

Научная статья

УДК 621.7.043, 539.376

doi:10.30987/2223-4608-2022-4-13-17

Технологические режимы прошивки-калибровки при локальном нагреве

Алексей Владимирович Черняев¹, д.т.н., Мария Владимировна Корнюшина², инженер-технолог, Владимир Николаевич Чудин³, д.т.н.

¹ Тульский государственный университет, г. Тула, Россия,

² Филиал АО «КБП» - «ЦКИБ СОО», г. Тула, Россия,

³ Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Россия
1,2,3 mpf-tula@rambler.ru

Аннотация. Приведены основные соотношения для расчета режимов прошивки цилиндрической полой заготовки в условиях вязкопластичности. Использован энергетический метод расчета применительно к осесимметричному полю скоростей перемещений. Выполнены теоретические расчеты давления процесса и повреждаемости материала заготовки.

Ключевые слова: прошивка, вязкопластичный материал, скорость, мощность, давление, повреждаемость

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту НШ-2601.2020.8.

Для цитирования: Черняев А.В., Корнюшина М.В., Чудин В.Н. Технологические режимы прошивки-калибровки при локальном нагреве // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №4 (130). – С. 13-17. doi: 10.30987/2223-4608-2022-4-13-17.

Original article

Technological modes of mold punching-calibrating with local heating

Alexey V. Chernyaev¹, Dr. Sc. Tech., Maria V. Korniyushina², Eng. Tech., Vladimir N. Chudin³, Dr. Sc. Tech.

¹ Tula State University, Tula, Russia

² Branch of JSC "KBP" - "TSKIB SOO", Tula, Russia

³ Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia
1,2,3 mpf-tula@rambler.ru

Annotation The basic relations for calculating the modes of mold punching a cylindrical hollow billet under viscoplastic conditions are given. The energy calculation method is used in relation to the axisymmetric field of displacement velocities. Theoretical calculations of the work material processing pressure and damage rate are performed.

Keywords: mold punching, viscoplastic material, velocity, power, pressure, damage rate

Acknowledgements: the research was conducted within the framework of the grant NSH-2601.2020.8.

For citation: Chernyaev A.V., Korniyushina M.V., Chudin V.N. Technological modes of mold punching-calibrating with local heating / Science intensive Technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.4 (130), pp. 13-17. doi: 10.30987/2223-4608-2022-4-13-17.

Введение

В обработке металлов давлением используется операция прошивки-калибровки цилиндрических пустотелых деталей [1]. Прошивка цилиндра рассмотрена в работе [2] при схеме

плоской деформации. Для толстостенных цилиндрических изделий эта схема не вполне соответствует технологическим данным, т.к. при соотношении диаметра заготовки и толщины стенки $d / \delta < (25 \dots 30)$ изделие считается толстостенным, и расчет режимов

обработки давлением производится при схеме осесимметричной деформации. Рассмотрим в этой связи операцию прошивки-калибровки толстостенного патрубка с косым фланцем (рис. 1).

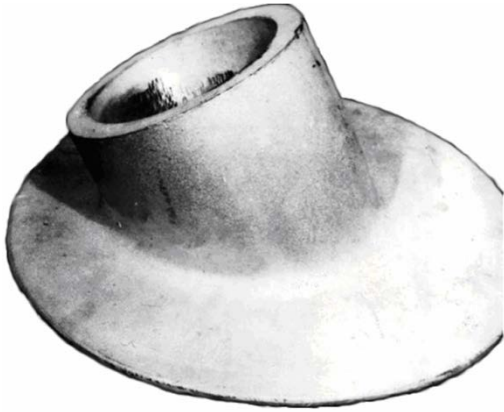


Рис. 1. Патрубок с наклонным фланцем

Схема операции изображена на рис. 2, а. Прошивка заготовок из высокопрочных сплавов производится с нагревом зоны деформаций подвижным индуктором.

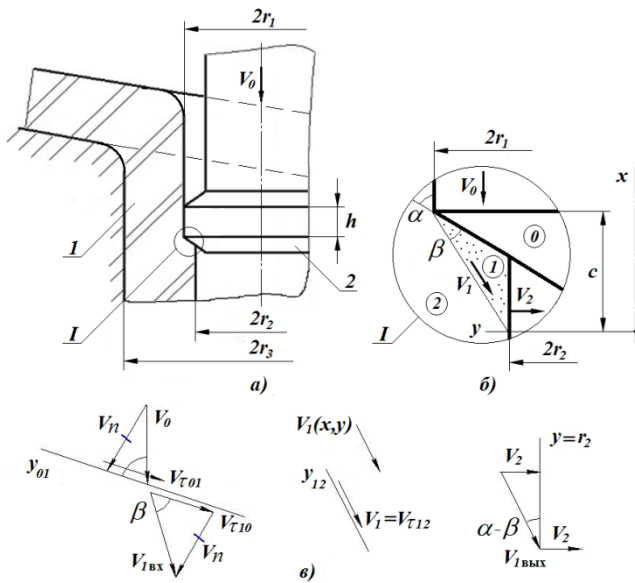


Рис.2. Схема прошивки-калибровки (а), поле (б) и план скоростей (в):

