

УДК 539.374; 621.983

Грязев М. В.  
Яковлев С. С.  
Ремнев К. С.**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СИЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ С УТОНЕНИЕМ ДВУХСЛОЙНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ УПРОЧНЯЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ**

При изготовлении ряда изделий требуется сформировать такие механические свойства материала изделий, которые обеспечивали надежные условия эксплуатации. К таким изделиям относятся сосуды высокого давления, например, газовые баллоны для автомобильного транспорта. Наиболее рационально перечисленные изделия получать из двухслойных материалов вытяжкой с утонением стенки.

В работах [1–3] выполнены теоретические исследования процесса вытяжки с утонением двухслойных анизотропных материалов с различными механическими свойствами, подчиняющимися условию пластичности Мизеса-Хилла и ассоциированному закону пластическому течению. Анизотропия механических свойств заготовки – цилиндрическая.

Целью работы является оценка силовых параметров процесса: процесс вытяжки с утонением двухслойных анизотропных упрочняющихся материалов, установление влияния технологических параметров на силовые режимы рассматриваемого процесса.

Рассмотрим процесс вытяжки с утонением двухслойных анизотропных упрочняющихся материалов. Отношение диаметра цилиндрической детали к толщине стенки более 20. Допускается, что процесс реализуется в условиях плоского деформированного состояния. Рассматривается плоское радиальное течение материала (рис. 1). На контактных поверхностях детали и инструмента задаются касательные напряжения по закону Кулона. Изменение направления скоростей течения материала на границе очага пластической деформации при входе в него и выходе из него учитывается изменением величины радиального напряжения по методу баланса мощностей [3].

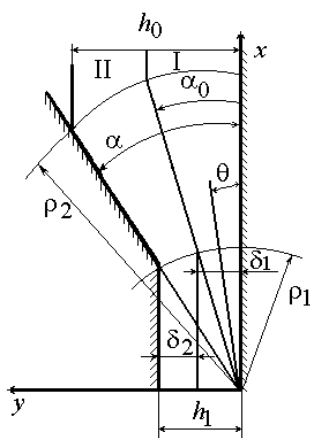


Рис. 1. Схема к расчету кинематики течения двухслойного материала

Реализуется приближенное решение этой задачи с привлечением уравнений равновесия, условия несжимаемости материала, условия пластичности Мизеса-Хилла, уравнений связи между напряжениями и скоростями деформации.

Привлекая уравнения связи между напряжениями и скоростями деформации, интегрируются уравнения равновесия в каждом слое. Этим достигается разделение переменных по скоростям течения и напряжениям. Подробный анализ кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояния, силовых режимов вытяжки с утонением стенки цилиндрических деталей из двухслойных анизотропных материалов изложен в работах [1, 2].

Приведем окончательные выражения для определения значений радиального  $\sigma_{\rho k}$ , тангенциального  $\sigma_{\theta k}$  и касательного  $\tau_{\rho\theta k}$  напряжений:

$$\begin{aligned}\sigma_{\rho k} &= -6\beta_k \Phi_k(\theta) + 4\beta_k c_k \int \left( \Phi_k(\theta) \cos 2\theta + \frac{1}{2} \Phi_k'(\theta) \sin 2\theta \right) \sin 2\theta d\theta + \\ &\quad + 4c_k \beta_k \cos 2\theta \left( \Phi_k(\theta) \cos 2\theta + \frac{1}{2} \Phi_k'(\theta) \sin 2\theta \right) - D_k \beta_k \ln \rho - C_k; \\ \sigma_{\theta k} &= -2\beta_k \Phi_k(\theta) + 4\beta_k c_k \int \left( \Phi_k(\theta) \cos 2\theta + \frac{1}{2} \Phi_k'(\theta) \sin 2\theta \right) \sin 2\theta d\theta - \\ &\quad - D_k \beta_k \ln \rho - C_k; \\ \tau_{\rho\theta k} &= \beta_k \Phi_k'(\theta) - 2c_k \beta_k \left( \Phi_k(\theta) \cos 2\theta + \frac{1}{2} \Phi_k'(\theta) \sin 2\theta \right) \sin 2\theta,\end{aligned}\tag{1}$$

