

УДК 621.771

Добров И. В.
 Семичев А. В.
 Новиков Б. О.
 Гетьман Е. В.

МЕТОДИКА АНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА ОСАДКИ

Аналоговое моделирование процессов обработки металлов давлением представляет один из методов исследования процессов ОМД [1], который до настоящего времени еще не нашел широкого внедрения при решении вопросов развития теории и технологии процессов обработки давлением. В то же время применение метода аналогового моделирования в сочетании с использованием современной компьютерной техники является перспективным направлением в смежных областях науки и техники, в частности при исследовании процессов динамики в области упругих деформаций [2]. Учитывая, что уравнения кинематики процесса деформации в теории упругости и теории пластичности описываются одними и теми же математическими уравнениями [3], можно и целесообразно использовать упругое тело в виде пружины для анализа кинематики витков пружины при ее сжатии для оценки кинематики процесса осадки симметричной заготовки плоскими бойками.

Целью работы является исследование закономерностей распределения скорости перемещения слоев материала заготовки по высоте заготовки на примере модели-аналога в виде деформации пружины сжатия.

Кинематику процесса осадки заготовки 1 (высотой H_0) пуансоном 2 на величину ΔH (рис. 1, а) определяют два параметра [3]. Скорость процесса деформации за время деформации (t_d) – это скорость перемещения пуансона в направлении главной деформации

заготовки вдоль оси Oy ($v_p = \frac{\Delta H}{t_d}$ [м/с] при $v_p = const$) и скорость относительной деформации заготовки ($v_{от}$) в направлении перемещения пуансона – это отношение скорости перемещения пуансона к высоте заготовки:

$$v_{от} = \frac{v_p}{H_1} = \frac{\Delta H}{H_1 t_d} = \frac{v_{3,max}}{H_1} = \dot{\epsilon}_y \quad [1/c], \quad (1)$$

где H_1 – высота заготовки в момент времени t_d ; $v_{3,max} = v_p$ – скорость материала заготовки на контактной поверхности с пуансоном (на контактной поверхности заготовки и неподвижного основания $v_{3,0} = v_0 = 0$); ϵ_y – относительная деформация материала заготовки вдоль оси Oy .

В этом случае согласно [3] эпюра распределения скоростей деформации слоев материала заготовки (рис. 1, а) определяется уравнением:

$$v_{\partial} = -v_{3,max} \frac{y}{H_1} = -v_p \frac{y}{H_1} = -v_{от} y. \quad (2)$$

В свою очередь, если при деформации пружины сжатия 1, установленной на направляющей 2, высота которой (h_0) в исходном (не нагруженном) состоянии составляет (рис. 1, б):

$$h_0 = t_0 n,$$

(t_0 – шаг витка недеформированной пружины при условии, что шаг каждого i -го ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) витка пружины $t_{0,i} = t_0 = const$ и n – число витков пружины), то при ее статической нагрузке $P_{np,c} = mg$ (рис. 1, в) деформация (осадка) пружины составит:

$$\Delta h_{np,c} = h_0 - h_{1,c} = \frac{P_{np,c}}{c_{np}},$$

где g – ускорение свободного падения; c_{np} – жесткость пружины (отношение внешней статической силы $P_{np,c}$, действующей на пружину, к изменению длины пружины ($\Delta h_{np,c}$), вызванной приложением этой силы;