1 – заготовка; 2 – прошивень

Кинематика, мощность, давление

Деформационный и силовой режимы прошивки зависят от температурно-скоростных условий, т.к. материал заготовок при обработке давлением проявляет вязкие свойства [3]. Состояние материала выражается уравнением

ползучести с деформационным упрочнением [4]:

$$\sigma_e = A \left(\int d\varepsilon_e \right)^m \xi_e^n, \quad (1)$$

где σ_e , ε_e , ξ_e – эквивалентные напряжение, деформация, скорость деформации; A , m , n – константы материала при данной температуре. При заданной конечной деформации уравнение (1) отображает релаксацию напряжений, которая тем больше, чем медленнее деформирование.

Технологические режимы прошивки установившимся, используя экстремальную верхнеграницную теорему пластичности [5]. Установим для этого кинематику деформирования, привлекая разрывное поле скоростей перемещений. Поле изображено на схеме рис. 2, б и состоит из блока деформаций «1», ограниченного поверхностью «01» прошивня, поверхностью «12» разрыва скорости и внутренней поверхностью заготовки. Уравнения образующих этих поверхностей и длины соответственно:

$$y_{01} = (x - c) \operatorname{tg} \alpha + r_1; \quad y_{12} = x \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \beta) + r_2; \quad (2)$$

$$y_3 = r_2;$$

$$l_{01} = \frac{r_1 - r_2}{\sin \alpha}; \quad l_{12} = \frac{r_1 - r_2}{\sin(\alpha - \beta)}; \quad (3)$$

$$l_3 = c - (r_1 - r_2) \operatorname{ctg} \alpha,$$

где $c = (r_1 - r_2) \operatorname{ctg}(\alpha - \beta)$; r_1 , r_2 – размеры заготовки.

При осесимметричной прошивке деформации происходят в блоке «1» и на поверхностях «01» и «13». Для расчета кинематики процесса используем план скоростей перемещений. Скорость точек в блоке деформаций зададим функцией координат в виде:

$$v_1 = v_0 \left[1 + \frac{k(y - y_{01})}{y_{01} - r_2} \right] \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \quad (4)$$

где $k = 1 - \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha - \beta) - \cos \alpha \cdot \sin(\alpha - \beta)}$; v_0 – скорость движения прошивня.

Функция (4) соответствует условиям для скорости при входе в блок «1» и выходе из него, т.е.:

$$v_{1\text{вх}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{\sin \beta} \quad \text{при } y = y_{01};$$

$$v_{1\text{вых}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{\cos(\alpha - \beta) - \cos \alpha \sin(\alpha - \beta)} \quad \text{при } y = y_3 = r_2.$$

Скорости деформаций в данном блоке оп-

ределяются с помощью функции скорости (4) и получают вид:

$$\left. \begin{aligned} \xi_x &= \frac{\partial v_{1x}}{\partial x} = \frac{\partial v_1}{\partial x} \cos(\alpha - \beta); \quad \xi_y = \frac{\partial v_{1y}}{\partial y} = \frac{\partial v_1}{\partial y} \sin(\alpha - \beta); \quad \xi_\varphi = -\xi_x - \xi_y; \\ \xi_{xy} &= \frac{\partial v_{1y}}{\partial x} + \frac{\partial v_{1x}}{\partial y} = \frac{\partial v_1}{\partial x} \sin(\alpha - \beta) + \frac{\partial v_1}{\partial y} \cos(\alpha - \beta). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Эквивалентные скорость деформаций, деформацию и напряжение запишем, учитывая выражения (5) и уравнение состояния (1), как:

$$\xi_e = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[2(\xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_\varphi^2) + \xi_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (6)$$

$$\varepsilon_e = \frac{h}{v_0} \xi_e; \quad \sigma_e = A \left(\frac{h}{v_0} \right)^m \xi_e^{m+n}, \quad (7)$$

где h – размер рабочей головки прошивня.
Мощность внутренних сил в блоке деформаций представим с помощью выражений (6), (7) соотношением:

$$N_1 = \int \sigma_e \xi_e dW = 2\pi A y_{ц.т} \left(\frac{h}{v_0} \right)^m \int_0^c \int_{r_2}^{y_{12}} \xi_e^{1+m+n} dy dx, \quad (8)$$

где $y_{ц.т}$ – ордината центра тяжести блока «1» в продольном сечении заготовки.

