

УДК 539.3

О.Л. Швед, А.А. Абрамов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ДВОЙНОГО БОЧКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ LS-DYNA

Предлагается приближенная методика определения постоянных в модели среды Бамманна. Выполняется численное моделирование процесса свободной осадки с условием прилипания на контактной поверхности высокого сплошного цилиндрического образца из свинца. Наблюдается слабо выраженное начальное двойное бочкообразование. Обнаруживается существенное количественное расхождение с физическим экспериментом на рассматриваемой стадии течения металла.

Введение

Существующие системы моделирования, например LS-DYNA, стали в настоящее время обычным и необходимым средством для расчета технологических процессов обработки металлов давлением (ОМД), которым свойственны большие и, как правило, неравномерные деформации. Система LS-DYNA [1] располагает широким набором моделей сплошной среды (материала), выбор конкретной модели остается за пользователем и определяется спецификой рассматриваемой задачи.

Модель материала осуществляет «имитирование процесса» при помощи численного метода конечных элементов. Возможная неадекватность описания наблюдаемого физического явления имеет объективную причину, связанную с недостатками выбранной модели, а также, даже при верном выборе постоянных материала, субъективную причину, обусловленную тем, что неудачно построена и поддерживается конечно-элементная сетка. В рамках необходимых ограничений сетка может быть произвольной, поэтому полученные приближенные решения, например поля перемещений, могут порой существенно отличаться от истинных полей, наблюдаемых в физическом эксперименте. Формирование благоприятной для физически правильного расчета конечно-элементной сетки зависит от искусства пользователя системы.

Различаются геометрически линейные и геометрически нелинейные модели материала. Первые модели более развиты, но, очевидно, должны уступать в адекватности описания процесса более сложным вторым моделям. Однако построение удачных моделей, учитывающих нелинейность изменения геометрии деформируемого твердого тела, вызывает существенные трудности. Исключение составляет геометрически нелинейная модель упругости, физически ограниченная малыми градиентами деформации [2]. Она, например, описывает эффекты Кельвина – Вертгейма и Пойнтинга в задаче о простом сдвиге, недоступные линейной модели упругости. Указанные эффекты описываются в геометрически нелинейной модели [3, 4], но заметного преимущества в адекватности расчета процессов ОМД перед линейными моделями последняя практически не имеет. Выбранная, например, конфигурация матрицы в задаче о прямом выдавливании [3] существенно упрощает процесс и не позволяет выйти на численное исследование возможного проблемного течения, как это сделано в [5, 6].

Известно, что существует много явлений, не допускающих правильного описания моделью сплошной среды. Одним из простых процессов ОМД является свободная осадка цилиндрического образца в условиях контактного трения. При этом для высоких сплошных заготовок (отношение высоты к диаметру больше двух) наблюдается любопытное явление образования двойной бочки, которая затем переходит в одинарную бочку [7]. Несмотря на кажущуюся простоту задачи о численном моделировании двойного бочкообразования, подобные работы в литературе отсутствуют. Отметим, что для осадки полых цилиндрических образцов ситуация несколько улучшается [4], особенно для тонкостенных. Можно предположить, что результаты численных экспериментов на обсуждаемом этапе деформирования не приводятся по причине

невозможности получения физически правильного решения указанной задачи, т. е. течение является проблемным. Вероятно, это связано большей частью с главным недостатком существующих моделей сплошной среды – малой подвижностью материала при течении. Такое объяснение появляется при внимательном анализе результатов численного моделирования опытов Треска по экструзии свинца [5], который установил экспериментально, что «металл течет как жидкость».

Цель настоящей работы – определить постоянные материала и исследовать отмеченное выше проблемное течение: попытаться описать численно эффект двойного бочкообразования при осадке сплошных цилиндрических заготовок с использованием геометрически нелинейной модели материала Бамманна [8, 9].

1. Выбор постоянных модели материала Бамманна с линейным упрочнением

Для идентификации постоянных материала используем простую методику, которая заключается в следующем. Несколько известных экспериментальных кривых одноосных растяжения или сжатия представляются в виде непрерывных кусочно-линейных функций и приближаются теоретическими кривыми. Вопрос определения постоянных материала сводится к нелинейной задаче условной минимизации. Получим решение указанной задачи в численном виде. Для свинца зададим модуль Юнга $E = 16000$ МПа, статический предел текучести при сжатии $Y = 10$ МПа.