где

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \frac{\tau_{sxy1} \alpha_0}{2V_0 \delta_1}; \quad \beta_2 = \frac{\tau_{sxy2} (\alpha - \alpha_0)}{2V_0 \delta_2}; \quad \Phi_1(\theta) = A_1 e^{2\theta} + B_1 e^{-2\theta} - D_1/4 - V_0 \delta_1 (e^{2\theta} - 1) N_1, \\ \Phi_2(\theta) &= A_2 e^{2\theta} + B_2 e^{-2\theta} - D_2/4 - V_0 \delta_2 (e^{-2\theta} - e^{-2\alpha}) M_2;\end{aligned}$$

$k = 1, 2$ ;  $c_k$  и  $\tau_{sxyk}$  – характеристика анизотропии и сопротивление материала пластическому деформированию в условиях плоского деформированного состояния в плоскости  $x, y$  в первом и втором слоях заготовки [3];  $V_0$  – скорость пуансона;  $h_1$  – толщина стенки получаемой заготовки;  $\alpha$  – угол матрицы;  $\delta_1$  и  $\delta_2$  – толщина первого и второго слоев в готовом изделии соответственно. Остальные условные обозначения приведены на рис. 1.

Задача сводится к нахождению десяти постоянных  $A_k, B_k, C_k, D_k, N_1, M_2$ , которые определяются из следующих условий:

1. Постоянство расхода металла:

$$\int_0^{\alpha_0} V_{\rho 1} \rho d\theta + \int_{\alpha_0}^{\alpha} V_{\rho 2} \rho d\theta = -V_0 (\delta_1 + \delta_2).$$

2. Непрерывность скоростей течения металла на границе раздела слоёв металла:

$$V_{\rho 1}(\rho, \alpha_0) = V_{\rho 2}(\rho, \alpha_0).$$

3, 4. Непрерывность напряжений  $\sigma_{\theta}$  на границе раздела слоёв:

$$\sigma_{\theta 1}(\rho, \alpha_0) = \sigma_{\theta 2}(\rho, \alpha_0).$$

Это условие даёт два соотношения между искомыми неизвестными коэффициентами.

5. Непрерывность касательных напряжений, возникающих на границе раздела слоёв металла:

$$\tau_{\rho\theta 1}(\rho, \alpha_0) = \tau_{\rho\theta 2}(\rho, \alpha_0).$$

6. На контактной поверхности заготовки с пуансоном реализуется закон трения Кулона:

$$\tau_{\rho\theta 1}(\rho, 0) = -\mu_{II} \sigma_{\theta 1}(\rho, 0).$$

7. На контактной поверхности заготовки с матрицей реализуется закон трения Кулона:

$$\tau_{\rho\theta 2}(\rho, \alpha) = -\mu_M \sigma_{\theta 2}(\rho, \alpha).$$

8. Учёт изменения направления течения материала на входе в очаг пластической деформации в первом и втором слоях оцениваем по наибольшей величине угла поворота:

$$\sigma_{\rho 1}(\rho_2, \alpha_0) = \tau_{s1xy} tg \alpha_0, \text{ если } \tau_{s1xy} < \tau_{s2xy},$$

$$\sigma_{\rho 2}(\rho_2, \alpha) = \tau_{s2xy} tg \alpha, \text{ если } \int_{\alpha_0}^{\alpha} \left( \Phi_2(\theta) \cos 2\theta + \frac{1}{2} \Phi_2'(\theta) \sin 2\theta \right) \sin 2\theta d\theta = .$$

9. Удовлетворение дифференциальному уравнению при  $\theta = 0$  :

$$L_1[\Phi_1(0), N_1] = 0.$$

10. Удовлетворение дифференциальному уравнению при  $\theta = \alpha$  :

$$L_2[\Phi_2(\alpha), M_2] = 0,$$

где  $\mu_M$  и  $\mu_{II}$  – коэффициенты трения на контактных поверхностях рабочего инструмента (матрицы и пуансона) и заготовки. Выражения для определения функций  $L_1[\Phi_1(0), N_1]$  и  $L_2[\Phi_2(\alpha), M_2]$  приведены в работах [1–3].

