УДК 621.983; 539.374

Ларин С. Н.
Платонов В. И.
Чарин А. В.

К ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕССЕ ПНЕВМОФОРМОВКИ МНОГОСЛОЙНЫХ ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ

Стрингерные радиаторные панели из алюминиевых и титановых сплавов используют в корпусных конструкциях летательных аппаратов, где необходимо поддерживать заданный температурный режим. Данные панели устанавливают по внутренним и наружным поверхностям корпусов приборных и специальных отсеков. Радиаторная панель представляет собой конструкцию из двух беззазорно соединенных листов с каналами между ними для циркуляции теплоносителя. Профиль сечения канала имеет заданную геометрию – круглую или прямоугольную в сечении канала, а сам канал может быть одно- или двухсторонним. Технологический процесс производства радиаторных панелей сводится к проведению на одной позиции обработки процессов, состоящих из последовательно выполняемых операций диффузионной сварки давлением газа двух листов и горячего формообразования каналов газом, подаваемым между листами [1–3].

Цель работы – повышение эффективности изотермической пневмоформовки в режиме кратковременной ползучести путем теоретического обоснования влияния механических свойств исходного материала, геометрических параметров заготовки и параметров оборудования на напряженное и деформированное состояния, силовые режимы и предельные возможности рассматриваемого процесса.

Под кратковременной ползучестью понимается медленное деформирование в условиях вязкого или вязкопластического течения, упругими составляющими деформации пренебрегаем [1–3]. Конструкции, состоящие из нескольких слоев получают за счет воздействия на предварительно соединенные листы газом до полного их прилегания [1–3]. Примем, что формовка происходит за две стадии: свободная формовка и формообразование элементов в углах конструкций (рис. 1). На рис. 1 ρ_1 *и* α_1- радиус формируемой заготовки и угол, при заданной высоте $H = H_1$.

Исследуем вторую стадию формовки конструкций. Будем считать, что нам известны давление формовки, высота получаемого изделия H_1, полученную повреждаемость ω_1, изменение толщины изделия $h_1 = h_1(\varphi)$ в определённый момент времени $t = t_1$ и φ – угол, характеризующий положение точки в угле изделия. Учтем, что оси координат x, y, z совпадают с главными осями анизотропии и направлением прокатки листа. Предположим, что вдоль оси x размер исследуемого элемента значительно больше других размеров, что означает то, что реализуется плоская деформация. Мы учитывали, что изделие формуется в условиях плоского напряженного состояния, т.е. $\sigma_z = 0$.

Реализуется такая схема формовки при следующих параметрах $t > t_1$. В расчетах мы принимаем, что толщина заготовки изменяется одинаково в каждой точке изделия от начальных параметров, и форма в углах изделия имеет форму окружности.

Вследствие одинаковости условий формоизменения в вершине и на краях изделия, нами принимается во внимание, то, что деформированное состояние – равномерное.

Разобьём вторую стадию на два этапа, на первом из которых образуется участок оболочки плоско формы рядом с вершиной, что связано с влиянием скольжения относительно остальной части детали до времени, когда $S = S_* = a - H_1$. В дальнейшем реализуется симметричное деформирование заготовки относительно оси симметрии $O_1 O'$, с учетом скольжения. На двух этапах формовки течение материала – радиальное.