Общий интервал распределения деформации ε возьмем $(0,1)$, скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ будем считать $(\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2)$, где $\dot{\varepsilon}_1 = 0,04$, $\dot{\varepsilon}_2 = 9$ с⁻¹. Последним соответствуют при одноосном сжатии экспериментальные функции сопротивления деформации y, z [10]. Представим их в виде непрерывных кусочно-линейных функций по деформации ε . На интервале $(\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1})$ с номером i ($i = 1, 2, \dots, n-1$) имеем

$$\begin{aligned} y &= E_{1i}\varepsilon + B_{1i}, \quad z = E_{2i}\varepsilon + B_{2i}; \\ E_{1i} &= (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)^{-1}(y_{i+1} - y_i), \quad E_{2i} = (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)^{-1}(z_{i+1} - z_i); \\ B_{1i} &= (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)^{-1}(\varepsilon_{i+1}y_i - \varepsilon_i y_{i+1}), \quad B_{2i} = (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)^{-1}(\varepsilon_{i+1}z_i - \varepsilon_i z_{i+1}). \end{aligned} \quad (1)$$

Теоретическая функция сопротивления деформации $\sigma = f_k$ представляется в виде [1, 8, 9] $f_k = \kappa + Y + \text{Varsh}(\dot{\varepsilon}_k F)$, $\dot{\kappa} = H\dot{\varepsilon}_p$, где $\text{arsh}(\)$ – обратная функция к гиперболическому синусу $\text{sh}(\)$. Для скорости пластической деформации имеем $\dot{\varepsilon}_p = \dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_e = \dot{\varepsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{E} = \dot{\varepsilon} - \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon} - E_{kt} \frac{\dot{\varepsilon}}{E} = (1 - E^{-1}E_{kt})\dot{\varepsilon}$, где E_{kt} – касательный модуль, для которого можно приближенно положить $E_{kt} = E_{ki}$ при $\varepsilon \in (\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1})$. Тогда с учетом (1) получаем

$$G_{ki} = 1 - E^{-1}E_{ki} \text{ и } R_{k1} = 0, \quad R_{ki+1} = R_{ki} + G_{ki}(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) (\kappa = H(G_{ki}(\varepsilon - \varepsilon_i) + R_{ki})) \quad (2)$$

(величины R_{ki} определяются рекуррентно). Окончательно на $(\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1})$ находим

$$f_k = H(G_{ki}(\varepsilon - \varepsilon_i) + R_{ki}) + Y + \text{Varsh}(\dot{\varepsilon}_k F) \quad (k = 1, 2). \quad (3)$$

Из (2) следует, что при $1 < i < n-1$ значения (3) линейной по ε функции f_k в граничной точке интервалов $(\varepsilon_{i-1}, \varepsilon_i)$ и $(\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1})$ совпадают. Следовательно, теоретические функции являются непрерывными.

Параметры H, V, F будем отыскивать из условия близости кривых

$$\sum_{i=1}^{n-1} \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_{i+1}} ((f_1 - y)^2 + (f_2 - z)^2) d\varepsilon \rightarrow \min. \quad (4)$$

Количество приближаемых кривых зависит от наличия экспериментальных данных, точность аппроксимации которых можно улучшить за счет увеличения числа точек n . Ограничимся небольшим значением $n = 14$.

