УДК 539.376

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ПРОГРАММ ОСАДКИ ЦИЛИНДРОВ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ*

А.М. Локощенко, В.В. Терауд

В работе рассматривается осадка круговых цилиндров в условиях высокотемпературной ползучести. Приводятся результаты исследования деформирования цилиндров без учета образования «бочки» при различных программах нагружения. Определяется оптимальная программа нагружения, которая обеспечивает осадку цилиндра на заданную величину за определённое время с минимально возможным уровнем затраченной энергии. Показано, что отличие энергии деформирования в случае оптимальной программы нагружения от энергии деформирования в случае кинематической программы составляет менее 1%.

Ключевые слова: *ползучесть, высокая температура, осадка, цилиндр, вариационное исчисление, оптимальная программа нагружения.*

COMPARISON OF EFFECTIVENESS OF DIFFERENT PROGRAMS OF CYLINDERS UPSETTING UNDER CREEP

A.M. Lokoshchenko, W.V. Teraud

This paper considers the upsetting of circular cylinders under a high-temperature creep. We present a study of deformation of the cylinder without considering the formation of "barrels" with various programs loading. There has been determined the optimal loading program that provides upsetting of cylinder by a predetermined amount for certain time with the lowest possible level of energy expended. It has been shown that the difference between the deformation energy in the case of optimal loading program and the deformation energy in the case of kinematic program is less than 1%. Therefore, in the manufacturing processes of cylinder upsetting it is appropriate to apply the kinematic loading program.

Keywords: *creep, high temperature, upsetting, cylinder, variational calculation, optimal program of loading.*

Введение

Технологические процессы обработки металлов обычно реализуются при комнатной температуре и при расчетах этих процессов, как правило, используются модели жесткоидеальнопластического тела или жесткопластического тела с упрочнением. При необходимости уменьшения сопротивления металлов необратимому деформированию технологические процессы проводятся в условиях горячей обработки металлов. В этих случаях, несмотря на сравнительно небольшое время деформирования, существенное значение имеет вязкость металла, и поэтому расчеты процессов обработки металлов следует в этих условиях проводить на основе уравнений теории ползучести. Задачи осадки цилиндра в технологическом производстве встречаются часто: при получении поковок нужной высоты, изготовлении шайб, локальных утолщений и др. При этом задачи осадки цилиндров при высоких температурах изучены недостаточно.

В работе [1] приведены результаты испытаний при осадке с кручением при температурах до 1200°С, которые могут быть хорошо описаны с помощью метода, изложенного в работе [2].

* Работа проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 14-08-00580.

В работе [3] приведены результаты испытаний цилиндров из различных сплавов при осесимметричной осадке в интервале температур 20–1200°С. В работе [4] исследовалась осадка цилиндров, нагретых до 1000–1230°С, штампами, температура которых находилась в диапазоне 20–250°С; получено уравнение для расчета средней температуры в образце в процессе осадки. В монографии Н.Н. Малинина [5] приведено решение задачи об осадке сплошных и полых цилиндров в условиях ползучести при различных программах нагружения.

В Институте механики МГУ им. М.В. Ломоносова проведен цикл исследования осадки сплошных и полых цилиндров в условиях ползучести, основные результаты которых опубликованы в работах [6–10]. Была исследована осадки сплошных цилиндров с учетом и без учета бочкообразования и рассмотрена ползучесть полых цилиндров в свободных и стесненных условиях, изучено влияние трения на исследуемые процессы. Теоретическое изучение дополнено экспериментальным исследованием сплошных цилиндров в условиях высокотемпературной ползучести. В этих испытаниях с помощью специальной оптической системы изучалось постепенное образование бочкообразной формы цилиндров в процессе осадки. Получено хорошее соответствие теоретических и экспериментальных значений компонент тензора деформаций ползучести.

Целью данной работы являлось теоретическое исследование осадки круговых цилиндров в условиях установившейся ползучести без учета образования «бочки», при этом ставилась задача найти оптимальную программу нагружения, при которой затрачиваемая энергия на осадку цилиндра будет наименьшей.