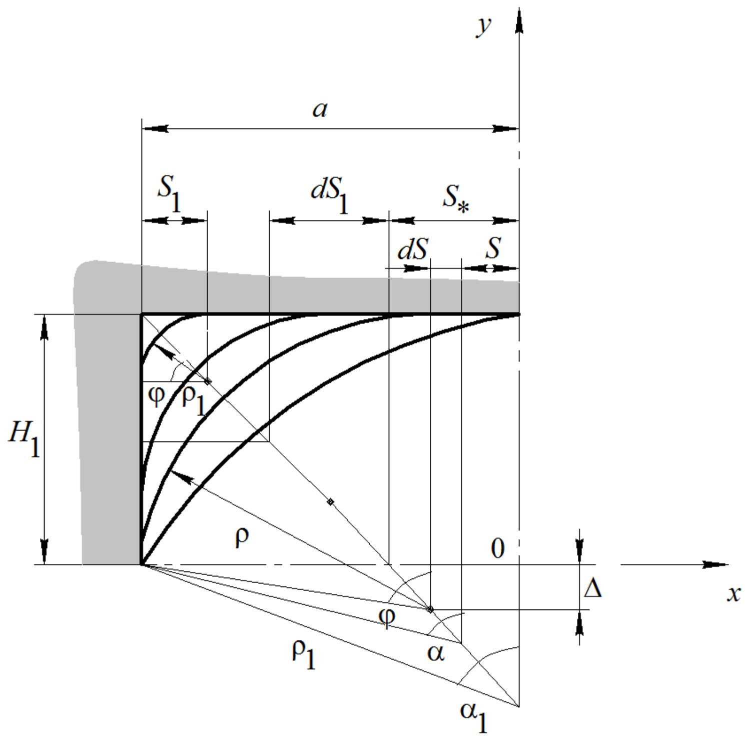

Рис. 1. Схема к анализу формоизменения угловых элементов на первом и втором этапах второй стадии деформирования

Материалы, подвергаемые деформированию, могут проявлять различные свойства, связанные с зависимостью протекания процесса от скорости деформации. Вначале исследуем формовку листовых материалов, чьи свойства подчиняются энергетической теории ползучести и повреждаемости. В данном случае $\sigma_e < \sigma_{e0}$. Поведение самого материала заготовки, можно описать данными выражениями $\xi_e^c = \dfrac{B(\sigma_e/\sigma_{e0})^n}{(1-\omega_A^c)^m}$; $\dot{\omega}_A^c = \dfrac{\sigma_e \xi_e^c}{A_{np}^c}$.

Запишем формулы, с помощью которых можно вычислить значения эквивалентного напряжения σ_e и эквивалентной скорости деформации ξ_e^c на этапе, когда образуется участок оболочки плоской формы рядом с вершиной

$$\sigma_e = D_1 \sigma_y = D_1 \frac{p\rho}{h}, \tag{1}$$

$$\xi_e^c = C_1 \xi_y^c = C_1 F(S) \dot{S}, \tag{2}$$

где
$$D_1 = \frac{1}{1+R_x} \sqrt{\frac{3R_x\left(R_y + (1+R_x)^2 + R_y R_x\right)}{2\left(R_x + R_x R_y + R_y\right)}}$$

$$C_1 = \frac{\sqrt{2\left(R_x + R_x R_y + R_y\right)}\left(R_x R_y^2 + R_x R_y (1+R_x)^2 + R_x^2 R_y^2\right)^{1/2}}{\sqrt{3} R_x R_y^{1/2}\left(R_x + R_y + 1\right)}.$$

Полученные значения σ_e и ξ_e подставим в уравнение $\xi_e^c = \dfrac{B(\sigma_e/\sigma_{e0})^n}{(1-\omega_A^c)^m}$, получим

$$p^n dt = \frac{C_1 \sigma_{e0}^n (1-\omega_A^c)^m h^n 2^n H_1^n F(S) dS}{\left[(a-S)^2 + H_1^2\right]^n D_1^n B}, \tag{3}$$

где h можно найти по формуле $h(\varphi, t+\Delta t) = h(\varphi, t)K(t+\Delta t)$.

Используя формулу $\dot{\omega}_A^c = \dfrac{\sigma_e \xi_e^c}{A_{np}^c}$ с учетом полученного ранее повреждаемость заготовки может быть определена по выражению

$$\dot{\omega}_A^c = \frac{C_1 D_1 p\left[(a-S)^2 + H_1^2\right]F(S)\dot{S}}{2H_1 h A_{np}^c}. \tag{4}$$

Считаем, что давление при формовке p одинаково рассредоточено по поверхности листа, в связи с этим для оценки изменения его величины во времени вполне хватит считать корректным случай, когда угол φ, характеризующий положение точки на свободной поверхности оболочки равен $\varphi = \alpha$ при $S = S_i$.

Тогда выражения (2) и (3) решаются совместно методом итераций. Граничные условия для этого решения: $t = t_1$; $H = H_1$; $p = p_1(t_1)$; $\omega_A^c = \omega_{A1}^c(t_1)$; $h = h_1(\varphi)$.