Силу  $P$  процесса на выходе из очага пластической деформации можно определить следующим образом:

$$P = P_1 + P_2 + P_{mp}, \quad (2)$$

где  $P_1 = \pi(d_{II} + \delta_1)P_{x1}$  – сила в первом слое;  $P_2 = \pi(d_{II} + 2\delta_1 + \delta_2)P_{x2}$  – сила во втором слое;  $P_{mp} = \pi\mu_{II}d_{II} \int_{\rho_1}^{\rho_2} |\sigma_{\theta I(\rho, 0)}| d\rho$ ;  $d_{II}$  – диаметр пуансона.

Для определения величин осевого  $\sigma_x$  и касательного  $\tau_{xy}$  напряжений, сил в первом  $P_1$  и втором  $P_2$  слоях воспользуемся формулами преобразования компонент напряжений при повороте осей координат [1].

Запишем окончательные выражения для вычисления  $P_{x1}$  и  $P_{x2}$ :

$$P_{x1} = \int_0^{\alpha_0} \left[ \left( -6\beta_1\Phi_1(\theta) + 4\beta_1 c_1 \int_0^{\theta} \Phi_{11}(\theta) \sin 2\theta d\theta + \right. \right. \\ \left. \left. + 4\beta_1 c_1 \cos 2\theta \Phi_{11}(\theta) - D_1 \beta_1 \ln \rho_1 - C_1 \right) \cos \theta - \right. \\ \left. - (\beta_1 \Phi_1'(\theta) - 2c_1 \beta_1 \Phi_{11}(\theta) \sin 2\theta) \sin \theta \right] \rho_1 d\theta + \tau_{s1xy} \operatorname{tg} \alpha_0 \rho_1 \sin \alpha_0;$$

и

$$P_{x2} = \int_{\alpha_0}^{\alpha} \left[ \left( -6\beta_2\Phi_2(\theta) + 4\beta_2 c_2 \int_{\alpha_0}^{\theta} \Phi_{22}(\theta) \sin 2\theta d\theta + \right. \right. \\ \left. \left. + 4\beta_2 c_2 \cos 2\theta \Phi_{22}(\theta) - D_2 \beta_2 \ln \rho_1 - C_2 \right) \cos \theta - \right. \\ \left. - (\beta_2 \Phi_2'(\theta) - 2c_2 \beta_2 \Phi_{22}(\theta) \sin 2\theta) \sin \theta \right] \rho_1 d\theta + \tau_{s2xy} \operatorname{tg} \alpha \rho_1 (\sin \alpha - \sin \alpha_0),$$

где

$$\Phi_{11} = \Phi_1(\theta) \cos 2\theta + \frac{1}{2} \Phi_1'(\theta) \sin 2\theta;$$

$$\Phi_{22} = \Phi_2(\theta) \cos 2\theta + \frac{1}{2} \Phi_2'(\theta) \sin 2\theta.$$

В последних выражениях учитывается приращение напряжения  $\sigma_x$ , связанного с максимальным поворотом направления течения материала на выходе из очага деформации.

Среднюю величину накопленной интенсивности деформации в каждом слое очага деформации найдем по формулам:

$$\varepsilon_{elcp} = -U(R_1) \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{1}{\alpha_0} \int_0^{\alpha_0} \frac{\psi_1(\theta, c_1)}{\Phi_1(\theta)} d\theta + \\ + \frac{1}{\alpha_0} U(R_1) \int_0^{\alpha_0} (1 - c_1 \sin^2 2\theta)^{1/2} \operatorname{tg} \theta d\theta;$$

$$\varepsilon_{e2cp} = -U(R_2) \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{1}{(\alpha - \alpha_0)} \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{\Psi_2(\theta, c_2)}{\Phi_2(\theta)} d\theta +$$

$$+ \frac{1}{\alpha - \alpha_0} U(R_2) \int_{\alpha_0}^{\alpha} (1 - c_2 \sin^2 2\theta)^{1/2} \operatorname{tg} \theta d\theta,$$

где

$$U(R_k) = \sqrt{\frac{(R_{xk} + R_{yk} + R_{xk} R_{yk})(R_{xk} + R_{yk})}{6 R_{yk} R_{xk} (1 + R_{yk} + R_{xk})(1 - c_k)}}.$$

Имея в своем распоряжении кривые упрочнения материалов слоев, можно найти средние величины в очаге деформации значения  $\tau_{sxy1cp}$  и  $\tau_{sxy2cp}$  по формулам:

$$\tau_{sxy1cp} = (\tau_{xy0,2})_1 + Q_1 (\varepsilon_{e1cp})^{n_1};$$

$$\tau_{sxy2cp} = (\tau_{xy0,2})_2 + Q_2 (\varepsilon_{e2cp})^{n_2}$$

и повторить решение задачи уже с учетом упрочнения материала.