Постановка задачи

Рассматривается задача об осесимметричной осадке кругового сплошного цилиндра высотой $2H_0$ и радиусом R_0 (рис. 1) между двумя абсолютно жесткими плитами при высокой температуре. Вследствие симметрии рассматривается только половина цилиндра. Осадка изучается с использованием различных программ нагружения: А – кинематической с постоянной скоростью сближения плит; Б – силовой; В – кинематической с переменной скоростью сближения плит. В первом случае нагружение осуществляется сближением плит с не зависящей от времени t скоростью $w(t) = w_0$ (что соответствует применению прессов с кинематическим приводом), во втором – посредством постоянной сжимающей силы $P(t) = P_0$ (соответственно прессы с гидравлическим приводом), приложенной к плитам, в третьем случае осуществляется кинематическое нагружение с переменной скоростью $w(t)$, зависимость которой определяется из условия минимума затрачиваемой энергии деформирования.

Рассматриваемая постановка задачи основывается на следующих гипотезах и допущениях: пропорциональность девиаторов напряжений и скоростей деформаций ползучести; условие несжимаемости; гипотеза плоских сечений; допущение о независимости всех характеристик напряженно-деформированного состояния цилиндра от осевой координаты; допущение, что упругопластические деформации малы по сравнению с деформациями ползучести, поэтому учитываются только деформации ползучести p_{ij}.

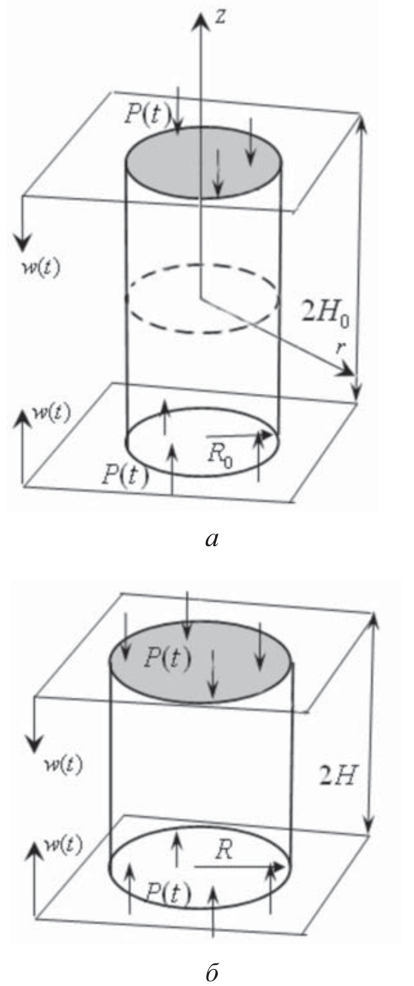


Рис. 1. Исходный цилиндр (*а*) и цилиндр после осаживания (*б*)

Степенная модель установившейся ползучести широко используется учеными всего мира при описании высокотемпературной ползучести; по-видимому, впервые она предложена Бейли (R.W. Bailey) в 1929 г. В качестве связи интенсивности напряжений σ_u и интенсивности скоростей деформаций ползучести $\dot{p}_u$ эта модель представлена в следующем виде [6]:

$$\dot{p}_u = \frac{1}{t_0}\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_0}\right)^m, \tag{1}$$

где $t_0 = t_0(T)$, $\sigma_0 = \sigma_0(T)$, $m = m(T)$ – константы материала при температуре деформирования T.

Данные константы определяются из испытаний образцов на одноосную ползучесть при растяжении. Согласно экспериментальному исследованию [5] в широком диапазоне напряжений характеристики материала для ряда металлических сплавов при растяжении совпадают с соответствующими характеристиками материала при сжатии. Например, для хромомолибденовой стали ЭИ 10 при T = 450°C определены такие значения характеристик установившейся ползучести [12]:

$$\frac{1}{t_0\sigma_0^m} = 9{,}63\cdot 10^{-15}\,\text{МПа}^{-m}\cdot\text{час}^{-1},\ m = 2{,}99.$$

Для хромоникелевовольфрамовой стали 45Х14Н14В2М при T = 600°C [12] (далее в приводимых примерах будет использован этот материал) эти значения такие:

$$\frac{1}{t_0\sigma_0^m} = 2\cdot 10^{-10}\,\text{МПа}^{-m}\cdot\text{час}^{-1},\ m = 3.$$

Из натурных испытаний серии образцов определяются значения параметров m и $\frac{1}{t_0\sigma_0^m}$, выбор конкретных констант t_0 и σ_0 не имеет значения, так как не влияет на получение конкретных значений напряжений и скоростей установившейся ползучести (для определенности можно принять t_0 = 1 час).

