

УДК 621.771

И. В. ДОБРОВ, д-р техн. наук, зав. кафедры прикладной механики
НМетАУ, Днепропетровск;

А. В. СЕМИЧЕВ, канд. техн. наук, доц., НМетАУ;

Б. О. НОВИКОВ, студент, НМетАУ;

Е. В. ГЕТЬМАН, студент, НМетАУ.

НОВЫЙ СПОСОБ АНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА ОСАДКИ

Разработан метод аналогового моделирования кинематики процесса осадки симметричной заготовки плоским пуансоном с использованием пружины сжатия в условиях ее упруго-пластической деформации. Установлена взаимосвязь характера изменения скорости деформации заготовки при осадке с изменением шага витков пружины при ее динамическом нагружении. С использованием современных средств цифровой киносъемки и персональных компьютеров при анализе деформации витков пружины сжатия установлен характер изменения скорости деформации элементов заготовки по ее высоте. Полученные расчетные значения величин скоростей деформации заготовки качественно соответствуют результатам натурального эксперимента при осадке цилиндрической заготовки в производственных условиях.

Ключевые слова: аналоговое моделирование, осадка, пружина сжатия, упругая, пластическая деформация, скорость деформации.

Введение. Аналоговое моделирование процессов обработки металлов давлением представляет один из методов исследования процессов ОМД [1], к числу которых можно отнести метод моделирования кинематики процесса осадки с использованием упругой пружины сжатия [2], основанном на том принципе, что уравнения кинематики процесса деформации в теории упругости и теории пластичности описываются одними и теми же математическими уравнениями [3]. Вместе с тем, если учитывать, что отличие процессов упругой и пластической деформации состоит в том, что для идеально упругих тел после снятия нагрузки размеры тела и его элементов возвращаются в исходное состояние, а при идеально пластической деформации после снятия внешней нагрузки размеры тела и его элементов остаются такими, какими они были на момент прекращения действия внешней нагрузки, представляется возможность использовать для моделирования кинематики процессов обработки металлов давлением пружину, выполненную из материала с высокими пластическими свойствами. В этом случае расположение витков пружины после ее деформации моделирует формоизменение элементов материала заготовки по высоте заготовки, а использование современных средств цифровой кинокамеры и персональных компьютеров позволяет анализировать кинематику процесса деформации при осадке.

Цель и постановка проблемы. В работе приведено исследование закономерностей распределения скорости перемещения слоев материала заготовки при осадке на примере модели аналога в виде деформации пружины сжатия, выполненной из материала с высокими пластическими свойствами (неупругой пружины).

Материалы исследования. В работе [2] показано, что линейное распределение скорости деформации заготовки ($v_3(y)$) в направлении линии действия внешней силы (P_1) при осадке симметричной заготовки 1 плоским пуансоном 2 (см. рис. 1, а), которое описывает уравнение [3]

$$v_3(y) = -v_p \frac{y}{H_1} \quad (1)$$

где $v_p = \frac{\Delta H}{t_d}$ – скорость перемещения пуансона, определяющая скорость процесса деформации при осадке исходной заготовки высотой H_0 до высоты H_1 за время осадки t_n , в течении которого размеры заготовки изменяются на размер $\Delta H = H_0 - H_1$ не соответствует реальной кинематике процесса осадки.

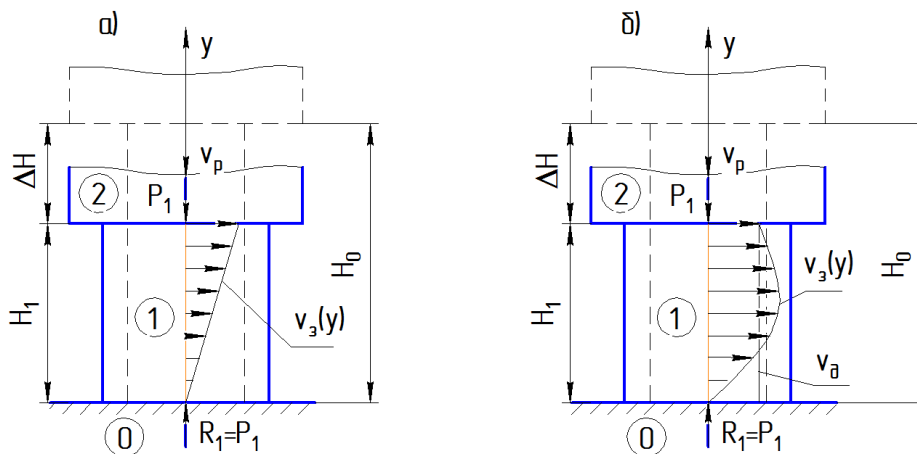


Рис. 1 – Схемы распределения скорости деформации заготовки по высоте заготовки при осадке: а – линейный закон, б – нелинейный закон