Здесь  $(\tau_{xy0,2})_1$  и  $(\tau_{xy0,2})_2$  – величины сопротивления пластическому деформированию на сдвиг основного и плакированного слоев материалов при остаточной деформации  $\varepsilon_{e1} = \varepsilon_{e2} = 0,002$ ;  $Q_1$  и  $Q_2$ ,  $n_1$  и  $n_2$  – константы кривых упрочнения основного и плакированного слоя материала соответственно.

Полученные соотношения для анализа процесса вытяжки с утонением стенки двухслойного анизотропного материала позволяют установить влияние технологических параметров на силовые режимы исследуемого процесса. Расчеты выполнены для двухслойного материала, механические свойства которого приведены в табл. 1 [4], и изменении технологических параметров процесса: коэффициента утонения  $m_s = h_1 / h_0$ , угла конусности матрицы  $\alpha = 6 - 30^\circ$  и условий трения на инструменте  $\mu_{II} = (1 - 4)\mu_M$  при  $\mu_M = 0,05$ .

Таблица 1

Механические свойства исследуемых материалов

Марка	$(\tau_{xy0,2})_k$ , МПа	$Q_k$ , МПа	$n_k$	$c_k$	$R_x$	$R_y$
Сталь 12ХЗГНМФБА	340,0	275,03	0,435	-0,12	0,55	0,66
Сталь 08Х13	288,0	324,07	0,498	0,11	1,05	0,85

Зависимости изменения относительной величины силы  $\bar{P} = P / [2\pi(d_1 + s_1)s_1(\tau_{sxy0,2})_2]$  от угла конусности матрицы  $\alpha$  при фиксированных величинах коэффициента утонения  $m_s$  и коэффициенте трения на пуансоне  $\mu_{II}$  ( $\mu_M = 0,05$ ) приведены на рис. 2. Анализ графиков и результатов расчета показывает, что с уменьшением коэффициента утонения  $m_s$  и увеличением угла конусности матрицы  $\alpha$  относительная величина силы  $\bar{P}$  возрастают. Интенсивность роста тем выше, чем меньше коэффициент утонения  $m_s$ .

Учет упрочнения существенно уточняет относительную величину силы  $\bar{P}$ , однако не изменяет характер влияния угла конусности матрицы  $\alpha$ , коэффициента утонения  $m_s$  и условий трения на контактных поверхностях рабочего инструмента и трубы ( $\mu_{II} / \mu_M$ ).

Анализ результатов расчетов показал, что изменение условий трения на контактной поверхности пуансона существенно влияет на относительную величину силы  $\bar{P}$ . С ростом коэффициента трения на пуансоне  $\mu_{II}$  (при  $\mu_M = 0,05$ ) величина относительной силы

$\bar{P}$  уменьшается. Этот эффект проявляется существенно на малых углах конусности матрицы  $\alpha$  и величинах коэффициента утонения  $m_s$ ; при углах конусности матрицы  $\alpha = 30^\circ$  увеличение коэффициента трения на пуансоне в четыре раза по сравнению с коэффициентом трения на матрице приводит к незначительному (около 5 %) изменению относительной величины силы  $\bar{P}$ .