Сравнение программ нагружения А и Б

В статье [7] приведен полный вывод всех соотношений для программ нагружения А и Б.

Введем безразмерные переменные:

$$\bar{\sigma}_u = \frac{\sigma_u}{\sigma_0};\ \bar{w} = \frac{t_0 w}{H_0};\ \bar{t} = \frac{t}{t_0},\ \bar{H} = \frac{H}{H_0};$$
$$\bar{P} = \frac{P}{\pi R_0^2\sigma_0};\ \bar{V} = \frac{V}{\pi R_0^2 H_0\sigma_0};\ a = \frac{R_0}{H_0}, \tag{2}$$

где V – энергия деформирования цилиндра.

Для программы А скорость сближения плит постоянна ($\bar{w}(t) = \text{const} = \bar{w}_0$). В этом случае получено:

$$\bar{H}(\bar{t}) = 1 - \bar{w}_0\bar{t};$$
$$\bar{P}(\bar{t}) = \frac{2}{a^2\mu^2}\bar{w}^{\frac{1}{m}}\bar{H}^{2-\frac{1}{m}}\left[\exp\left[a\mu\bar{H}^{-1,5}\right] - \right.$$
$$\left. - a\mu\bar{H}^{-1,5} - 1\right]; \tag{3}$$
$$\bar{V}(\bar{t}) = \int_{\bar{H}}^{1}\bar{P}d\bar{H},$$

где μ – коэффициент трения в законе трения Кулона.

Для силового нагружения (программа Б), при котором сжимающая сила постоянна ($\bar{P}(\bar{t}) = \text{const} = \bar{P}_0$), получены такие соотношения:

$$\bar{w} = \bar{H}\left(\frac{\bar{P}_0}{\beta(\bar{H})}\right)^m,\ \bar{H}(\bar{t}) = 1 - \int_0^{\bar{t}}\bar{w}d\bar{t};$$
$$\beta(\bar{H}) = \frac{2}{a^2\mu^2}\bar{H}^2\left[\exp\left[a\mu\bar{H}^{-1,5}\right] - a\mu\bar{H}^{-1,5} - 1\right];$$
$$\bar{V}(\bar{t}) = P_0(1-\bar{H}). \tag{4}$$

В качестве примера на основе выражений (3) и (4) проводились численные расчеты при следующих параметрах задачи:

a = 1; $\bar{w}_0 = 250000$; $\bar{P}_0 = 77$ (при μ = 0); $\bar{P}_0 = 88$ (при μ = 0,3); m = 3; $\bar{H}_1 = 0{,}75$,

где $\bar{H}_1$ – конечная высота цилиндра.

Результаты вычислений при двух значениях коэффициента трения приведены на рисунках 2–4: μ = 0 (сплошные линии) и μ = 0,3 (штриховые линии).

Сравним программы деформирования А и Б. Рассмотрим деформирование цилиндра до высоты $\bar{H}_1$ за одно и то же время $\bar{t}_1$. На рисунке 2 показано изменение высоты цилиндра во времени для программ А и Б. Зависимости $\bar{H}(\bar{t})$ по программе А для обоих значение коэффициентов трения совпадают и находятся на прямой.

При использовании программы А зависимость, показывающая изменение сжимающей силы $\bar{P}(\bar{t})$ приведена на рис. 3, *а*. Для программы Б на рис. 3, *б* приведена зависимость изменения скорости $\bar{w}(\bar{t})$.

