состоянии [6, 7]:

$$\left. \begin{aligned} r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - k\sigma_\varphi = 0, \\ \sigma_\varphi = \gamma\sigma_e. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$k = 1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha, \quad \gamma = \frac{2}{\sqrt{2}} \left[\frac{1+R}{1+2R+\mu_\sigma^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

– коэффициент в условии пластичности, учитывающий анизотропию материала; R – коэффициент анизотропии; μ_σ – коэффициент напряженного состояния; μ – коэффициент трения; α – угол конуса пуансона.

Система уравнение (5) приводится к одному неоднородному уравнению:

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r = k\gamma\sigma_e. \quad (7)$$

В соответствии со способом решения неоднородных дифференциальных уравнений [8] решение будем искать в форме:

$$\sigma_r = \frac{1}{r} C(r), \quad (8)$$

где $C(r)$ – некоторая функция радиальной координаты.

Внеся выражение (8) и его производную:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{1}{r} C'(r) - \frac{1}{r^2} C(r)$$

в уравнение (7), получим:

$$C'(r) = k\gamma\sigma_e.$$

Интеграл этого уравнения:

$$C(r) = k\gamma \int \sigma_e dr = k\gamma K \left(\frac{r^2}{\eta} + C \right). \quad (9)$$

Здесь величина эквивалентного напряжения выражается соотношением (4) в виде:

$$\sigma_e = Kr^{-n(1+f)};$$

$$K = A\lambda^{m+n} r_1^{nf} \left(\ln \frac{r_1}{r_0} \right)^m v_0^n; \quad (10)$$

$$\eta = 1 - n(1+f).$$

Выражение (9) внесем в зависимость (8) и при условии $r = r_0$, $\sigma_r = 0$ определим константу интегрирования в этом выражении. Выражение (9) с известной константой внесем в формулу (8). Получим зависимость для меридионального напряжения:

$$\sigma_r = \frac{k\gamma}{\eta} K \left[1 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^\eta \right] r^{n-1}.$$

При учете изгиба заготовки на угловой поверхности матрицы [2] меридиональное напряжение получает вид соотношения:

$$(\sigma_r)_\Sigma = \sigma_r + \frac{\sigma_e \delta_0}{4r_\delta}, \quad (11)$$

где r_δ – угловой радиус изгиба заготовки.

Окружное напряжение следует из условия пластичности при подстановке выражения (4). Максимум силы процесса определяется с помощью напряжения (11), т.е.:

$$F = 2\pi r_1 \delta_0 (\sigma_r)_\Sigma \sin \alpha \quad (12)$$

при $\mu_\sigma = -1$, $\alpha = \pi/2$, $r = r_1$.

При растяжении отверстия теряется исходная сплошность материала заготовки. Опасным в части возможного разрушения является край отверстия. Используя уравнение кинетики несплошности [3] с помощью выражений (3) и (10) запишем энергетическое уравнение сплошности:

$$\psi = 1 - \frac{1}{A_{\text{пр}}} \int \sigma_e \xi_e dt = 1 - \frac{A\lambda^{1+m+n}}{A_{\text{пр}} n(1+f)} \left(\frac{v_0}{r_1} \right)^n \left(\ln \frac{r_1}{r_0} \right)^m \left[\left(\frac{r_1}{r_0} \right)^{n(1+f)} - 1 \right] \quad (13)$$

Здесь $1 \geq \psi \geq 0$ – сплошность материала;

$A_{\text{пр}}$ – предельная энергетическая константа разрушения.

$$\psi = 1 - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{e\text{пр}}} = 1 - \frac{\lambda}{\varepsilon_{e\text{пр}}} \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (14)$$

деформационное уравнение сплошности;

$\varepsilon_{e\text{пр}}$ – предельная эквивалентная деформация.

При условии $\psi = 0$ возможно разрушение заготовки. Предельные константы в уравнениях (13), (14) зависят от жесткости схемы напряжений. На крае отверстия:

$$\sigma_\varphi = \gamma\sigma_e, \quad \sigma_r = 0; \quad \sigma_z = 0$$

и жесткость определяется как:

$$\Delta = \frac{1}{3\sigma_e} (\sigma_r + \sigma_\varphi + \sigma_z) = \frac{1}{3} \gamma, \quad (15)$$

где σ_e – напряжение (10) при $r = r_0$.