При определенных условиях можно рассмотреть режимы, при которых давление формовки p - заданная функция времени. Так же при реализации условий деформирования, когда либо скорость деформации ξ_e^c либо давление p, величины неизменные. При $\omega_A^c = 1$ величины S_{np} и ρ_{np} можно определить из выражений

$$tg\frac{\alpha}{2} = \frac{H_1}{\grave{a} - S};\ \alpha = 2arctg\frac{H_1}{a-S};\ d\alpha = \frac{2H_1 dS}{(a-S)^2 + H_1{}^2};\ \rho = \frac{(a-S)^2 + H_1{}^2}{2H_1};$$

$$d\rho = -\frac{(a-S)dS}{H_1}.$$

При этом реализуется симметричное деформирование заготовки относительно оси симметрии, эквивалентное напряжение σ_e определим по формуле (1), а эквивалентную скорость деформации с помощью данного уравнения

$$\xi_e^c = C_1 \xi_y^c = C_1 \frac{\dot{S}_1}{S_1 + \dfrac{H_1 \dfrac{\pi}{2} + S_*}{2 - \sqrt{2}\dfrac{\pi}{2}}}. \tag{5}$$

По аналогии с приведенным ранее решением были выведены выражения для оценки повреждаемости ω_A^c и давления p

$$p^n dt = \frac{C_1 \sigma_{e0}^n \left(1 - \omega_A^c\right)^m h^n dS_1}{\left(H_1 - S_1\sqrt{2}\right)^n D_1^n B \left(S_1 + \dfrac{H_1 \dfrac{\pi}{2} + S_*}{2 - \dfrac{\pi}{2}\sqrt{2}}\right)}, \tag{6}$$

$$\dot{\omega}_A^c = \frac{C_1 D_1 p\left(H_1 - S_1\sqrt{2}\right)\dot{S}_1}{hA_{np}^c \left(S_1 + \dfrac{H_1 \dfrac{\pi}{2} + S_*}{2 - \dfrac{\pi}{2}\sqrt{2}}\right)}, \tag{7}$$

где h находится по формуле $h(\varphi,\ t+\Delta t) = h(\varphi,\ t)K(t+\Delta t)$; $C_1 D_1 = 1$.

Данная система решается при следующих граничных условиях

$$t = t_2 \; S = S_*, \; p = p_2(t_2), \; \omega_A^c = \omega_{A2}^c(t_2), \; h(\varphi) = h_2(\varphi, t_2).$$

Выражения (6) и (7) решаются, как и в предыдущем случае, на первом этапе рассматриваемой стадии деформирования. Нужное нам значение p определяется в точке $\varphi = \dfrac{\pi}{2}$ на каждом этапе формовки S_1.

Считая $\omega_e^c = 1$, найдем предельные возможности формовки. Значение ρ_{1np} найдем по формуле $\rho_1 = H_1 - S_1$.

Теперь рассмотрим формовку листовых материалов, чьи свойства подчиняются кинетическим уравнениям ползучести и повреждаемости. Поведение материала заготовки можно описать выражениями $\xi_e^c = B\left(\dfrac{\sigma_e}{\sigma_{e0}}\right)^n \dfrac{1}{\left(1-\omega_e^c\right)^m}$; $\dot{\omega}_e^c = \dfrac{\xi_e^c}{\varepsilon_{enp}^c}$.

Определим накопление повреждаемости ω_e^c на этапе, когда образуется участок оболочки плоской формы рядом с вершиной. Для чего формулу для оценки эквивалентного напряжения σ_e из уравнения состояния $\xi_e^c = B\left(\dfrac{\sigma_e}{\sigma_{e0}}\right)^n \dfrac{1}{\left(1-\omega_e^c\right)^m}$ подставим в $\dot{\omega}_e^c = \dfrac{\xi_e^c}{\varepsilon_{enp}^c}$, получим

$$\dot{\omega}_e^c = \frac{k}{B}\xi_e^c = \frac{k}{B} C_1 F(S)\dot{S} = \frac{C_1 F(S) dS}{\varepsilon_{enp}^c dt}, \qquad (7)$$