Вычисляя интегралы в (4) и опуская постоянные величины, приходим к задаче условной минимизации

$$G = G(H, V, F) \rightarrow \min (H, V, F > 0); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} G &= p_1 H^2 + HV(p_2 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_1) + p_3 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_2)) + p_4 H + \\ &+ V(p_5 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_1) + p_6 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_2)) + p_7 V^2 (\operatorname{arsh}^2(F \dot{\varepsilon}_1) + \operatorname{arsh}^2(F \dot{\varepsilon}_2)); \\ p_1 &= \sum_{i=1}^{n-1} (a_i^2 + b_i^2)(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i); \quad p_2 = 2\dot{\varepsilon}_1(\varepsilon_n - E^{-1}(y_n - y_1)); \quad p_3 = 2\dot{\varepsilon}_2(\varepsilon_n - E^{-1}(z_n - z_1)); \\ p_4 &= \sum_{i=1}^{n-1} (2Y(a_i + b_i) - a_i(y_{i+1} + y_i) - b_i(z_{i+1} + z_i))(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i); \quad p_5 = 2Y\varepsilon_n - \sum_{i=1}^{n-1} (y_{i+1} + y_i); \\ p_6 &= 2Y\varepsilon_n - \sum_{i=1}^{n-1} (z_{i+1} + z_i); \quad p_7 = \varepsilon_n \quad (a_i = \dot{\varepsilon}_1 G_{1i}, b_i = \dot{\varepsilon}_2 G_{2i}). \end{aligned} \quad (6)$$

Стационарная точка (H, V, F) функции G в (5), (6) удовлетворяет системе уравнений

$$\begin{aligned} 0 = \frac{\partial G}{\partial V} &= 2p_7 V (\operatorname{arsh}^2(F \dot{\varepsilon}_1) + \operatorname{arsh}^2(F \dot{\varepsilon}_2)) + p_5 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_1) + p_6 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_2) + \\ &+ H(p_2 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_1) + p_3 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_2)), \quad 0 = \frac{\partial G}{\partial H} = V(p_2 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_1) + p_3 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_2)) + 2p_1 H + p_4. \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) находим величины $H = H(F)$, $V = V(F)$:

$$\begin{aligned} H &= \frac{\Delta H}{\Delta}, \quad V = \frac{\Delta V}{\Delta} \quad (\Delta = 4p_4 p_7 (\operatorname{arsh}^2(F \dot{\varepsilon}_1) + \operatorname{arsh}^2(F \dot{\varepsilon}_2)) - (p_2 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_1) + p_3 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_2))^2, \\ \Delta H &= -2p_4 p_7 (\operatorname{arsh}^2(F \dot{\varepsilon}_1) + \operatorname{arsh}^2(F \dot{\varepsilon}_2)) + (p_2 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_1) + p_3 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_2))(p_5 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_1) + \\ &+ p_6 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_2)), \quad \Delta V = -2p_1 (p_5 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_1) + p_6 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_2)) + p_4 (p_2 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_1) + p_3 \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_2)). \end{aligned} \quad (8)$$

Записывая третье условие стационарности

$$\begin{aligned} 0 = \frac{1}{V} \frac{\partial G}{\partial F} &= (2p_7 V \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_1) + p_5 + p_2 H) \dot{\varepsilon}_1 (\sqrt{1 + (F \dot{\varepsilon}_1)^2})^{-1} + \\ &+ (2p_7 V \operatorname{arsh}(F \dot{\varepsilon}_2) + p_6 + p_3 H) \dot{\varepsilon}_2 (\sqrt{1 + (F \dot{\varepsilon}_2)^2})^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

с учетом соотношений (8), для нахождения F получаем уравнение (9), которое решаем численно методом Ньютона. В результате находим стационарную точку (H, V, F) , которая является точкой минимума функции G :

$$H = 26,84 \text{ МПа}, \quad V = 10500 \text{ МПа}, \quad F^{-1} = 17500 \text{ с}^{-1}. \quad (10)$$

2. Выбор постоянных модели материала Бамманна с нелинейным упрочнением

Нетрудно проверить, что общее решение дифференциального уравнения $\dot{\alpha} = x\dot{\varepsilon} - y\dot{\varepsilon}\alpha^2$ (x, y – постоянные), которое можно записать как $\frac{d\alpha}{d(\varepsilon - \varepsilon_0)} = x - y\alpha^2$, где ε_0 – произвольная

постоянная, имеет вид $\alpha = \sqrt{\frac{x}{y}} th(\sqrt{xy}(\varepsilon - \varepsilon_0))$. Здесь функция $th(\)$ – тангенс гиперболический. Соответственно для уравнения $\dot{\alpha} = (x\dot{\varepsilon} - y\dot{\varepsilon}\alpha^2)a$ (a – постоянная) общее решение будет $\alpha = \sqrt{\frac{x}{y}} th(a\sqrt{xy}(\varepsilon - \varepsilon_0))$.