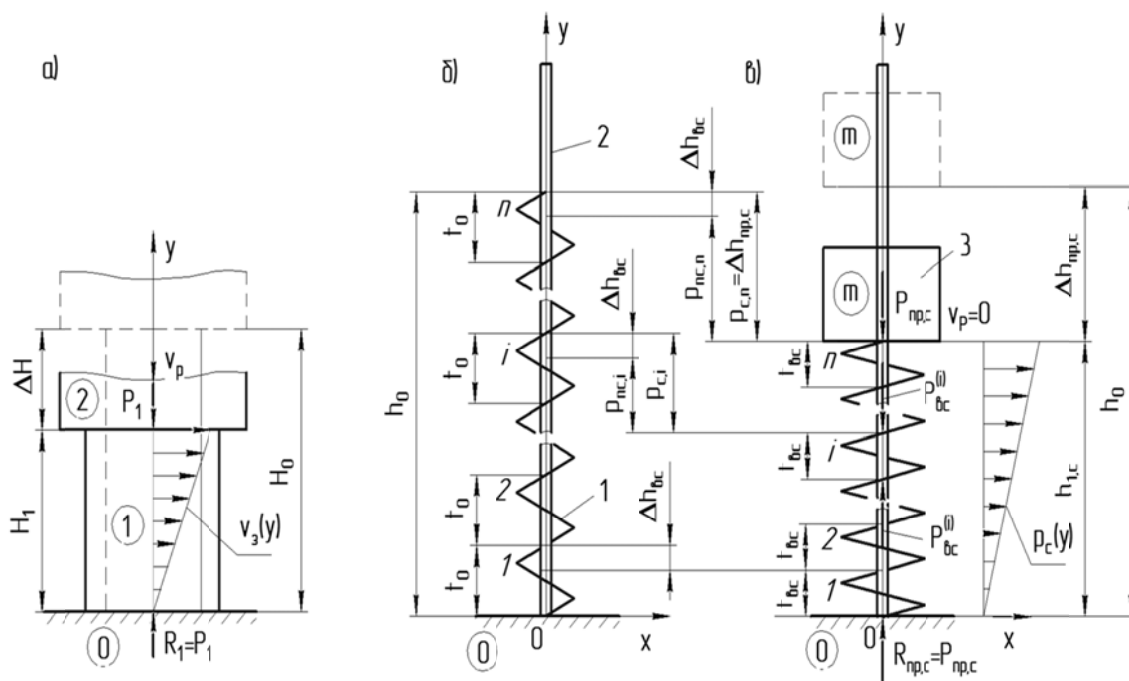


Рис. 1. Процесс деформации заготовки (а) и пружины сжатия (б, в)

n – число витков пружины; $h_{1,c} = t_{bc}n$ – высота деформированной пружины, когда шаг витков пружины при их статической нагрузке внутренней силой $P_{bc}^{(i)} = P_{np,c}$ постоянный ($t_{bc} = const$) и обусловлен постоянной жесткостью каждого витка пружины ($c_g = const$).

Учитывая, что

$$c_{np} = \frac{c_g}{n},$$

где $c_g = \frac{P_g^{(i)}}{\Delta h_{bc}}$ – статическая жесткость витка пружины, обуславливающая деформацию

каждого витка пружины (Δh_{bc}) при внешней нагрузке пружины силой $P_{np,c}$, когда $v_p = 0$, величина деформации пружины определяется уравнением:

$$\Delta h_{np,c} = \sum_{i=1}^n \Delta h_{bc,i} = \Delta h_{bc}n \tag{3}$$

($\Delta h_{bc,i}$ – деформация i -го статически деформированного витка пружины) и при условии $c_{np} = const$ следует $c_g = const$. Соответственно получим $\Delta h_{bc} = const$.

В свою очередь, расстояние каждого i -го витка пружины ($p_{c,i}$) относительно оси Ox при статической нагрузке будет определяться величиной деформации этого витка ($p_{\partial c,i} = \Delta h_{\partial c,i}$) и расстоянием ($p_{nc,i}$), обусловленным суммарной деформацией ($i - 1$) витков, расположенных между неподвижным основанием O и i -м витком (рис. 1, б, в):

$$p_{c,i} = \Delta h_{\partial c} + p_{nc,i} = \Delta h_{\partial c} + \Delta h_{\partial c}(i-1) = i\Delta h_{\partial c} = \frac{\Delta h_{np,c}}{n} i, \quad (4)$$

где $p_{nc,i} = \Delta h_{\partial c}(i-1)$.

Анализ уравнений (2) – (4) показывает:

- принятый линейный закон распределения скорости деформации при осадке [3] соответствует равномерному распределению деформаций витков пружины сжатия при ее статической нагрузке;

- при динамической нагрузке пружины сжатия ($v_p \neq 0$) необходимо учитывать, что изменение положения витков пружины в текущий момент времени $0 < t \leq t_d$ будет определяться как скоростью деформации каждого витка, так и скоростью изменения положения этого витка за счет деформации других витков.