В работе [4] предложен закон изменения скорости деформации заготовки (см. рис. 1, б), который определяется из условия, что скорость процесса деформации заготовки равна средней скорости деформации заготовки

$$v_d = \frac{1}{H_1} \int_0^{H_1} v_3(y) dy. \quad (2)$$

Вместе с тем, исследование деформации упругой пружины сжатия для определения закона распределения кинематических параметров процесса осадки согласно уравнениям (1), (2), затруднительно т.к., если проанализировать диаграммы сжатия (см. рис. 2) реального образца материала заготовки [3] и соответствующие диаграммы сжатия пружин из упругого и пластического материалов, то необходимо отметить следующее:

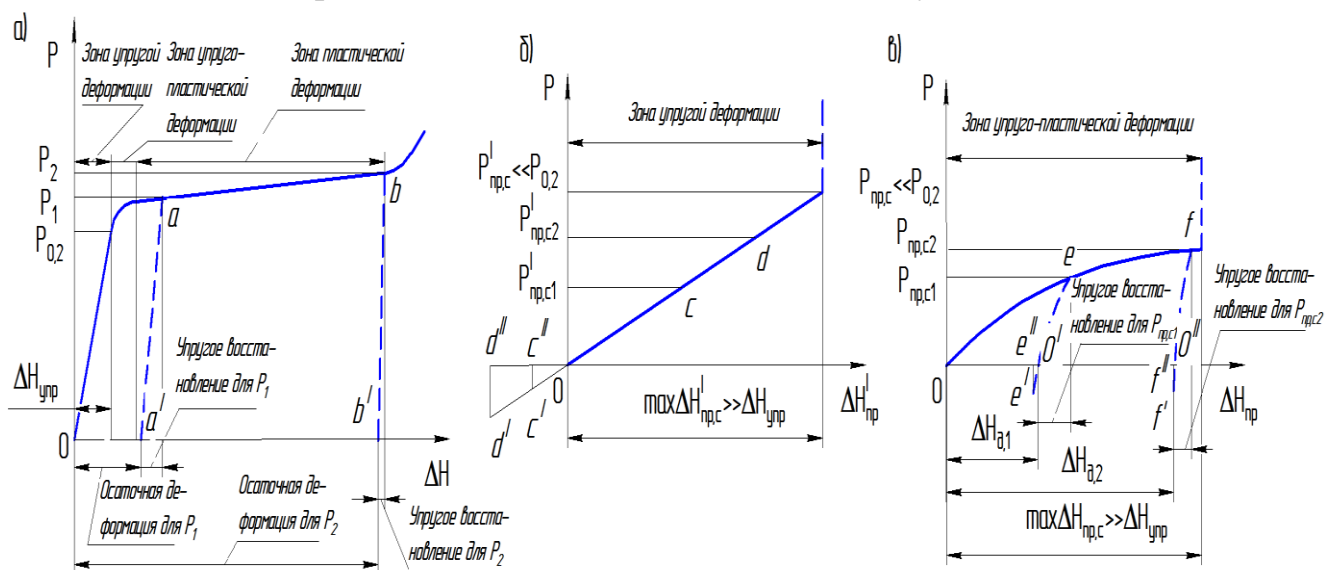


Рис. 2 – Диаграммы процессов сжатия и восстановления при деформации: а – образцов заготовки, б – упругой пружины, в – упруго-пластической пружины

– для реальных образцов материала заготовки (см. рис. 2, а) в процессе осадки протяженность зоны упругой деформации ($\Delta H_{упр}$) не более 5% от зоны пластической деформации образца и при снятии внешней нагрузки P_1 или P_2 , которые превышают нагрузку предела упругости $P_{0,2}$, остаточная деформации образца определяется прямой aa' или bb' . При этом скорость прекращения действия внешней нагрузки (P_1, P_2) практически не оказывает влияния на изменение формы линии aa' или bb' , определяющих изменение действия внутренних сил в зоне упругого восстановления пластически деформированной заготовки;