Нелинейный кинематический (изотропный) закон упрочнения $\dot{\alpha} = x\dot{\varepsilon}_p - y\dot{\varepsilon}_p\alpha^2$ для материала Бамманна, учитывая, как показано выше, что $\dot{\varepsilon}_p = (1 - E^{-1}E_{ki})\dot{\varepsilon}$ на интервале $(\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1})$, можно записать как $\alpha = U \cdot th(W(G_{ki}(\varepsilon - \varepsilon_i) + R_{ki}))$, $U = \sqrt{\frac{x}{y}}$, $W = \sqrt{xy}$. Теоретическая функция сопротивления деформации $\sigma = F_k$, обобщающая представление (3) при $U, W \rightarrow 0$, получается на $(\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1})$ в виде

$$F_k = U \cdot th(W(G_{ki}(\varepsilon - \varepsilon_i) + R_{ki})) + H(G_{ki}(\varepsilon - \varepsilon_i) + R_{ki}) + Y + Varsh(\dot{\varepsilon}_k F) \quad (k = 1, 2). \quad (11)$$

Согласно (2), (11) теоретические функции являются непрерывными на $(\varepsilon_1, \varepsilon_n)$.

Запишем условие близости теоретических и экспериментальных кривых (4):

$$\sum_{i=1}^{n-1} \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_{i+1}} ((U \cdot th(W(G_{1i}(\varepsilon - \varepsilon_i) + R_{1i})) + f_1 - y)^2 + (U \cdot th(W(G_{2i}(\varepsilon - \varepsilon_i) + R_{2i})) + f_2 - z)^2) d\varepsilon \rightarrow \min. \quad (12)$$

Используя формулы $\int th^2(x)dx = x - th(x)$, $\int th(x)dx = \ln(ch(x))$ (функция $ch(\)$ – косинус гиперболический), $\int xth(x)dx \approx 2^{-1}(x_i + x_{i+1}) \int th(x)dx$ (интеграл берется на $(\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1})$) и вычисляя интегралы в (12), приходим, условно говоря, в первом и втором случаях к задачам

$$g = g(U, W, 0, V, F) \rightarrow \min (U, W, V, F > 0), \quad g = g(U, W, H, V, F) \rightarrow \min (U, W, H, V, F > 0); \quad (13)$$

$$\begin{aligned} g = & G + U^2(2 - W^{-1} \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^{n-1} G_{ki}^{-1} (th^2(W(G_{ki}(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) + R_{ki})) - th^2(WR_{ki}))) + \\ & + 2W^{-1}U \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^{n-1} G_{ki}^{-1} T_{ki} \ln(ch(W(G_{ki}(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) + R_{ki}))ch^{-1}(WR_{ki})) \\ & (T_{ki} = (G_{ki}H - E_{ki})2^{-1}(\varepsilon_{i+1} + \varepsilon_i) + H(R_{ki} - G_{ki}\varepsilon_i) + Y + Varsh(\dot{\varepsilon}_k F) - B_{ki}), \end{aligned} \quad (14)$$

где функция G определяется по (6), постоянные G_{ki}, R_{ki} по (2) и E_{ki}, B_{ki} по (1). После вычисления аналитических выражений для частных производных функции g в (14) был использован градиентный метод для нахождения приближенных решений задач в (13). Единственность искомой точки минимума проверялась путем варьирования начальной точки итерационного процесса поиска решения. Получены два набора постоянных [8]: для модели с нелинейным изотропным упрочнением в первом случае

$$H = 60,41 \text{ МПа}, R_d = 0,1677 \text{ МПа}^{-1}, V = 0,4418 \text{ МПа}, F^{-1} = 0,002 \text{ с}^{-1} \quad (15)$$

$$(\dot{\kappa} = (H - R_d \alpha^2) \dot{\epsilon}_p, \text{ где } H = UW, R_d = U^{-1}W \text{ в (13)})$$