При известной жесткости (15) предельные константы рассчитываются по выражениям [3]:

$$A_{\text{пр}} = A_1 \exp(\Delta \cdot C_1); \quad \varepsilon_{e\text{пр}} = A_2 \exp(\Delta \cdot C_2), \quad (16)$$

где A_1, A_2, C_1, C_2 – эмпирические коэффициенты.

Расчеты растяжения отверстия выполнены применительно к операции отбортовки листовой заготовки из титанового сплава ВТ14 при 875 °С. Константы уравнения состояния материала: $A = 70 \text{ МПа}$; $m = 0,1$; $n = 0,07$; $R = 0,5$. Приняты размеры: $r_0 = 25 \text{ мм}$; $r_1 = 50 \text{ мм}$; $\delta_0 = 2 \text{ мм}$; $r_\delta = 3 \text{ мм}$. Рассчитаны величины максимальных меридиональных напряжений $\sigma_r(v_0)$ и сплошности материала $\psi(v_0)$ в зависимости от скорости деформирования. Графики приведены на рис. 2.

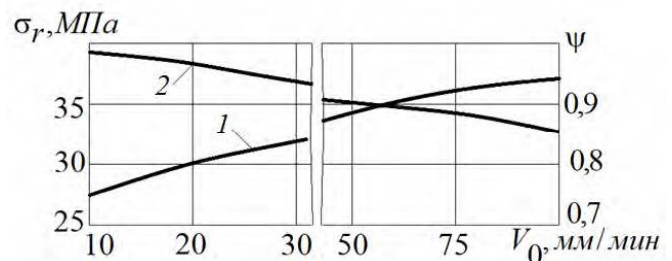


Рис. 2. Графики меридиональных напряжений и сплошности материала:

1 – график $\sigma_r(v_0)$; 2 – график $\psi(v_0)$

Из расчетов и графиков следует, что напряжение и, следовательно, сила операции уменьшаются при снижении скорости деформирования. В переделах заданных скоростей уменьшение напряжения (силы) достигает 30 %. Сплошность материала рассчитана по энергетическому уравнению при $A_{\text{пр}} = 603 \text{ МПа}$.

Исходная сплошность уменьшается незначительно при малых скоростях. На силу операции и сплошность (повреждаемость) влияет также анизотропия механических свойств деформируемого материала [3, 5]. Относительная толщина края отверстия при завершении операции составила $\delta_{кр}/\delta_0 = 0,37$. Изменение толщины тем меньше, чем больше коэффициент анизотропии материала.

Выводы

1. Растяжение отверстия при операции отбортовки сопровождается упрочнением материала заготовки и релаксацией напряжений, зависящей от скорости деформирования.

2. Уменьшение скорости способствует уменьшению напряжений (силы) и повреждаемости материала.

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. **Попов, Е.А.** Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
3. **Изотермическое** формоизменение жестким инструментом высокопрочных анизотропных материалов / С.С. 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. **Чудин, В.Н.** Растяжение отверстия в анизотро-

пной пластине // Известия ТулГУ. Механика деформируемого твердого тела и обработка давлением. – 2004. – Вып. 2. – С. 44-50.

6. **Яковлев, С.П., Яковлев, С.С., Андрейченко, В.А.** Обработка давлением анизотропных материалов. – Кишинев: Квант, 1997. – 331 с.

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

8. **Мышкис, А.Д.** Лекции по высшей математике. – СПб.: Лань, 2009. – 688 с.

REFERENCES

1. Forging and stamping. Handbook, 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. Chudin V.N. Hole extension in an anisotropic plate / Izvestiya of TulGU. Mechanics of deformable solid bodies and pressing, 2004, issue 2, pp. 44-50.
6. Iakovlev S.P., Iakovlev S.S., Andreichenko V.A. Forming anisotropic materials. Kishinev, Kvant publ., 1997. 331 p.
7. Theory of pressure metal treatment / ed. - Golenkova V.A., Yakovleva S.P. et al. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 442 p.
8. Myshkis A.D. Lectures on higher mathematics. St. Petersburg: Lan', 2009, 688 p.

Статья поступила в редакцию 26.04.2022; одобрена после рецензирования 01.05.2022; принята к публикации 03.05.2022.

The article was submitted 26.04.2022; approved after reviewing 01.05.2022; assepted for publication 03.05.2022.