где

$$\frac{k}{B} = \frac{1}{\varepsilon_{enp}^c}.$$

Проинтегрировав это выражение, найдем ω_e^c как функцию S при граничных условиях $t = t_1$, $S = 0$, $\omega_e^c(t_1) = \omega_{e1}^c(t_1)$. Значение S_{np} найдем из условия $\omega_e^c = 1$, а ρ_{np} - по выражения $tg\dfrac{\alpha}{2} = \dfrac{H_1}{\grave{a} - S}$; $\alpha = 2arctg\dfrac{H_1}{a-S}$; $d\alpha = \dfrac{2H_1 dS}{(a-S)^2 + H_1^2}$; $\rho = \dfrac{(a-S)^2 + H_1^2}{2H_1}$; $d\rho = -\dfrac{(a-S)dS}{H_1}$..

Давление p рассчитаем по формуле $p^n dt = \dfrac{C_1 \sigma_{e0}^n \left(1-\omega_A^c\right)^m h^n 2^n H_1^n F(S) dS}{\left[(a-S)^2 + H_1^2\right]^n D_1^n B}$ с подменой в нем ω_A^c на ω_e^c, чье значение найдем из уравнения (7)

$$p^n dt = \frac{C_1 \sigma_{e0}^n \left(1-\omega_e^c\right)^m h^n 2^n H_1^n F(S) dS}{\left[(a-S)^2 + H_1^2\right]^n D_1^n B}. \qquad (8)$$

Повреждаемость ω_e^c и давление p, на этапе, когда реализуется симметричное деформирование заготовки относительно оси симметрии, могут быть найдены из выражений

$$\dot{\omega}_e^c = \frac{k}{B}\xi_e^c = \frac{C_1 \dot{S}_1}{\varepsilon_{enp}^c \left(S_1 + \dfrac{H_1 \dfrac{\pi}{2} + S_*}{2 - \dfrac{\pi}{2}} \right)}; \qquad (9)$$

$$p^n dt = \frac{C_1 \sigma_{e0}^n \left(1-\omega_e^c\right)^m h^n dS_1}{\left(H_1 - S_1\right)^n D_1^n B \left(S_1 + \dfrac{H_1 \dfrac{\pi}{2} + S_*}{2 - \dfrac{\pi}{2}} \right)}, \qquad (10)$$

полученных на основе системы уравнений $\xi_e^c = B\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{e0}}\right)^n \frac{1}{\left(1-\omega_e^c\right)^m}$; $\dot{\omega}_e^c = \frac{\xi_e^c}{\varepsilon_{e\,np}^c}$ после использования в них выражений $h(\varphi, t+\Delta t) = h(\varphi, t) K(t+\Delta t)$, $\dot{\omega}_A^c = \frac{C_1 D_1 p\left[(a-S)^2 + H_1^2\right] F(S)\dot{S}}{2H_1 h A_{np}^c}$.

При начальных условиях: $t = t_2$ $S_1 = 0, p(t_2) = p_2(t_2)$, $\omega_e^c = \omega_{e2}^c(t_2)$, $h(\varphi) = h_2(\varphi, t_2)$ система уравнений (9), (10) решается методом итераций.

Предельная величина S_{1np} находится при $\omega_e^c = 1$.

На базе приведенных уравнений (8)–(10) могут анализироваться первый и второй этапы второй стадии деформирования оболочки при условиях $p = const$ и $\xi_e^c = const$ в какой-либо интересующей нас точке оболочки.

Приведенные выше выражения можно использовать для оценки изменения напряженного состояния заготовки во время пневмоформовки.

Рассмотрим графические зависимости изменения эквивалентного напряжение $\bar{\sigma}_e = \sigma_e / \sigma_{e0}$, напряжений $\bar{\sigma}_x = \sigma_x / \sigma_{e0}$, $\bar{\sigma}_y = \sigma_y / \sigma_{e0}$ от времени деформирования t для алюминиевого АМг6 и титанового ВТ6С сплавов, поведение которых описывается энергетической и кинетической теориями ползучести и повреждаемости для вязкого течения, при температуре обработки 450 и $930^\circ C$, представленные на рис. 2 и 3, при заданном законе изменения давления.