и для модели с линейным изотропным упрочнением и нелинейным кинематическим упрочнением во втором случае

$$h = 67,458 \text{ МПа}, r_d = 0,5839 \text{ МПа}^{-1}, V = 0,39 \text{ МПа}, F^{-1} = 0,002 \text{ с}^{-1}, H = 11,335 \text{ МПа} \quad (16)$$

$$(\dot{\kappa} = H \dot{\epsilon}_p, \dot{\alpha} = (h - r_d \alpha^2) \dot{\epsilon}_p, \text{ где } h = UW, r_d = U^{-1}W \text{ в (13)}).$$

Дифференциальные соотношения в пояснениях к (15), (16) для величин изотропного κ и кинематического α упрочнений приведены для одноосного сжатия в соответствии с обозначениями в описании системы LS-DYNA [1, 7, 8].

3. Численное моделирование свободной осадки

Проведено тестирование модели материала Бамманна на задачах о простом сдвиге и одноосном сжатии. Расчетные диаграммы напряжение – деформация при одноосном сжатии (напряжения выбраны положительными) для трех вариантов полученных данных (10), (15), (16) выглядят удовлетворительно (рис. 1). При этом обнаружен интересный факт в вычислительной работе системы LS-DYNA, который, как установлено, повторяется и в программе ANSYS. При малой деформации имеет место физически неверный всплеск касательного напряжения, а также второго нормального напряжения. Этот дефект уменьшается при уменьшении шага по времени, но не исчезает полностью.

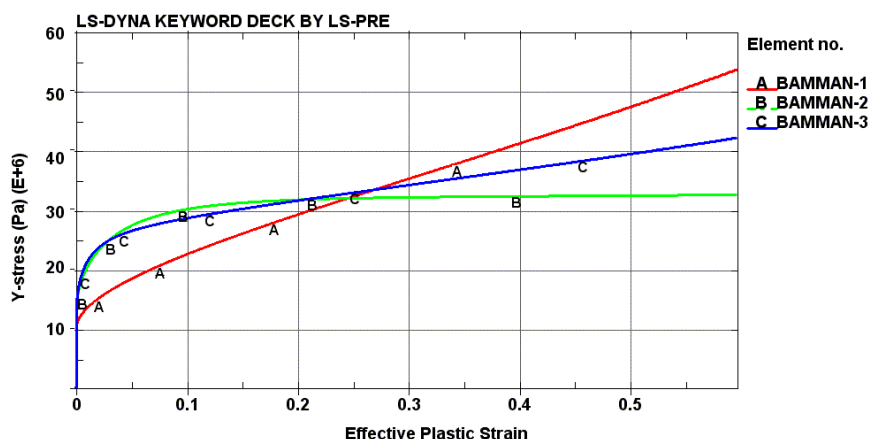


Рис. 1. Графики $\sigma = \sigma(\epsilon)$ при сжатии свинца для материала Бамманна

Процесс свободной осадки считаем осесимметричным. Используем, как и в случае одноосного сжатия, цилиндрическую систему координат. На контактной поверхности заготовки со штампом примем условие прилипания, боковая поверхность тела свободна от нагрузок. Осадка производилась при комнатной температуре на универсальной испытательной машине с постоянной скоростью деформирующего инструмента.

Лучшее, но неудовлетворительное совпадение с экспериментом [7] показала модель с постоянными параметрами материала (16). На рис. 2 показаны результаты численного моделирования (вверху изображены правые половины осевого сечения) и натурального эксперимента, которые сравниваются в момент наибольшего двойного бочкообразования. В физическом опыте наблюдаются отклонения от осесимметричной схемы деформации.