– для упругой пружины сжатия (см. рис. 2, б) протяженность зоны упругой деформации определяется ее максимальным статическим сжатием ($\max \Delta H_{пр,c}^I$) до начала контакта витков пружины между собой, после чего

может происходить увеличение нагрузки без изменения размеров пружины (штрихпунктирная линия на рис. 2, б и рис. 2, в). В зависимости от характеристики пружины сжатия можно получить $\Delta H_{\text{п}} < \max \Delta h'_{\text{пр,с}} >> \Delta H_{\text{упр}}$ при значениях $P_2 \gg P'_{\text{пр,с2}} > P'_{\text{пр,с1}} \ll P_1$. В случае статической разгрузки пружины характер изменения положения торцевой поверхности наружного подвижного витка пружины будут определять линии $0c$ для $P'_{\text{пр,с1}}$ ($0d$ для $P'_{\text{пр,с2}}$), и в момент времени, когда внешняя сила будет равна нулю, получим $\Delta h'_{\text{пр,с}} = 0$ (пружина полностью восстановит свой исходный размер). При внезапном прекращении действия нагрузки $P'_{\text{пр,с2}}$ ($P'_{\text{пр,с1}}$) наружный торец подвижного витка пружины под действием упругих сил сжатых витков начнет ускоренно перемещаться вдоль прямой $0d$ ($0c$) и, за счет действия сил инерции этих витков, займет положение в точке d' (c') на продолжении прямой $0d'$ ($0c'$), растянув пружину сжатия на величину $0d''$ ($0c''$). Затем под действием упругих сил растянутых витков пружины и сил инерции витков пружины наружный торец подвижного витка начнет двигаться в противоположном направлении, осуществляя затухающие колебания относительно положения равновесия ($\Delta h'_{\text{пр,с}} = 0$). При этом каждый из витков пружины, в свою очередь, совершает колебания относительно «своего» положения равновесия в пружине, свободной от внешней нагрузки. Т. е. при незначительном изменении дополнительной нагрузки $\Delta P'_{\text{пр}}$ в каждый момент времени изменения динамической нагрузки $P'_{\text{пр,д}} = P'_{\text{пр,с}} + \Delta P'_{\text{пр}}$ имеет место различные колебания каждого из витков пружины, которые вносят свои искажения в определение закона кинематики процесса осадки на основании фотографии положения витков в текущий момент времени приложения нагрузки. В результате такого моделирования можно только установить, что скорость деформации заготовки не соответствует линейному закону изменения скорости деформации по высоте осаживаемой заготовки [2];

– диаграмма нагружения и разгрузки пружины из материала с высокими пластическими свойствами (см. рис. 2, в) представляет процесс деформации неупругой пружины сжатия в зоне упруго-пластичной деформации и сочетает в себе основные свойства характерные для деформации образца при осадке и сжатия упругой пружины: $\max \Delta h'_{\text{пр,с}} \gg \Delta H_{\text{упр}} > \Delta H_{\text{п}}; P_2 \gg P'_{\text{пр,с2}} > P'_{\text{пр,с1}} \ll P_1$;

остаточная пластическая деформация упруго-пластической пружины ($\Delta h_{д,с1}, \Delta h_{д,с2}$) после снятия статической нагрузки соизмерима с величиной упругого восстановления пружины при $\Delta h_{д,с1}$ или превышает ее при $\Delta h_{д,с2}$; в условиях динамического нагружения ($P_{пр,д} = P_{пр,ст} + \Delta P_{пр}$) величина $e' \theta'' \ll 0 d''$ ($f' \theta'' \ll 0 c''$) и процесс затухания колебания витков происходит более интенсивно, что позволяет анализировать изменения положения витков пружины при динамическом нагружении, сравнивая между собой фрагменты киносъемки в течении отрезка времени соизмеримого со временем изменения $\Delta P_{пр}$. На основании этих измерений возрастает точность определения скорости перемещения каждого из витков пружины, моделирующей изменение скорости деформации заготовки при осадке.