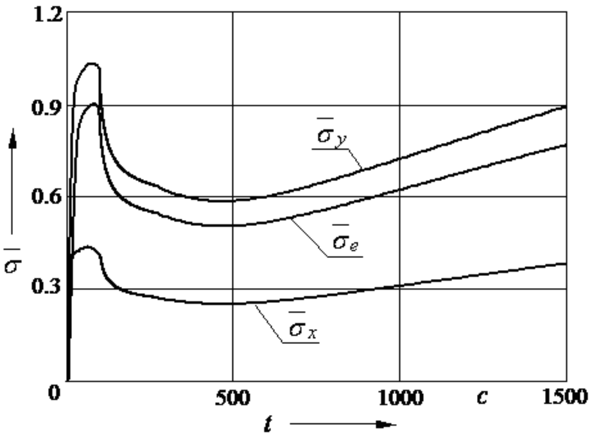

Рис. 2. Зависимости изменения $\bar{\sigma}_e$, $\bar{\sigma}_x$, $\bar{\sigma}_y$ от t для алюминиевого сплава АМг6

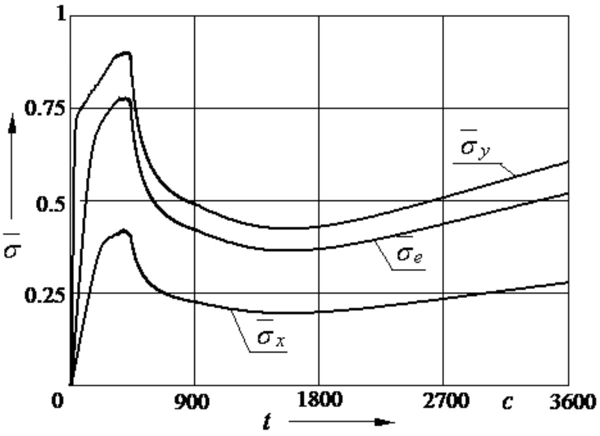

Рис. 3. Зависимости изменения $\bar{\sigma}_e$, $\bar{\sigma}_x$, $\bar{\sigma}_y$ от t для титанового сплава ВТ6С

Результат расчетов показал, что на стадии свободной формовки происходит резкое увеличение относительной величины эквивалентного напряжения $\bar{\sigma}_e$ и напряжений $\bar{\sigma}_x$, $\bar{\sigma}_y$. Во время заполнения угловых элементов наблюдается резкое уменьшение величин напряжений, а затем плавное увеличение. Чем меньше величина радиуса срединной поверхности ρ, тем значение напряжений выше. Максимальная относительная величина эквивалентного напряжения $\bar{\sigma}_e$ при свободной формовке на 17 % больше, чем на стадии заполнения угловых элементов для алюминиевого сплава АМг6, для титанового сплава ВТ6С на 32 %.

На рис. 4 показано изменение относительной величины радиуса срединной поверхности $\bar{\rho}$ от времени деформирования t, для алюминиевого сплава АМг6, поведение которых описывается энергетической теорией ползучести и повреждаемости для вязкого течения, температура обработки $450^{\circ} C$, при заданном законе изменения давления ($p = p_0 + a_n t^{n_p}$ $МПа$).

Анализ результатов расчетов показал, что с увеличением времени деформирования t радиус срединной поверхности $\bar{\rho}$, на первой стадии формовки угловых элементов, резко уменьшается, на второй стадии формовки снижении происходит более плавное (рис. 5). Также необходимо отметить, что на первой стадии формовки угловых элементов повреждаемость ω_A^c увеличивается на 25 %, а на второй стадии на 7 %.

Оценим влияние параметров нагружения на относительную величину радиуса срединной поверхности $\bar{\rho}$ для титанового сплава ВТ6С, поведение которого описывается кинетической теорией ползучести и повреждаемости для вязкого течения при температуре обработки $930^{\circ} C$.