Скорость деформации пружины и ее витков определяет уравнение:

$$v_{np} = \frac{d(\Delta h_{np})}{dt} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{d(t_{0,i} - t_{\partial c,i})}{dt}. \quad (5)$$

При равномерной скорости v_p процесса осадки (деформации пружины) получим $dt = \frac{d(\Delta h)}{v_p}$. Учитывая, что $d(\Delta h) = d(h_0 - y) = -dy$ и $t_{0,i} = const$ для одной и той же недеформированной пружины при $h_0 = const$, $c_{\partial} = const$; уравнение (5) будет представлено в виде:

$$v_{np} = v_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{d(t_{0,i} - t_{\partial c,i})}{d(\Delta h)} v_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{dt_{\partial c,i}}{d(\Delta h)} v_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{dt_{\partial c,i}}{dy} v_p. \quad (6)$$

Таким образом, об изменении скорости движения элементов деформируемого тела в процессе осадки можно судить по изменению расстояния между витками пружины, учитывая, что упругое перемещение витков пружины может на порядок превышать упругую и пластическую деформацию материала заготовки. При этом относительное изменение шага деформируемой пружины можно фиксировать с достаточной точностью при использовании современной цифровой кинокамеры с последующей обработкой фрагментов кино съемки на персональных ЦВМ [4].

В общем случае уравнение (3) может быть представлено в виде:

$$\Delta h_{np} = \begin{cases} \Delta h_{np,c} = \sum_{i=1}^n \Delta h_{\partial c,i} = \sum_{i=1}^n (t_{0,i} - t_{\partial c,i}); \\ \Delta h_{np,\partial} = \sum_{i=1}^n \Delta h_{\partial \partial,i} = \sum_{i=1}^n (t_{0,i} - t_{\partial \partial,i}) \end{cases}, \quad (7)$$

где $\Delta h_{np,\partial}$, $\Delta h_{\partial \partial,i}$, $t_{\partial \partial,i}$ – соответственно деформация пружины, деформация витка и i -ый шаг деформированного витка при динамическом нагружении пружины; $t_{0,i}$ и $t_{\partial c,i}$ – i -ый шаг недеформированного и статически деформированного витка пружины соответственно.

Учитывая, что для заданного значения Δh_{np} величина $h_0 = const$, можно принять

$$t_{0,cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{0,i} = const \quad (\delta t_0 = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{0,cp} - t_{0,i})^2}}{t_{0,cp}} - \text{величина характеризующая качество}$$

изготовления пружины сжатия единичной длины при $t_{0,i} \neq const$) и в этом случае при $h_{1,c} = h_{1,d} = h_1$ следует:

$$t_{ec,cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ec,i} = \frac{h_1}{n} = t_{ed,cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ed,i}; \quad (8)$$

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_{ec,cp} - t_{ec,i})^2}; \quad (9)$$

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_{ed,cp} - t_{ed,i})^2}, \quad (10)$$

где σ_c и σ_d – среднеквадратичное отклонение при статическом и динамическом нагружении пружины сжатия в процессе статистической обработки мгновенной выборки из n витков пружины в текущий момент времени t ($h_1(t)$) [5].

Анализ уравнений (8) – (10) показывает, что в случае, когда $h_{1,c} \approx h_{1,d}$ и $\sigma_c \approx \sigma_d$, принятый закон распределения скорости (2), который соответствует (4), будет адекватным как в условиях статического, так и динамического нагружения упругодеформируемой пружины сжатия. В случае, когда $\sigma_c \neq \sigma_d$, линейный закон распределения скорости (2) неприемлем при динамическом нагружении упругодеформируемой пружины и, соответственно, этот закон не соответствует реальному закону распределения скорости деформации заготовки в направлении действия внешней силы при осадке симметричной заготовки.