На рис. 3 представлены расчетные схемы изменения положения каждого из n витков пружины 1, установленной на направляющей 2 (см. рис. 3, а), в процессах статического (см. рис. 3, б) и динамического (см. рис. 3, в) нагружения пружины исходной высотой h_0 до размера $h_{l,c} = h_{l,d}$ грузом 3. При этом шаг витков пружины в исходном состоянии $t_{0,i} = const$ определяет исходную длину пружины $h_0 = \sum_{i=1}^n t_{0,i}$. Вследствие того, что при статической осадке неупругой пружины $P_{пр,с}(\Delta h) \neq const$ (см. рис. 2, в и рис. 3, б), то и жесткость этой

$$c_{пр,с} = \frac{P_{пр,с}(\Delta h)}{\Delta h} \neq const.$$

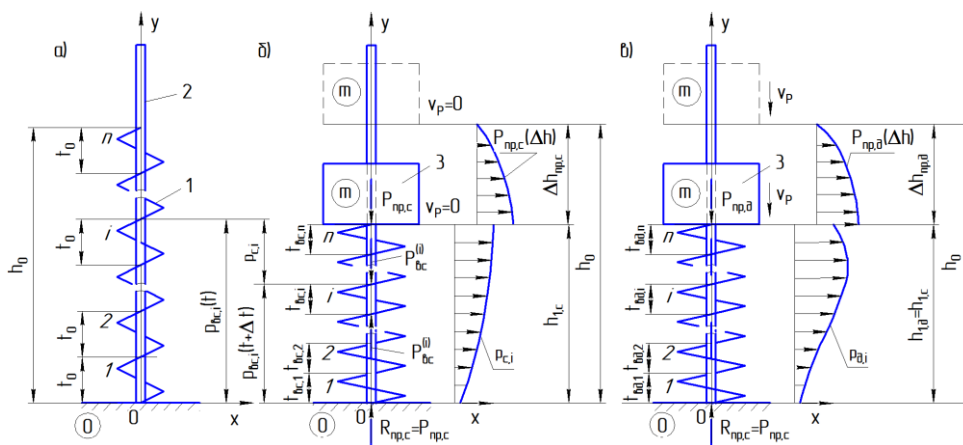


Рис. 3 – Схемы процессов деформации неупругой пружины сжатия: а – пружина до деформации, б – статическая деформация, в – динамическая деформация

Учитывая, что жесткость пружины из n витков представляет последовательное соединение n жесткостей каждого i -го витка пружины ($c_{в,i}$),

получим $\frac{1}{c_{пр,с}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{c_{в,i}} \neq const$ [5]. Откуда следует $c_{в,i} \neq const$ и деформация

каждого i -го витка сжатой пружины $\Delta h_{в,i} = \frac{P_{пр,с}^{(i)}}{c_{в,i}} \neq const$ ($P_{пр,с}^{(i)} = P_{пр,с}$ –

внутренняя сила, сжимающая i -ый виток пружины). Соответственно шаг витка

$t_{в,i} = t_{0,i} - \Delta t_{в,i} \neq const$, при этом, $\sum_{i=1}^n \Delta h_{в,i} = \Delta h$ и $\sum_{i=1}^n t_{в,i} = h_{л,с}$, а расстояние ($p_{с,i}$)

на котором находится каждый i -ый виток пружины (см. рис. 3 б) относительно своего первоначального положения до деформации определяется уравнением [2]

$$p_{в,i} = \sum_{i=1}^i (h_{0,i} - h_{в,i}) = y_{в,i}(t) - y_{в,i}(t + \Delta t_c) \quad (4)$$

где $y_{в,i}(t)$ и $y_{в,i}(t + \Delta t)$ – изменение координаты подвижного (верхнего) торца i -го витка пружины в системе координат xOy за время Δt_c статического нагружения пружины и $p_{в,i} > p_{в,i-1} > \dots > p_{в,1} > 0$ ($n \geq i \geq 1$). На рис. 3, б представлен качественный график распределения $p_{в,i}$ при нелинейной статической нагрузке $P_{пр,с}(\Delta h)$.