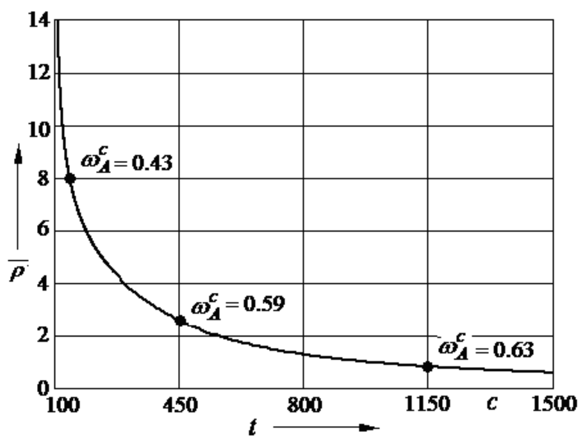

Рис. 4. Зависимости изменения $\bar{\rho}$ от t для алюминиевого сплава АМг6

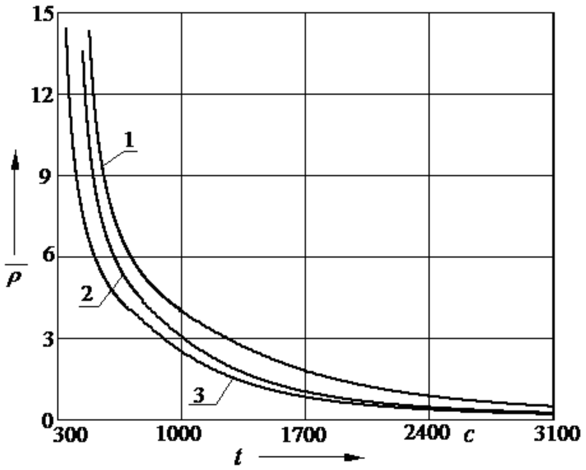

Рис. 5. Зависимости изменения $\bar{\rho}$ от t для титанового сплава ВТ6С при $n_p = 0.65$ ($1 - a_p = 0.04$ $МПа/c^{n_p}$; $2 - a_p = 0.05$ $МПа/c^{n_p}$; 3 - $a_p = 0.06$ $МПа/c^{n_p}$)

Из графиков видно, что с увеличением параметра a_p происходит более интенсивное изменение радиуса срединной поверхности $\bar{\rho}$. В момент времени деформирования $t = 1000$секунд относительная величина радиуса срединной поверхности $\bar{\rho}$ при $a_p = 0.04$ $МПа / c^{n_p}$ больше на 35 %, чем при $a_p = 0.06$ $МПа / c^{n_p}$.

ВЫВОДЫ

Полученные выражения можно использовать для теоретического анализа процесса изотермической пневмоформовки многослойных листовых конструкций с прямоугольными каналами. С помощь приведенных уравнений можно установить влияние анизотропии механических свойств исходного материала, геометрических размеров заготовки и изделия на напряженное и деформированное состояния, геометрические размеры, закона нагружения, кинематику течения материала и предельные возможности процесса изотермической пневмоформовки в режиме кратковременной ползучести, связанные с накоплением микроповреждений и локальной потерей устойчивости заготовки

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № № 16-48-710016 и 16-08-00020.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. Изотермическое деформирование металлов / С.З. Фиглин, В.В. Бойцов, Ю.Г. Калпин, Ю.И. Каплин. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.

3. Изотермическая пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов / С.Н. Ларин [и др.] / под ред. С.С. Яковлева. – М.: Машиностроение, 2009. – 352 с.

REFERENCES

1. 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.

2. Izotermicheskoe deformirovanie metallov / S.Z. Figlin, V.V. Bojcov, Ju.G. Kalpin, Ju.I. Kaplin. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 239 s.

3. Izotermicheskaja pnevmoformovka anizotropnyh vysokoprochnyh listovyh materialov / S.N. Larin [i dr.] / pod red. S.S. Jakovleva. – M.: Mashinostroenie, 2009. – 352 s.

Ларин С. Н. – д-р техн. наук, проф., ТулГУ
Платонов В. И. – канд. техн. наук, доц. ТулГУ
Чарин А. В. – канд. техн. наук, доц. ТулГУ

ТулГУ – Тульский государственный университет, г. Тула, РФ.

E-mail: mpf-tula@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 21.02.2017 г.