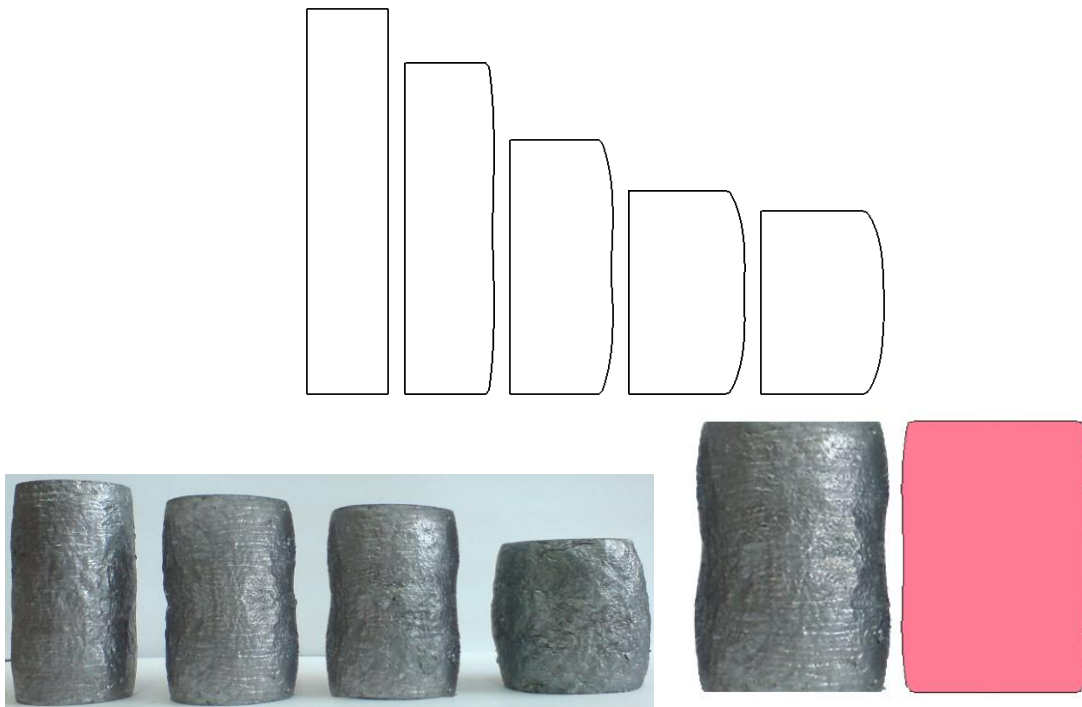


Рис. 2. Пластическое формоизменение свинцового цилиндрического образца при осадке

Следует отметить, что была проведена большая работа по построению подходящей конечно-элементной сетки. Исследованы различные варианты, причем на тривиальной, хотя и мелкой сетке эффект двойного бочкообразования отсутствовал (такая возможность обсуждалась выше). Использовались треугольные и четырехугольные конечные элементы первого порядка. В показанном на рис. 2 случае было задействовано 1120 конечных элементов и 1255 узлов. Ошибочно полагать, что качественное численное описание двойного бочкообразования достигнуто подгонкой: введением измельченной полоски в середине образца (рис. 3, *а*). Расчет для заготовки с отношением высоты к диаметру 1,8 (рис. 3, *б*), когда эффект отсутствует, помогает это понять. Приближенное решение для поля перемещений должно отыскиваться на множестве всех кинематически допустимых полей, и критерием выбора конечно-элементной сетки является физический эксперимент.