Очевидно, при динамическом нагружении неупругой пружины, когда $v_d = const$ и $h_{л,д} = h_{л,с} = h_l$, $\Delta h_{л,д} = \Delta h_{л,с} = \Delta h$ (см. рис. 3, в), учитывая условие (2), получим

$$\begin{cases} p_{вд,i} = \sum_{i=1}^i (h_{0,i} - h_{вд,i}); \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{вд,i} = \Delta h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{в,i}, \end{cases} \quad (6)$$

и $p_{вд,i} \neq p_{вд,i-1} \neq \dots \neq p_{вд,1} > 0$. На рис. 3, в представлен качественный график распределения $p_{вд,i}$ при нелинейной динамической нагрузке $P_{пр,д}(\Delta h)$. В этом случае скорость перемещения i -го витка определяется уравнением

$$v_i = v_{вд,i} = \frac{p_{вд,i}(t) - p_{вд,i}(t + \Delta t_d)}{\Delta t_d}, \quad (7)$$

которое может быть преобразовано в уравнение

$$v_i = \frac{y_i(t) - \Delta y_i(t + \Delta t_d)}{\Delta t_d} = \frac{\Delta y_i(t)}{\Delta t} \quad (8)$$

где $y_i(t)$ и $\Delta y_i(t + \Delta t_d)$ – изменение координаты подвижного (верхнего) торца i -го витка пружины в системе координат xOy за время $\Delta t = \Delta t_d \gg \Delta t_c$ динамического нагружения пружины.

Реализация кинематики процесса деформации неупругой пружины осуществлялась на установке рис. 4 [2]. Привод 4 при его вращении в направлении ω опускает груз 3 массой m ($mg \gg \max P_{пр,с}$, g - ускорение свободного падения) со скоростью $v_p = 40$ мм/с по направляющей 2 (см. рис. 4), обеспечивая динамическую нагрузку пружины 1 внешней силой

$$P_{пр,д} = c_{пр,д} (h_0 - y). \quad (9)$$

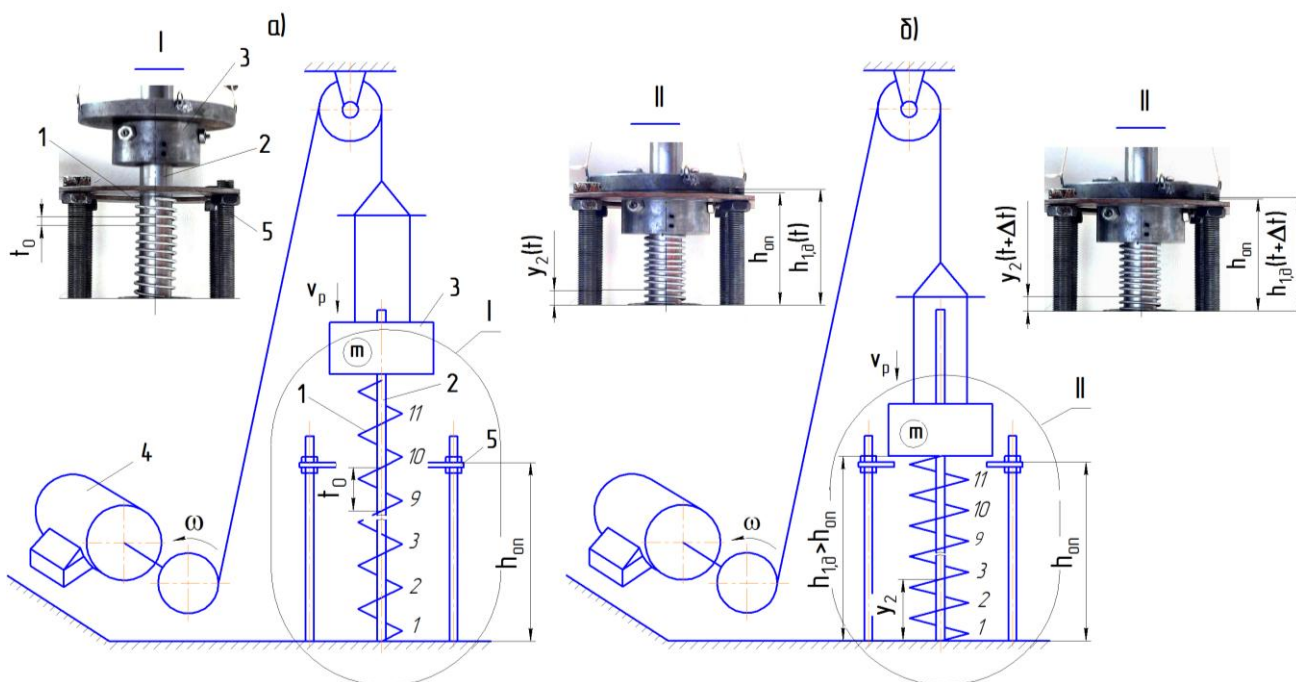


Рис. 4 – Схема установки динамического нагружения неупругой пружины сжатия и фрагменты киносъемки процесса деформации: а – до начала деформации, б – динамическая деформация в моменты времени t и $t + \Delta t$, в – окончание динамической деформации