На поверхности «01» разрыва скорости имеем, используя план скоростей:

$$v_\tau = v_{\tau 10} - v_{\tau 01} = v_0(\operatorname{ctg}\beta - \operatorname{ctg}\alpha); \quad v_n = v_0 \sin \alpha - (9)$$

касательная и нормальная скорости. Эквивалентные деформация, скорость деформаций и напряжение при учете выражений (9) и уравнения (1) здесь соответственно:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_e &= \frac{v_\tau}{\sqrt{3}v_n} = \frac{1}{\sqrt{3}}(\operatorname{ctg}\beta - \operatorname{ctg}\alpha); \quad \xi_e = \left(\frac{v_0}{h} \right) \varepsilon_e; \\ \sigma_e &= A \left(\frac{v_0}{h} \right)^n \varepsilon_e^{m+n}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Мощность на данной поверхности получим с помощью выражений (9), (10), т.е.:

$$N_{01} = \frac{1}{\sqrt{3}} \int \sigma_e v_\tau dS_{01} = \frac{\pi A (r_1^2 - r_2^2)}{h^n} v_0^{1+n} \left[\frac{1}{\sqrt{3}}(\operatorname{ctg}\beta - \operatorname{ctg}\alpha) \right]^{1+m+n} \sin \alpha. \quad (11)$$

Мощность N_{01} характеризует предельное трение на рабочем конусе прошивня.

На поверхности «12»:

$$v_\tau = v_{\tau 12} = v_1 \text{ при } y = y_{12}, \quad v_n = 0. \quad (12)$$

При наличии здесь чистого сдвига имеем:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_e &= \frac{h v_\tau}{\sqrt{3} l_{12} v_0} = \frac{h \sin(\alpha - \beta)}{\sqrt{3}(r_1 - r_2) v_0} v_\tau; \quad \xi_e = \left(\frac{v_0}{h_0} \right) \varepsilon_e; \\ \sigma_e &= A \left(\frac{v_0}{h} \right)^n \varepsilon_e^{m+n}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Мощность на этой поверхности при учете выражений (12), (13):

$$N_{12} = \frac{\pi A (r_1 - r_2)}{(\sqrt{3})^{1+n+m}} \left(\frac{h}{v_0} \right)^m \left(\frac{\sin(\alpha - \beta)}{r_1 - r_2} \right)^{m+n-1} \int_0^c v_1 \Big|_{y=y_{12}} dx. \quad (14)$$

$$N_{\text{тр}} = \mu q(v_0 S_{\text{ц}} + v_{\tau} S_{\text{к}}), \quad (15)$$

где q – давление прошивки-калибровки; $S_{\text{ц}}, S_{\text{к}}$ – площади боковой поверхности и конической рабочей части прошивки; v_{τ} – касательная составляющая скорости (9).

В соответствии с экстремальной верхнеграничной теоремой имеем неравенство:

$$q \leq \frac{N_1 + N_{01} + N_{12}}{v_0 \pi (r_1^2 - r_2^2) / \sin \alpha - q(v_0 S_{\text{ц}} + v_{\tau} S_{\text{к}})}. \quad (17)$$

Давление зависит от деформационного упрочнения материала заготовки и скорости прошивки. Давление (17) необходимо численно минимизировать по углу β при заданном α .

$$\varepsilon_e = \ln \frac{S_0}{S_1}; \quad \xi_e = \frac{1}{t} \ln \frac{S_0}{S_1}; \quad \sigma_e = A \left(\ln \frac{S_0}{S_1} \right)^{m+n} t^{-n}, \quad (18)$$

где $S_0 = \pi(r_3^2 - r_2^2)$; $S_1 = \pi(r_3^2 - r_1^2)$; $t = h/v_0$ – время деформирования участка высотой h .

Воспользуемся уравнениями кинетики повреждаемости [3, 4], учитывая выражения (18). По энергетическому и деформационному уравнениям получим:

$$\omega = \frac{1}{A_{\text{пр}}} \int \sigma_e \xi_e dt = \frac{A}{A_{\text{пр}}} \left(\ln \frac{S_0}{S_1} \right)^{1+m+n} \left(\frac{v_0}{h} \right)^n; \quad (19)$$

$$\omega = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{\text{епр}}} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{епр}}} \ln \frac{S_0}{S_1}, \quad (20)$$

где $0 \leq \omega \leq 1$ – повреждаемость материала; $A_{\text{пр}}$ – предельная работа разрушения на единицу объема блока деформаций; $\varepsilon_{\text{епр}}$ – предельная эквивалентная деформация. Предельные константы разрушения зависят от жесткости схемы напряжений в зоне деформаций [3]. Жесткость для осесимметричной схемы прошивки определяется выражением [6]:

$$\eta = \frac{2}{3} - \frac{q}{\sigma_e},$$

где q, σ_e рассчитываются по зависимостям (17) и (18).