Экспериментальные исследования выполнялись в два этапа. Первый этап заключался в следующем. Пружину сжатия 1 из $n = 14$ витков исходной длиной $h_0 = 205$ мм (рис. 1, б), установленную на направляющей 2, последовательно (статически) нагружали системой грузов 3 (m_1, m_2, \dots, m_5), деформируя пружину 1 до размеров $h_{m,1}, h_{m,2}, \dots, h_{m,5} = h_{1,cm} = 75$ мм (рис. 1, в). На основании проведенных измерений определяли жесткость пружины

$$c_{np} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{m_i g}{h_0 - h_{m,i}}. \quad \text{Было установлено, что в диапазоне изменения}$$

$$0 < \Delta h_{cm,i} < \Delta h_{cm,max} = h_0 - h_{m,5} = 130 \text{ мм } c_{np} \approx const.$$

На втором этапе исследований (рис. 2) с помощью привода 4 при его вращении в направлении ω опускали груз 3 ($m > m_5$), обеспечивая динамическую нагрузку пружины 1 внешней силой

$$P_{np,d} = c_{np}(h_0 - y) \quad (10)$$

при движении груза m с скоростью $v_p = const$ (рис. 2, а, б). Процесс равномерной деформации пружины в пределах $h_{1,d} > h_{m,5}$ обеспечивался за счет опоры 5 высотой $h_{on} > h_{m,5}$, на которую опускался груз 3 (рис. 2, в) и в дальнейшем осуществлялась статическая нагрузка пружины 1. Фрагменты киносъемки процесса динамического и статического нагружения пружины 1 анализировались при их воспроизведении в графическом редакторе, как при $h_{1,d} = 96$ мм (рис. 2б), так и при $h_{1,c} = 87$ мм (рис. 2, в).

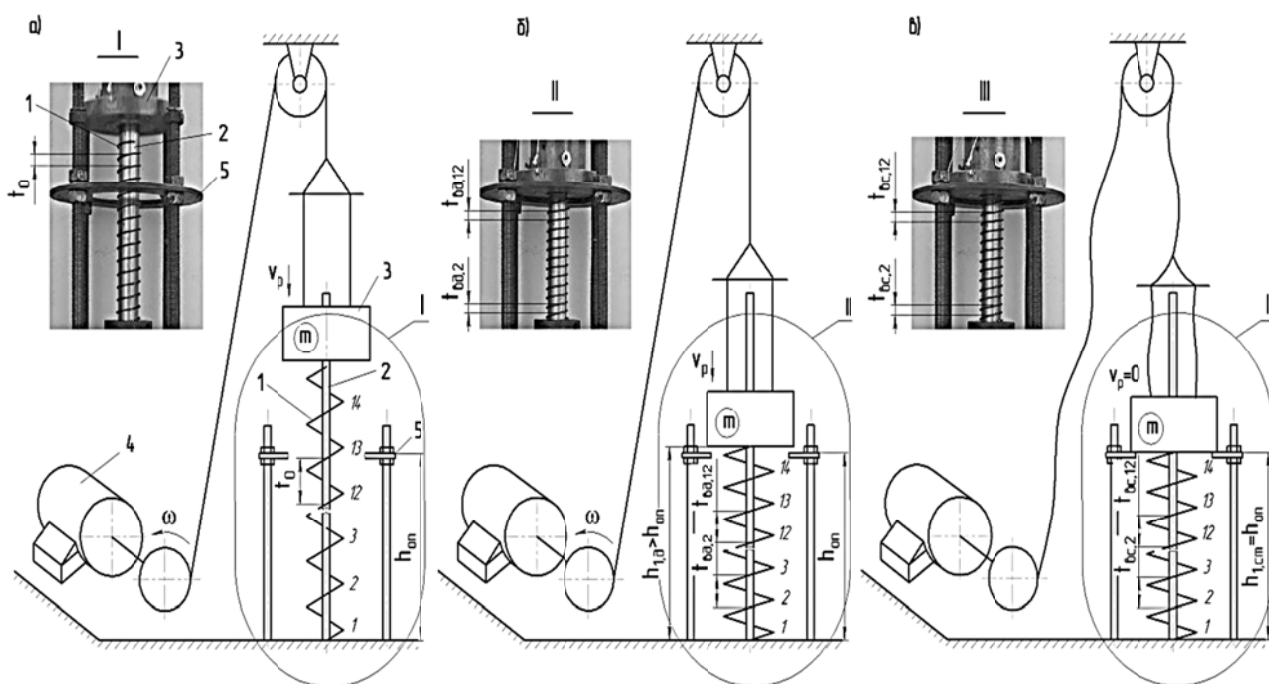


Рис. 2. Фрагменты деформации пружины сжатия:

а – начало динамической деформации; б – окончание динамической деформации; в – статическая деформация