Процесс равномерной деформации пружины в пределах $\Delta h_{пр,д} < \max \Delta h_{пр,с}$ обеспечивался за счет опоры 5 высотой $h_{он} = h_0 - \Delta h_{пр,д}$, на которую опускался груз 3 (см. рис. 4, в). Фрагменты киносъемки процесса динамического

нагружения пружины 1 анализировались при их воспроизведении в графическом редакторе: до начала динамического нагружения (см. рис. 4, а) и в условиях динамического нагружения (см. рис. 4, б), когда положения витков пружины на выноске II отличались друг от друга в течении отрезка времени $\Delta t = 0,03$ с (два смежных фрагмента при киносъёмке с частотой 30 кадр./с).

Результаты исследования. В табл. 1 представлены результаты исследования, которые позволили определить распределение перемещений ($\Delta y_i(y_i)$) и скоростей перемещений ($v_i(y_i)$) каждого витка пружины в процессе ее сжатия в виде уравнений [6].

Таблица 1. Перемещение витков пружины за время $\Delta t = 0,03$ с и скорость перемещения витков

Расстояние от опоры до верхнего торца витка пружины, мм	Номер витка пружины										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$y_i(t)$	8,86	16,98	24,77	32,9	39,68	46,45	53,23	61,69	69,48	76,08	83,89
$y_i(t+\Delta t)$	8,36	16,14	24,21	31,52	38,19	44,53	50,87	59,07	67,26	73,67	81,45
Расстояние от опоры до верхнего торца витка пружины, мм	Номер витка пружины										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Изменение расстояния витка пружины, мм $\Delta y_i(t)$	2,44	2,41	2,22	2,63	2,35	1,92	1,49	1,38	0,91	0,84	0,5
Скорость перемещение витка пружины v_i , мм/с	81,34	80,34	74	87,67	78,34	64	49,67	46	30,34	28	16,67

$$\Delta y_i(y_i) = 2 \cdot 10^{-7} x^4 - 3 \cdot 10^{-5} x^3 + 0,0007 x^2 + 0,0009 x + 2,348 \quad (10)$$

$$v_i(y_i) = 7 \cdot 10^{-6} x^4 - 0,001 x^3 + 0,0239 x^2 + 0,0296 x + 78,277 \quad (11)$$

Если принять (см. рис. 5, а), что при однородной деформации элементарной площади $abcd$ симметричной заготовки $ABCD$ ($\frac{ab}{ad} = \frac{AB}{AD} = 1$) в процессе ее осадки со скоростью v_p за время $\Delta t \rightarrow \delta t$ (δt – сколь угодно малое, но конечное значение отрезка времени) изменение размеров $abcd$, положение которой характеризуется координатой y при $x=0$, определяется из условия постоянства объема деформируемого материала. Откуда следует $\Delta y(x=0, y) = \Delta x(x=0, y)$. Так как $\Delta y(x=0, y) = v_y(x=0, y) \Delta t$ и $\Delta x(x=0, y) = 2v_x(x=0, y) \Delta t$, то изменение $v_y(x, y)$ (см. рис. 5, б) можно оценивать по результатам исследования осадки образца (см. рис. 5, в).