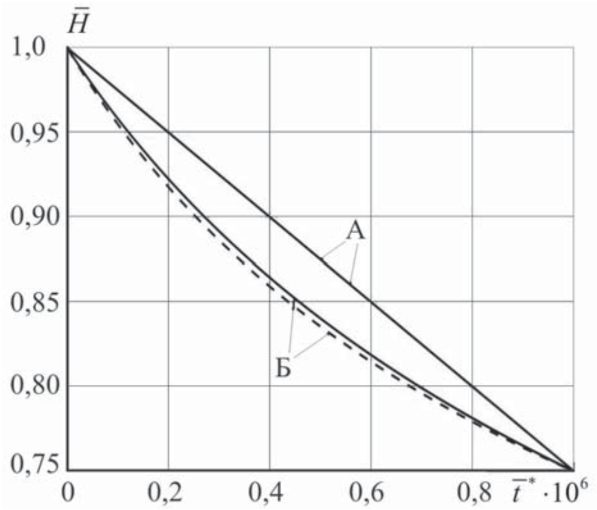


Рис. 2. Изменение высоты цилиндра при нагружении по программам А и Б

Из приведенных результатов следует, что учет трения в задаче Б приводит к увеличению значения необходимой силы (с $\bar{P}_0 = 77$ до $\bar{P}_0 = 88$) и начальной скорости сближения плит (с $\bar{w}(0) = 4{,}5 \cdot 10^5$ до $\bar{w}(0) = 5 \cdot 10^5$). Учет трения увеличивает на 5–15% значения $\bar{P}_0$ и $\bar{w}(0)$ по сравнению с расчетом при допущении о его отсутствии.

На рисунке 4, *а* показаны зависимости энергии $\bar{V}(\bar{t})$, затрачиваемой на осадку цилиндра. Представляет интерес сравнение значений $\bar{V}$ для программ А и Б. Анализ показывает, что энергия деформирования $\bar{V}_1$, затрачиваемая на осадку цилиндра при постоянной скорости сближения плит, меньше, чем энергия деформирования $\bar{V}_2$, требуемая при постоянной сжимающей силе.

На рисунке 4, *б* показаны расчетные результаты для энергии деформирования при двух программах нагружения А и Б при следующих значениях констант:

$$\mu = 0;\ \mu = 0{,}3;\ m = 9;\ \bar{H}_1 = 0{,}6;\ a = 2.$$

Из представленных результатов следует, что выигрыш энергии достигает 20,5%. Вычисления показали, что разность $(\bar{V}_2 - \bar{V}_1)$ возрастает с увеличением коэффициента трения μ и отношения R_0 / H_0.

Базовые соотношения для программы В *при отсутствии трения*

Рассмотрим задачу определения оптимальной кинематической программы нагружения цилиндра при допущении $\mu = 0$ (при этом бочкообразование не происходит), приводящую к минимально возможной энергии деформирования.

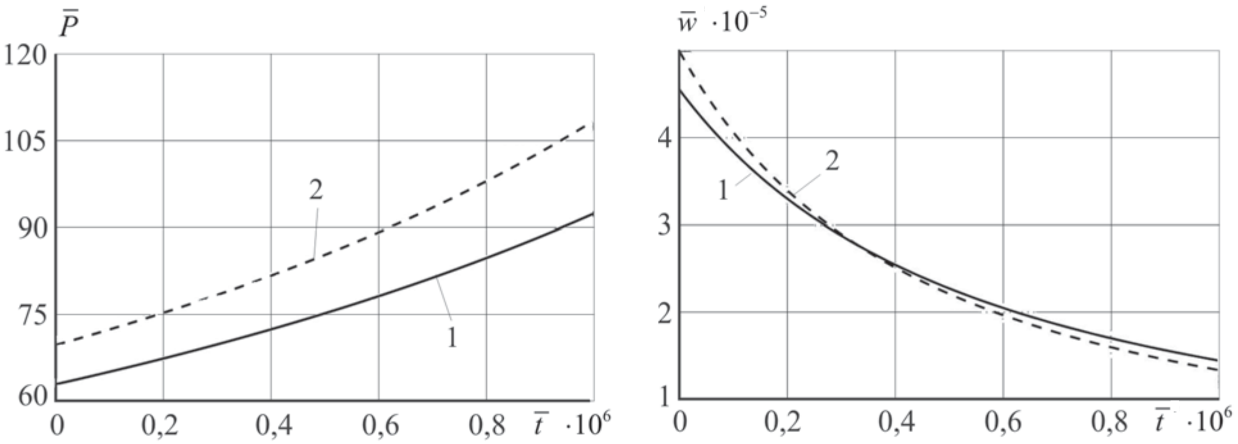
В случае деформирования по кинематической программе нагружения при $\mu = 0$ за время $\bar{t}_1$ до высоты $\bar{H}_1$ из [6] получаем:

$$\bar{H}(\bar{t}) = 1 - \bar{w}_0 \bar{t} = 1 - (1 - \bar{H}_1) \cdot \frac{\bar{t}}{\bar{t}_1};$$

$$\bar{P}(\bar{t}) = \bar{P}_0 \left[\frac{m(1 - \bar{H}_1)}{(\bar{H}_1^{-m} - 1)} \right]^{1/m} \cdot \left[1 - (1 - \bar{H}_1) \frac{\bar{t}}{\bar{t}_1} \right]^{-\frac{m+1}{m}};$$

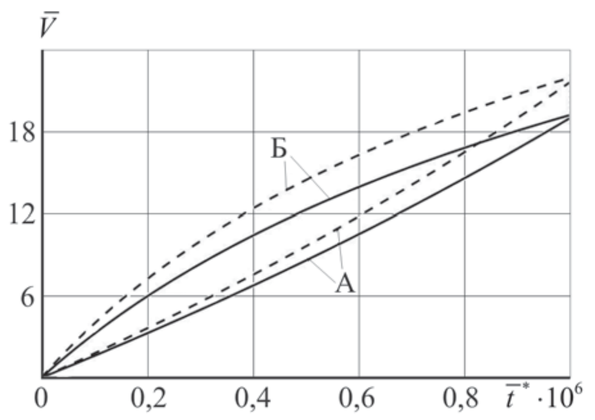
$$\bar{w}_0 = \frac{(1 - \bar{H}_1) m \bar{P}_0^m}{\left[\bar{H}_1^{-m} - 1 \right]};$$

$$\bar{V}_1 = \bar{P}_0 \left[\frac{m(1 - \bar{H}_1)}{\bar{H}_1^{-m} - 1} \right]^{1/m} \cdot m \cdot \left[\bar{H}_1^{-\frac{1}{m}} - 1 \right]. \qquad (5)$$

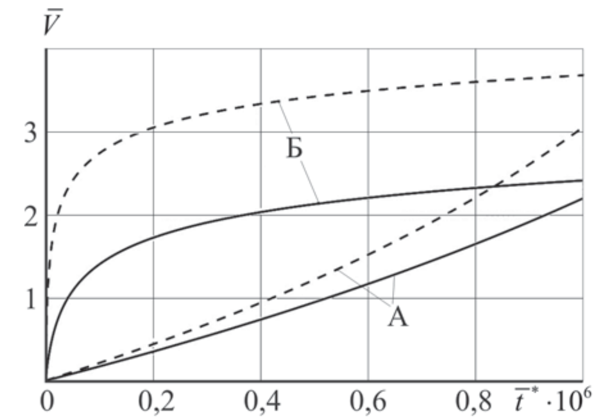


а *б*

Рис. 3. Изменение нагрузки для программы А (*а*) и изменение скорости сближения плит для программы Б (*б*): 1 – μ=0; 2 – μ =0,3



а



б

Рис. 4. Изменение энергии деформирования для программ А и Б:
а – при $m = 3$, $a = 1$; *б* – при $m = 9$ и $a = 2$