Обсуждение результатов

Расчеты выполнены для прошивки-калибровки внутреннего диаметра патрубка из титанового сплава ВТ6С при 930 °С и сплава алюминия АМг6 при 450 °С. Константы материала приведены в табл. 1.

Принято: $r_1 = 45$ мм; $r_2 = 43$ мм; $r_3 = 50$ мм; $h = 20$ мм; $\alpha = 45^\circ$. Рассчитаны давление операции и повреждаемость в функции скорости.

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

$$N \leq N_1 + \sum N_p + N_{\text{тр}}, \quad (16)$$

где N – мощность внешних сил; $N_1, N_p, N_{\text{тр}}$ – соответственно мощности в блоке деформаций, на поверхностях разрыва скоростей и трения. Внесем в неравенство (16) выражения (8), (11), (14), (15). Получим соотношение:

Повреждаемость материала

Для оценки повреждаемости материала заготовки в зоне деформаций примем соотношения:

1. Характеристики исследуемых материалов

Материал	$T, ^\circ\text{C}$	$A, \text{МПа} \cdot \text{с}^n$	m	n
АМг6	450	66,8	0,104	0,026
ВТ6С	930	36,9	0,028	0,058

2. Результаты расчетов

Материал	$v_0, \text{мм/мин}$	$q, \text{МПа}$	ω
АМг6	1	48	0,16
	10	52	0,24
ВТ6С	1	44	0,27
	10	51	0,27

Из расчетов следует, что давление операции зависит от скорости (длительности). Повреждаемость сплава АМг6 также зависит от скорости. При заданном уменьшении скорости повреждаемость этого сплава уменьшается. Повреждаемость сплава ВТ6С от скорости не зависит. Конечная повреждаемость $\omega < 1$, это свидетельствует об отсутствии разрушения материала и возможности увеличения степени деформации.

Выводы

1. Прошивка-калибровка полости в заготовке из высокопрочных сплавов эффективна при проведении с нагревом зоны деформаций на гидропрессовом оборудовании.

2. Силовой режим процесса зависит от скорости (длительности) деформирования, т.к. происходит релаксация напряжений, что снижает деформационное упрочнение и, следовательно, силу прошивки. Сила тем меньше, чем меньше скорость процесса.

3. Повреждаемость материала в зоне деформаций для ряда материалов также может быть уменьшена при снижении скорости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ковка** и штамповка: справочник: в 4 т., Т.2: Горячая объемная штамповка / А.П. Атрошенко и др. / под ред. Е.И. Семенова. – М.: Машиностроение, 2010. – 720 с.

2. **Чудин, В.Н., Черняев, А.В., Булычев, В.А.** Изотермическая прошивка патрубков с наклонным фланцем // Заготовительные производства в машиностроении. – 2019. – Т. 17. – №3. – С. 110-113.

3. **Изотермическое** формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / С.С. Яковлев и др. – М.: Машиностроение, 2009. – 412 с.

4. **Малинин, Н.Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести: учебник для вузов, 3-е изд., испр. и доп. – М.:

Изд-во Юрайт, 2020. – 402 с.

5. **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.

6. **Черняев, А.В., Чудин, В.Н., Гладков, В.А.** Изотермическое выдавливание утолщений и фланцев на осесимметричных заготовках // Заготовительные производства в машиностроении. – 2021. – №4. – С. 164-167.

REFERENCES

1. Forging and stamping: handbook, in 4 volumes, vol.2: Hot Die Forging/ A.P. Atroschenko et al. / edited by E.I. Semenov/ Moscow, Mashinostroenie, 2010, 720 p.

2. Chudin, V.N., Chernyaev, A.V., Bulychev, V.A. Isothermal drifting of branch pipes with inclined flange./ Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii, 2019, vol. 17, no. 3, pp. 110-113.

3. Isothermal moldability of anisotropic materials in short-time creeping mode using blunt tools / S.S. Yakovlev et al/ Moscow, Mashinostroenie, 2009, 412 p.

4. Malinin, N.N. Applied theory of plasticity and creep: textbook for university students, 3rd ed., update, Moscow: Yurayt Publishing House, 2020, 402 p.

5. The theory of metal treatment by pressure / V.A. Golenkov et al. / edited by V.A. Golenkov, S.P. Yakovlev, 3rd ed., Moscow: Mashinostroenie, 2013, 441 p.

6. Chernyaev, A.V., Chudin, V.N., Gladkov, V.A. Isothermal extrusion modes of thickenings and flanges on axisymmetric workpieces /Zagotovitelni proizvodstva v mashinostroenii, 2021, no. 4, pp. 164-167.

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 20.12.2021; одобрена после рецензирования 21.01.2022; принята к публикации 30.01.2022.

The article was submitted 20.12.2021; approved after reviewing 21.01.2022; accepted for publication 30.01.2022.