Результаты исследования представлены в табл. 1

Таблица 1

Шаг деформированных витков пружины сжатия, мм

Характер нагрузки	Номер витка														2 – 13	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	t_{cp}	σ
Статическое	5,39	5,75	6,43	6,66	6,43	6,43	6,43	6,43	6,43	6,2	6,43	6,43	6,43	5,16	6,37	0,22
Динамическое	6,18	6,79	7	7,2	7,62	7,2	7	7	7,41	6,79	6,79	6,59	7	5,75	7,03	0,3
	Приведенный шаг деформированных витков пружины сжатия $t_{вд, i}^{k_{np}^*}$, мм															
	5,6	6,16	6,35	6,53	6,91	6,53	6,35	6,35	6,72	6,16	6,16	5,98	6,35	5,21	6,38	0,26
* $k_{np} = h_{1,c}/h_{1,d} = 0,906$ – коэффициент приведения, учитывающий различные величины $h_{1,c}$ и $h_{1,d}$																

Анализ результатов исследования показывает, что принятый при осадке линейный закон распределения скорости деформации внутри заготовки вдоль оси симметрии может отражать условие статической деформации заготовки (рис. 1, в; рис. 2, в) и не соответствует реальному распределению этой скорости при осадке заготовки с равномерной скоростью движения пуансона (рис. 2, б).

ВЫВОДЫ

1. Разработан метод аналогового моделирования кинематики процесса осадки симметричной заготовки плоским пуансоном с использованием пружины сжатия, при котором характер изменения шага витков пружины определяет характер изменения скорости деформации заготовки.

2. Проведенные исследования изменения расположения витков пружины при статическом и динамическом нагружении пружины внешней силой показали:

- равномерный шаг деформированной пружины сжатия, который соответствует линейному закону распределения скорости деформации по высоте осаживаемой заготовки, может быть реализован только в условиях статической деформации;

- при динамической нагрузке пружины, независимо от скорости приложения внешней силы, шаг деформируемой пружины неравномерный, что исключает возможность осадки заготовки при линейном законе распределения скорости деформации по высоте осаживаемой заготовки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абашков В. П. Классификация методов моделирования процессов обработки металлов давлением / В. П. Абашков, К. Н. Соломонов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2008. – № 9. – С. 25–28.
2. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний / В. Л. Бидерман – М. : Высшая школа, 1980. – 408 с.
3. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов. В 3-х томах. Т. 1 / С. И. Губкин – М. : Металлургиздат, 1961. – 376 с.
4. Воронцов А. Л. Теория бочкообразования заготовки при осадке / А. Л. Воронцов // *Производство проката*. – 2007. – № 5. – С. 2–11.
5. Ковшов А. Н. Технология машиностроения / А. Н. Ковшов – М. : «Машиностроение», 2001. – 196 с.
6. Андреева А. Е. Упругие элементы приборов / А. Е. Андреева – М. : «Машиностроение», 1981. – 392 с.

REFERENCES

1. Abashkov V. P. Klassifikacija metodov modelirovanija processov obrabotki metallov davleniem / V. P. Abashkov, K. N. Solomonov // *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija*. – 2008. – № 9. – S. 25–28.
2. Biderman V. L. Teorija mehanicheskikh kolebanij / V. L. Biderman – M. : Vysshaja shkola, 1980. – 408 s.
3. Gubkin S. I. Plasticheskaja deformacija metallov. V 3-h tomah. T. 1 / S. I. Gubkin – M. : Metallurgizdat, 1961. – 376 s.
4. Voroncov A. L. Teorija bochkoobrazovanija zagotovki pri osadke / A. L. Voroncov // *Proizvodstvo prokata*. – 2007. – № 5. – S. 2–11.
5. Kovshov A. N. Tehnologija mashinostroenija / A. N. Kovshov – M. : «Mashinostroenie», 2001. – 196 s.
6. Andreeva A. E. Uprugie jelementy priborov / A. E. Andreeva – M. : «Mashinostroenie», 1981. – 392 s.

Добров И. В. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ

Семичев А. В. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ

Новиков Б. О. – студент НМетАУ

Гетьман Е. В. – студент НМетАУ

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: igordobrov@yahoo.com, nmetaumechanic@yahoo.com, nmetaumechanic@yahoo.com, nmetaumechanic@yahoo.com