В случае деформирования по силовой программе нагружения имеем:

$$\bar w(\bar t) = \bar P_0^m \cdot \bar H^{(m+1)};$$

$$\bar H(\bar t) = \left[\bar P_0^m m\bar t + 1\right]^{-\frac{1}{m}} = \left[1 + (\bar H_1^{-m} - 1)\frac{\bar t}{\bar t_1}\right]^{-\frac{1}{m}};$$

$$\bar t_1 = \frac{1}{m\bar P_0^m}\left[\bar H_1^{-m} - 1\right];$$

$$\bar V_2 = \bar P_0(1 - \bar H_1). \tag{6}$$

Рассмотрим осадку цилиндра, обеспечивающую минимальную энергию деформирования. Из (3) в результате преобразований при $\mu = 0$ имеем

$$\bar P = \left(\frac{\bar w}{\bar H}\right)^{1/m} \cdot \frac{1}{\bar H};$$

$$\bar H = 1 - \int_0^{\bar t} \bar w d\bar t;$$

$$\bar V(\bar t) = \int_{\bar H}^{1} \bar P d\bar H = \int_{\bar t}^{0} \left(-\frac{\dot{\bar H}}{\bar H}\right)^{1/m} \cdot \frac{\dot{\bar H}}{\bar H} d\bar t. \tag{7}$$

Пусть m – отношение нечетных чисел, в этом случае из (7) получаем:

$$\bar V = \int_0^{\bar t_1} \left(\frac{\dot{\bar H}}{\bar H}\right)^{\frac{m+1}{m}} d\bar t, \tag{8}$$

где $\bar V$ – энергия деформирования, затраченная на осадку цилиндра по кинематической программе при переменной скорости $w(t)$.

Необходимое условие экстремума функционала $\bar V = \int_0^{\bar t} \Phi\left[\bar t, \bar H(\bar t), \dot{\bar H}(\bar t)\right] d\bar t$ определяется уравнением Эйлера [11]:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \bar H} - \frac{d}{d\bar t}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\bar H}}\right) = 0, \quad \bar H(0) = 1, \quad \bar H(\bar t_1) = \bar H_1.$$

Из (8) имеем:

$$\Phi = \left(\frac{\dot{\bar H}}{\bar H}\right)^{\frac{m+1}{m}};$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \bar H} = (\dot{\bar H})^{\frac{m+1}{m}} \cdot \left(-\frac{m+1}{m}\right) \cdot \bar H^{\left(-\frac{2m+1}{m}\right)};$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\bar H}} = \left(\frac{m+1}{m}\right) \cdot \frac{\dot{\bar H}^{(1/m)}}{\bar H^{\left(\frac{m+1}{m}\right)}}.$$

Подставляя найденные производные в уравнение Эйлера, получаем дифференциальное уравнение

$$\ddot{\bar H} - (\dot{\bar H})^2 \cdot \bar H^{-1} = 0,$$

решение которого при $\bar H(0) = 1$, $\bar H(\bar t_1) = \bar H_1$ имеет вид:

$$\bar H(\bar t) = \bar H_1^{\left(\bar t/\bar t_1\right)}. \tag{9}$$

Подставляя решение (9) в (7), получаем:

$$\bar w(\bar t) = \frac{-\ln(\bar H_1) m P_0^m}{(\bar H_1^{-m} - 1)} \bar H_1^{\left(\bar t/\bar t_1\right)};$$

$$\bar P(\bar t) = \bar P_0 \cdot \left[\frac{-m \cdot \ln(\bar H_1)}{(\bar H_1^{-m} - 1)}\right]^{1/m} \cdot \bar H_1^{\left(-\bar t/\bar t_1\right)};$$

$$\bar V_{\min} = \left(\frac{\ln(\bar H_1)}{\bar t_1}\right)^{\frac{m+1}{m}} \cdot \bar t_1 = \bar P_0 \cdot \left[\frac{m \cdot (\ln(\bar H_1))^{m+1}}{(\bar H_1^{-m} - 1)}\right]^{1/m}. \tag{10}$$

Выражения (9)–(10) описывают зависимости, обеспечивающие наименьшее значение энергии деформирования $\bar{V}_{\min}$.

Рассмотрим деформирование цилиндра до высоты $\bar{H}_1$ за одно и то же время $\bar{t}_1$ для трех программ А, Б и В. В случае $m = 3$, $\bar{H}_1 = 0,75$ с помощью выражений (5), (6), (9), (10) получаем следующие результаты.