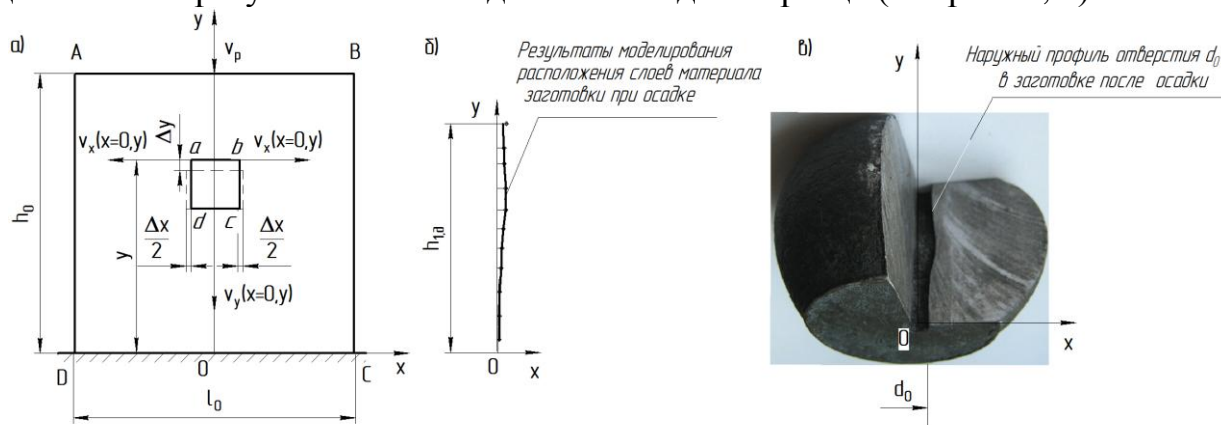


Рис. 5 – Сравнение результатов моделирования с экспериментом по осадке круглого образца: а – расчетная схема осадки, б – результаты моделирования кинематики осадки, в – результаты натурального эксперимента [7]

Анализ результатов исследования показывает качественное соответствие результатов моделирования и натурального эксперимента, что подтверждает нелинейный характер распределения скорости деформации заготовки в направлении осадки и обуславливает бочкообразование наружной поверхности заготовки.

Выводы:

1. Разработан метод аналогового моделирования кинематики процесса осадки симметричной заготовки плоским пуансоном с использованием пружины сжатия в условиях ее упруго-пластической деформации.

2. Проведенные исследования изменения расположения витков пружины при статическом и динамическом нагружении пружины внешней силой показали, что линейный закон распределения скорости деформации заготовки в направлении осадки заготовки не может быть реализован в процессах обработки давлением.

3. При динамическом нагружении пружины сжатия, что соответствует реальному процессу деформации заготовки, скорость деформации отдельных витков пружины в направлении действия внешней силы различна, и этим условием определяется кинематика процесса осадки, при которой происходит изменение геометрических размеров заготовки в плоскости симметрии. В этих условиях влияние внешнего трения на контактной поверхности заготовки и пуансона может только накладывать дополнительные условия на формообразование боковой поверхности заготовки при осадке.

Список литературы: 1. *Абаишков В. П.* Классификация методов моделирования процессов обработки металлов давлением / *В. П. Абаишков, К. Н. Соломонов* // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 9. – С. 25–28. 2. *Добров И. В.* Методика аналогового моделирования кинематики процесса осадки / *И. В. Добров, А. В. Семичев, Б. О. Новиков, Е. В. Гетьман* // Обработка материалов давлением. – 2014. – № 2(39). – С. 30-35. 3. *Губкин С. И.* Пластическая деформация металлов. В 3-х томах. Т. 1 / *С. И. Губкин* – М.: Металлургиздат, 1961. – 376 с. 4. *Добров И. В.* Исследование кинематики очага деформации осесимметричной заготовки при осадке плоскими бойками / *И. В. Добров* // Обработка материалов давлением. – 2013. – № 4(37). – С. 8-15. 5. *Бидерман В. Л.* Теория механических колебаний / *В. Л. Бидерман* – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с. 6. *Корн Г. А.* Справочник по математике для научных работников и инженеров / *Г. А. Корн, Т. М. Корн* – М.: Наука, 1974. – 832 с. 7. *Markov O.E.* Influence of Upsetting Operation on the Closure of the Axial Defects of Ingots / *O.E. Markov, N.A. Rudenko* // Plastic deformation of metals: сб. научных трудов в 2-х томах. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – Т.1 – с. 207-215.

Поступила в редколлегию 25.06.2014

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;

Т. М. БРИЖАН, ГВУЗ "ПГТУ", Мариуполь;

А. Г. КРЮК, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;

О. С. КЛЕНОВ, канд. техн. наук, фирма "ДиМерус Инженеринг", Харьков.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

В статье предложена математическая модель механики процесса резания и приведены аналитические зависимости для определения основных параметров силовой напряженности процесса резания, включая силу резания, энергоемкость обработки, коэффициент усадки стружки. Теоретически показано, что основным путем их уменьшения является улучшение условий стружкообразования за счет уменьшения радиальной составляющей силы резания, используя различные способы дробления

© Ф. В. Новиков, Т. М. Брижан, А. Г. Крюк, О. С. Кленов, 2014