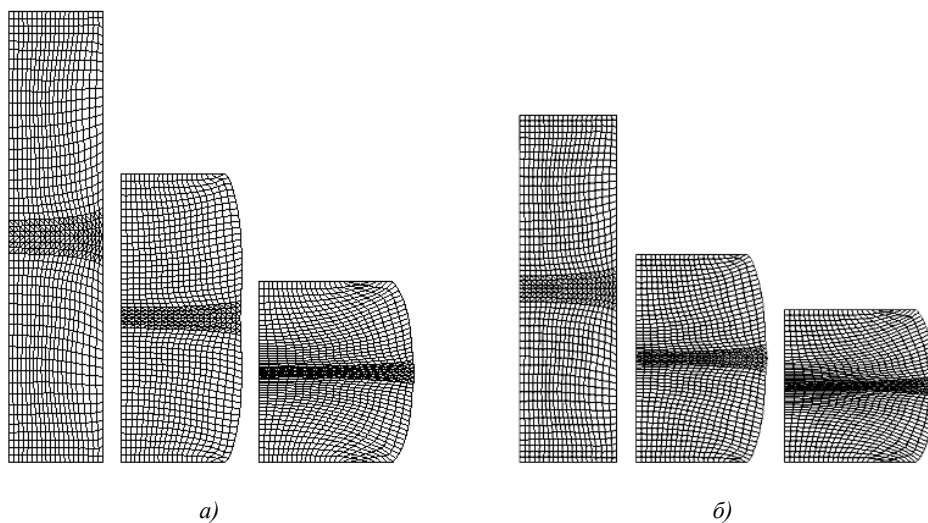


Рис. 3. Изменение замороженных расчетных конечно-элементных сеток.
Изображены правые половины осевых сечений

Заключение

В работе выполнена процедура идентификации постоянного материала, которая допускает обобщение, в том числе для учета температурной зависимости. Получены соотношения (5)–(9) и (13), (14) для случаев модели среды Бамманна с линейным и нелинейным упрочнениями. Данные соотношения позволяют определить численно постоянные материала h, r_d, H, R_d, V, F при известных экспериментальных кривых сопротивления деформации. Для свинца получены такие наборы постоянных, которые были использованы для расчетов. Результат является, вероятно, полезным для пользователей системы LS-DYNA, не имеющих специальных теоретических знаний по механике деформируемого твердого тела и испытывающих поэтому затруднение с выбором постоянного материала.

Исследован процесс свободной осадки высокой свинцовой цилиндрической заготовки с отношением высоты к диаметру 2,4. Данные численного эксперимента подтверждают отмеченный в [5, 6] факт существования проблемных течений металла в процессах ОМД, которые не поддаются правильному описанию существующими моделями сплошной среды.

Список литературы

1. LS-DYNA 960 Keyword User's Manual. Livermore Software Technology Corporation. – Livermore, California, 2001. – 1421 p.
2. Лурье, А.И. Нелинейная теория упругости / А.И. Лурье. – М. : Наука, 1980. – 517 с.
3. Поздеев, А.А. Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения / А.А. Поздеев, П.В. Трусов, Ю.И. Няшин. – М. : Наука, 1986. – 232 с.
4. Математическое моделирование и оптимизация технологических процессов, описываемых соотношениями геометрически нелинейной теории пластичности / М.Г. Давыдов [и др.] // Прикладная механика. – 1996. – Т. 32, № 2. – С. 73–80.
5. Швед, О.Л. Математическое моделирование процесса прямого выдавливания свинца / О.Л. Швед, А.А. Абрамов // Информатика. – 2007. – № 4 (16). – С. 133–136.
6. Абрамов А.А. Математическое моделирование проблемных течений в технологических процессах обработки металлов давлением с использованием системы LS-DYNA / А.А. Абрамов, О.Л. Швед // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. XXI Междунар. науч. конф. – Т. 4. – Саратов, 2008. – С. 152–155.
7. Охрименко, Я.М. Теория процессовковки / Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин. – М. : Высшая школа, 1977. – 295 с.
8. Vamman, D.J. Modeling temperature and strain rate dependent large deformations of metals / D.J. Vamman // Appl. Mech. Rev. – 1990. – Vol. 32, № 5. – P. 312–319.
9. Vamman, D.J. A model for finite deformation plasticity / D.J. Vamman, E.C. Aifantis // Acta Mechanica. – 1987. – Vol. 69. – P. 97–117.
10. Полухин, П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справ. / П.И. Полухин, А.М. Галкин, Г.Я. Гун. – М. : Металлургия, 1976. – 480 с.

Поступила 30.09.08

*Объединенный институт проблем
информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: swed@newman.bas-net.by*

O.L. Shwed, A.A. Abramov

**STUDYING THE EFFECT OF DOUBLE-BARREL DISTORTION
WITH PLASTIC METAL WORKING USING LS-DYNA SOFTWARE PACKAGE**

An approximate procedure of estimation of constant values in Bammann environmental model is suggested. The numerical modeling a free immersion process of toll solid cylindrical test-piece made from lead with an adhesion condition on a contact surface is performed. A weak initial barrel distortion is observed. Some substantial discrepancy between the finite element and physical model results is discovered at the considered stage of metal flow.