Для программы А:

$$\bar{H}(\bar{t}) = \left(1 - 0,25\frac{\bar{t}}{\bar{t}_1}\right);$$

$$\bar{P}(\bar{t}) = 0,818 \cdot \bar{P}_0 \cdot \bar{H}^{-4/3};$$

$$\bar{w}(\bar{t}) = \bar{w}_0 = 0,547 \cdot \bar{P}_0^3;$$

$$\bar{V}_1 = 0,2470 \cdot \bar{P}_0.$$

Для программы Б:

$$\bar{H}(\bar{t}) = \left(1 + 1,3704\frac{\bar{t}}{\bar{t}_1}\right)^{-1/3};$$

$$\bar{P}(\bar{t}) = \bar{P}_0;$$

$$\bar{w}(\bar{t}) = (\bar{H}(\bar{t}))^4 \bar{P}_0^3;$$

$$\bar{V}_2 = 0,25 \cdot \bar{P}_0.$$

Для программы В:

$$\bar{H}(\bar{t}) = 0,75^{\bar{t}/\bar{t}_1};$$

$$\bar{P}(\bar{t}) = 0,8572 \cdot \bar{P}_0 \cdot 1,333^{\bar{t}/\bar{t}_1};$$

$$\bar{w}(\bar{t}) = 0,630 \cdot \bar{P}_0^3 \cdot \bar{H}(\bar{t});$$

$$\bar{V}_{\min} = 0,2466 \cdot \bar{P}_0.$$

Сравнительный анализ числовых данных для этих решений приведен в табл. 1

Затрачиваемая энергия на деформирование цилиндра при трех программах нагружения при $m = 3$ и $\bar{H}_1 = 0,75$ имеет следующие значения:

$$\frac{\bar{V}}{\bar{P}_0} = \begin{cases} 0,2470 - \text{при } \bar{w}_0 = \text{const}, \\ 0,2500 - \text{при } \bar{P}_0 = \text{const}, \\ 0,2466 - \text{программа В}. \end{cases}$$

Различие энергий деформирования, соответствующих программам нагружения В и А, составляет всего 0,16%.

Сравним полученные решения (5), (6), (9) и (10) при $m = 3$ и $\bar{H}_1 = 0,5$:

$$\frac{\bar{V}}{\bar{P}_0} = \begin{cases} 0,4666 - \text{при } \bar{w}_0 = \text{const}, \\ 0,5000 - \text{при } \bar{P}_0 = \text{const}, \\ 0,4625 - \text{программа В}. \end{cases}$$

Различие значений энергии деформирования, соответствующих кинематическим программам с постоянной и переменной скоростями деформирования, составляет менее 1%.

Сравним полученные решения при $m = 9$ и $\bar{H}_1 = 0,5$. Затрачиваемая энергия на деформирование цилиндра при трех программах нагружения имеет такие значения:

$$\frac{\bar{V}}{\bar{P}_0} = \begin{cases} 0,4256 - \text{при } \bar{w}_0 = \text{const}, \\ 0,5 - \text{при } \bar{P}_0 = \text{const}, \\ 0,4248 - \text{программа В}. \end{cases}$$

Из проведенного исследования можно заключить, что энергетический выигрыш при оптимальной программе нагружения по сравнению с кинематической w_0 = const несущественен. Следует также отметить, что реализация оптимальной программы нагружения по зависимостям (9)–(10) затруднительна вследствие необходимости наличия дорогостоящего оборудования. Поэтому реализация кинематической программы с постоянной скоростью нагружения по сравнению с реализацией