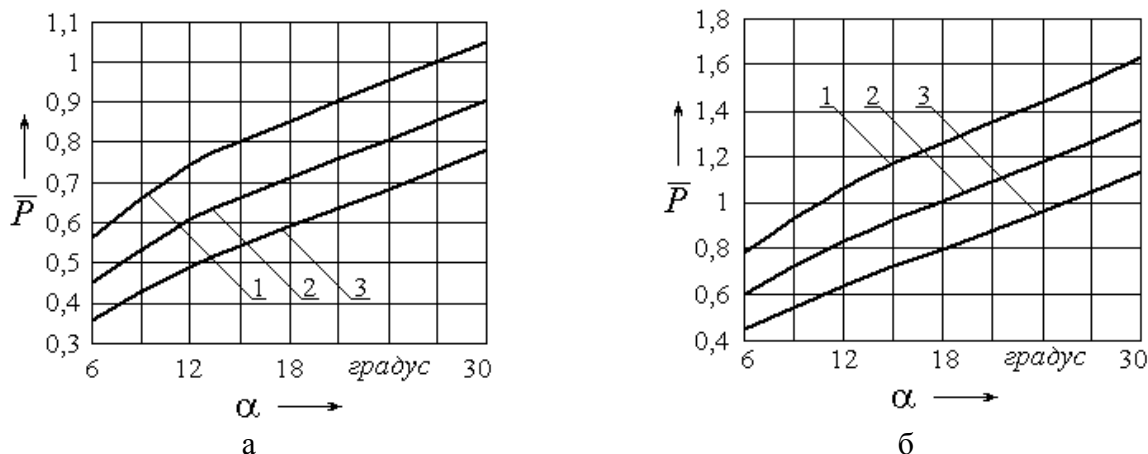


Рис. 2. Зависимость изменения  $\bar{P}$  от  $\alpha$  для двухслойной стали 12X3ГНМФБА+08X13:

а – без учета упрочнения; б – с учетом упрочнения кривая 1 –  $m_s = 0,6$ ; кривая 2 –  $m_s = 0,7$ ; кривая 3 –  $m_s = 0,8$  ( $\delta_{01}/h_0 = 0,25$ ;  $h_0 = 4$  мм)

Установлено, что увеличение коэффициента утонения  $m_s$  приводит к резкому уменьшению относительной величины силы  $\bar{P}$ . Так рост коэффициента утонения с 0,5 до 0,9 сопровождается падением величины  $\bar{P}$  более чем в 3 раза при прочих равных условиях деформирования.

Графические зависимости изменения относительной величины силы  $\bar{P}$  от величины  $\delta_{01}/s_0$  при вытяжке с утонением стенки цилиндрических деталей из двухслойной стали 12X3ГНМФБА+08X13 приведены на рис. 3.

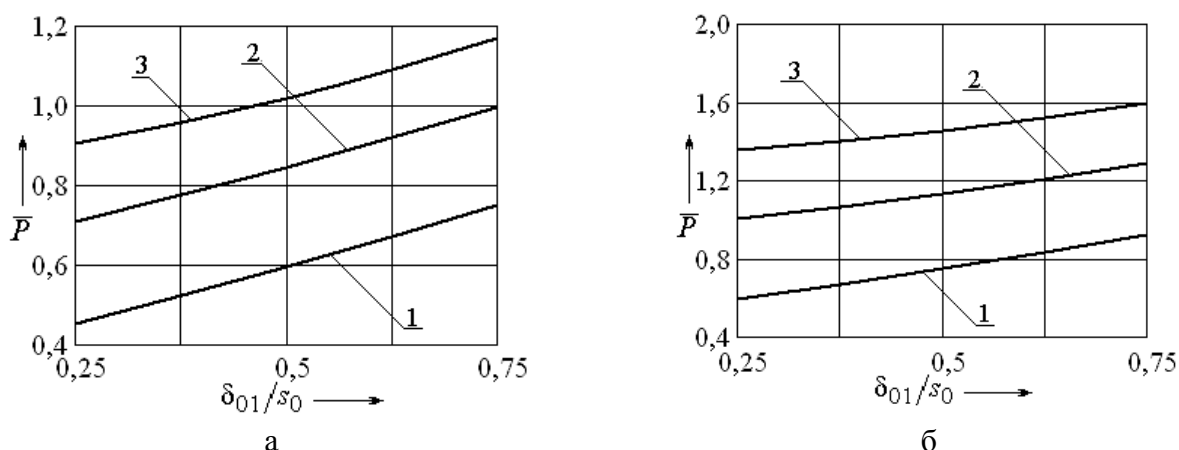


Рис. 3. Зависимость изменения  $\bar{P}$  от  $\delta_{01}/h_0$  для двухслойной стали 12X3ГНМФБА+08X13:

а – без учета упрочнения; б – с учетом упрочнения кривая 1 –  $\alpha = 6^\circ$ ; кривая 2 –  $\alpha = 18^\circ$ ; кривая 3 –  $\alpha = 30^\circ$  ( $\delta_{01}/h_0 = 0,25$ ;  $h_0 = 4$  мм)

Анализ графиков показывает, что с ростом величины  $\delta_{01}/h_0$  относительная величина силы  $\bar{P}$  увеличивается. В ряде случаев вытяжки с утонением стенки из двухслойных материалов может наблюдаться и обратный характер изменения относительной величины  $\bar{P}$ . В первую очередь это зависит от способности того или иного материала к деформационному упрочнению, а также величины коэффициента утонения  $m_s$ .

Приведенные выше соотношения и результаты расчетов могут быть использованы для анализа процесса вытяжки с утонением стенки цилиндрических деталей из двухслойных анизотропных упрочняющихся заготовок.

### ВЫВОДЫ

Проведенные в работе исследования позволяют сделать следующие выводы: выявлено влияние технологических параметров на силовые режимы рассматриваемого процесса вытяжки с утонением двухслойных анизотропных упрочняющихся материалов. Установлено, что учет упрочнения существенно уточняет относительную величину силы  $\bar{P}$ , а так же что с ростом коэффициента трения на пуансоне  $\mu_{II}$  и коэффициента утонения  $m_s$  величина относительной силы  $\bar{P}$  уменьшается. С ростом  $\delta_{01}/h_0$  относительная величина силы  $\bar{P}$  увеличивается.

Работа выполнена в рамках государственного задания на проведение научно-исследовательских работ Министерства образования и науки Российской Федерации на 2014-2020 годы и гранта РФФИ № 13-08-97-519 р\_центр\_а.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев С. П. *Обработка давлением анизотропных материалов* / С. П. Яковлев, С. С. Яковлев, В. А. Андрейченко. – Кишинев : Квант, 1997. – 331 с.
2. Яковлев С. С. *Теория и технология штамповки анизотропных материалов* / С. С. Яковлев, В. Д. Кухарь, В. И. Трегубов; под ред. С. С. Яковлева. – М. : Машиностроение, 2012. – 400 с.
3. Трегубов В. И. *Технологические параметры вытяжки с утонением стенки двухслойного упрочняющегося материала* / В. И. Трегубов, С. П. Яковлев, С. С. Яковлев // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2005. – № 1. С. 29 – 35.*
4. *Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов* / В. А. Голенков, С. П. Яковлев, С. А. Головин, С. С. Яковлев, В. Д. Кухарь; под ред. В. А. Голенкова, С. П. Яковлева. – М. : Машиностроение, 2009. – 442 с.

### REFERENCES

1. *Jakovlev S. P. Obrabotka davleniem anizotropnyh materialov* / S. P. Jakovlev, S. S. Jakovlev, V. A. Andrejchenko. – Kishinev : Kvant, 1997. – 331 s.
2. *Jakovlev S. S. Teorija i tehnologija shtampovki anizotropnyh materialov* / S. S. Jakovlev, V. D. Kuhar', V. I. Tregubov; pod red. S. S. Jakovleva. – M. : Mashinostroenie, 2012. – 400 s.
3. *Tregubov V. I. Tehnologicheskie parametry vyjzazhki s utoneniem stenki dvuhslojnogo uprochnjajushhegosja materiala* / V. I. Tregubov, S. P. Jakovlev, S. S. Jakovlev // *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – 2005. – № 1. S. 29 – 35.*
4. *Teorija obrabotki metallov davleniem. Uchebnik dlja vuzov* / V. A. Golenkov, S. P. Jakovlev, S. A. Golovin, S. S. Jakovlev, V. D. Kuhar'; pod red. V. A. Golenkova, S. P. Jakovleva. – M. : Mashinostroenie, 2009. – 442 s.

Грязев М. В. – д-р техн. наук, проф., ректор ТулГУ  
Яковлев С. С. – д-р техн. наук, проф. ТулГУ  
Ремнев К. С. – канд. техн. наук, доцент ТулГУ

ТулГУ – ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула, Россия.

E-mail: [mpf-tula@rambler.ru](mailto:mpf-tula@rambler.ru)

Статья поступила в редакцию 14.09.2014 г.