Таблица 1

Сравнение решений для трех программ нагружения при m = 3, $\bar{H}_1$ = 0,75

$\bar{t}/\bar{t}_1$	$\bar{H}(\bar{t})$			$\bar{P}(\bar{t})/\bar{P}_0$			$\bar{w}(\bar{t})/\bar{P}_0^3$		
	А	Б	В	А	Б	В	А	Б	В
0	1,0	1,0	1,0	0,818	1,0	0,857	0,547	1,0	0,630
0,2	0,95	0,922	0,944	0,876	1,0	0,908	0,547	0,723	0,595
0,4	0,90	0,864	0,891	0,941	1,0	0,962	0,547	0,557	0,561
0,6	0,85	0,819	0,841	1,016	1,0	1,018	0,547	0,450	0,530
0,8	0,80	0,781	0,794	1,101	1,0	1,079	0,547	0,372	0,500
1,0	0,75	0,750	0,750	1,200	1,0	1,143	0,547	0,316	0,472

кинематической программы с переменной скоростью, обеспечивающей минимум энергетических затрат, имеет неоспоримое преимущество.

Заключение

Рассмотрены различные программы осадки цилиндров на определенную величину за заданное время. Показано, что с точки зрения энергетических затрат осадка цилиндра с постоянной скоростью сближения сжимающих плит имеет заметное преимущество по сравнению с программой при постоянной силе нагружения. На основе вариационного подхода разработана оптимальная программа осадки цилиндра, обеспечивающая минимально возможную энергию деформирования. Показано, что отличие энергии деформирования в случае оптимальной программы нагружения от энергии деформирования в случае кинематической программы составляет менее 1%. Поэтому в технологических процессах осадки целесообразно применять кинематическую программу нагружения.

Список литературы

1. *Арчаков А.Т., Некрасов В.А.* Экспериментальные исследования процесса осадки с кручением // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2003. № 3. С. 21–26.
2. *Арчаков А.Т.* Определение напряженно-деформированного состояния контактного слоя цилиндрического тела при осадке с кручением // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2002. № 1. С. 21–28.
3. *Сивак И.О., Огородников В.А., Пехов Г.Ф., Сырнев Б.В.* Расчет предельного формоизменения заготовок из труднодеформируемого сплава при осесимметричной осадке // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 1980. № 2. С. 2–5.
4. *Буров Ю.Г.* Метод расчета температуры металла заготовки при горячей осадке // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 1984. № 11. С. 14.
5. *Малинин Н.Н.* Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение. 1986. – 216 с.
6. *Локощенко А.М.* Моделирование процесса ползучести и длительной прочности металлов. М.: МГИУ. 2007. – 264 с.
7. *Локощенко А.М., Демин В.А., Носов В.В. (Тераудд В.В.)* Осадка кругового цилиндра в условиях установившейся ползучести // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2007. № 4. С. 3–10.
8. *Локощенко А.М., Моссаковский П.А., Тераудд В.В.* Исследование осадки круговых цилиндров при ползучести с учетом и без учета бочкообразования // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3. № 1. С. 52–62.
9. *Локощенко А.М., Тераудд В.В.* Экспериментальное подтверждение моделирования осадки цилиндров при ползучести // Машиностроение и инженерное образование. 2011. № 1. С. 49–53.
10. *Локощенко А.М., Тераудд В.В.* Экспериментально-теоретическое исследование осадки круговых цилиндров при ползучести // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4. Часть 5. С. 2314–2315.
11. *Краснов М.Л., Макаренко Г.И., Киселев А.И.* Вариационное исчисление, задачи и упражнения. М.: Наука, 1973. – 190 с.
12. *Бойцов Ю.И., Данилов В.Л., Локощенко А.М., Шестериков С.А.* Исследование ползучести металлов при растяжении. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 99 с.

Материал поступил в редакцию 23.04.15

ЛОКОЩЕНКО Александр Михайлович

E-mail: **loko@imec.msu.ru**
Тел.: **8 (495) 939-53-08**

Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией в НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, лауреат Государственной премии РСФСР, почетный работник науки и техники РФ, действительный член РАЕН. Сфера научных интересов: механика деформируемого твердого тела. Автор более 200 научных работ, в том числе 4 монографии.

ТЕРАУД Валентин Викторович

E-mail: **ldrnww@gmail.com**
Тел.: **8 (495) 939-52-78**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Сфера научных интересов: экспериментально-теоретические исследования технологических процессов, осуществляемых в условиях высокотемпературной ползучести. Автор 40 научных работ.