

УДК 621.762.4

### РЕШЕНИЕ ОДНОМЕРНОЙ ЗАДАЧИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДВУХСЛОЙНОЙ ПОРОШКОВОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

**В. В. Драгобецкий, Д. В. Савелов**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: savelov@viziit-net.com

Предложено аналитическое решение одномерной задачи пластического деформирования порошковой заготовки при ее импульсном нагружении. Процесс деформирования смоделирован для слоистой порошковой заготовки, которая представлена в виде бинарной системы, содержащей в своей структуре порошки твердых и мягких металлов. Для качественной оценки процесса деформирования рассмотрены два предельных случая, учитывающие размеры порошковой заготовки относительно длины ударной волны деформирования. Для различных соотношений твердых и мягких металлов обосновано дифференциальное уравнение движения элемента порошковой заготовки. Найдены аналитические зависимости для определения послослойных деформаций и напряжений в слоях бинарной системы. Установлено, что на характер деформирования порошковой заготовки влияет плотность слоев и акустическую жесткость.

**Ключевые слова:** деформация, заготовка, бинарная система, плотность, жесткость.

### РОЗВ'ЯЗОК ОДНОВИМІРНОЇ ЗАДАЧІ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ДВОШАРОВОЇ ПОРОШКОВОЇ ЗАГОТОВКИ ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

**В. В. Драгобецький, Д. В. Савелов**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: savelov@viziit-net.com

Запропоновано аналітичне розв'язання одновимірної задачі пластичної деформації порошкової заготовки при її імпульсному навантаженні. Процес деформації змодельований для шаруватої порошкової заготовки, яка представлена у вигляді бінарної системи, яка містить в своїй структурі порошки твердих і м'яких металів. Для якісної оцінки процесу деформації розглянуто два граничні випадки, що враховують розміри порошкової заготовки відносно довжини ударної хвилі деформації. Для різних співвідношень твердих і м'яких металів обґрунтовано диференціальне рівняння руху елемента порошкової заготовки. Знайдено аналітичні залежності для визначення пошарових деформацій та напруження в шарах бінарної системи. Встановлено, що на характер деформування порошкової заготовки впливає щільність шарів і акустична жорсткість.

**Ключові слова:** деформація, заготовка, бінарна система, щільність, жорсткість.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Прессование пористых порошковых заготовок статическими, вибрационными или комбинированными методами является основой прогрессивных порошковых технологий, применяемых для производства изделий из металлических порошков или керамики. Для реализации этих методов в производстве существуют прессовое оборудование, инструмент, а также печи для спекания [1, 2]. Как правило, это оборудование применяется для производства порошковых заготовок 1–7 групп сложности из керамики и порошков тугоплавких металлов одного типа с одинаковым или различным гранулометрическим составом.

Постоянно повышающиеся требования, предъявляемые к материалам новыми отраслями науки и техники, диктуют потребность в использовании материалов, которые обладают, казалось бы, несовместимыми свойствами. Так, например, существует чрезвычайно высокая потребность в материалах с высокой прочностью и низкой плотностью, износостойкостью и электроэрозионной стойкостью, электропроводностью и термостойкостью, пластичностью и усталостной прочностью. Существующие металлы и их сплавы, металлокерамика и полимеры не могут обеспечить требуемый комплекс свойств и эксплуатационных характеристик. Получение изделий, обладающих вышеперечисленными свойствами, возможно только путем создания композиций, в том числе и слоистых. Последним принадлежит особая роль среди новых материалов со специальными свойствами. Применение слоистых металли-

ческих композиций позволяет не только повысить эксплуатационную надежность и долговечность деталей, агрегатов и оборудования, но и значительно сократить расходы на их изготовление и решить комплекс технологических проблем.

Цель работы – моделирование процесса импульсного прессования двухслойной порошковой заготовки.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Рассмотрим схему деформирования двухслойной порошковой заготовки (рис. 1). При импульсном нагружении двухслойной порошковой заготовки на границе раздела слоев напряжение, создаваемое ударной волной, вызывает две новые волны. Одна волна проходит в следующий слой и вызывает в нем сжимающие напряжения  $\sigma_C^{i+1}$ . Другая волна, отраженная и вновь проходящая через «i», образует напряжения  $\sigma_{omp}^i$ . При импульсном нагружении скажется и присутствие инерционных эффектов, которые связаны с возникновением в очаге деформации инерционных напряжений  $\sigma_u^i$  и  $\sigma_u^{i+1}$ .

Совместная деформация порошковой заготовки при импульсном нагружении начинается при равенстве текущих динамических пределов текучести. Причем помимо механических характеристик материалов на процесс совместного пластического сжатия существенное влияние оказывают: закон изменения скорости нагружения, масса и плотность слоя порошка, сопротивление материала слоя порошка.

При продольном сжатии импульсной нагрузкой амплитуда отраженных волн в каждом слое зависит от

жесткости опоры.

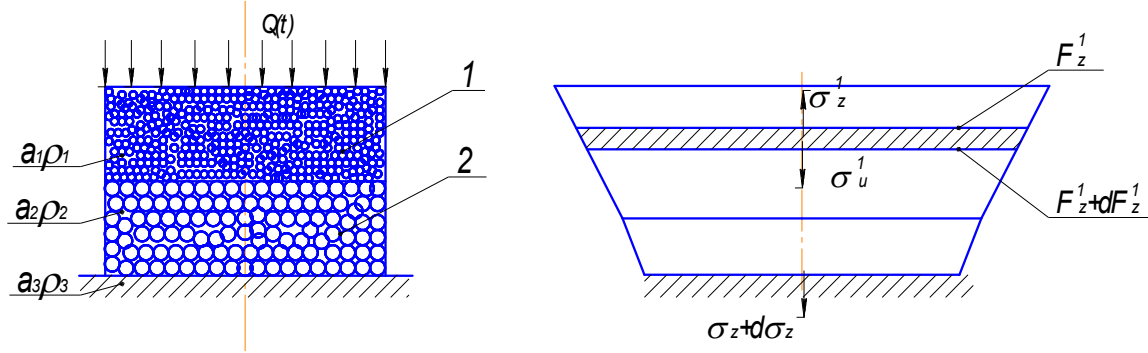


Рисунок 1 – Расчетная схема процесса деформирования двухслойной порошковой заготовки:  
1 – верхний слой порошковой заготовки; 2 – нижний слой порошковой заготовки

Решение задачи динамического поведения порошковой заготовки при воздействии импульсной нагрузки, в том числе и ударных волн, весьма затруднительно. Для получения качественной картины деформирования имеет смысл рассмотрение двух предельных случаев [3, 4]:

1. Толщины слоев настолько малы, что время прихода дифракционной волны от краев порошковой заготовки существенно меньше фазы сжатия прямой волны.

2. Толщины слоев настолько велики, что время прихода дифракционной волны от краев порошковой заготовки превосходит длительность фазы сжатия прямой ударной волной.

Рассмотрим первый случай, когда размеры порошковой заготовки малы по сравнению с длиной ударной волны. В этом случае дифракционные волны от краев преграды за короткий промежуток времени снимут давление в отраженной волне. Для простоты рассмотрим пакет из двух слоев. Дифференциальное уравнение движения для элемента верхнего слоя, расположенного между двумя бесконечно близкими сечениями  $F_z$  и  $F_z + dF_z$ , в проекциях на направление деформирования  $z$  имеет вид [4]:

$$d\sigma_u \cdot F_z + (\sigma_z + d\sigma_z) \cdot (F_z + dF_z) - \sigma_z \cdot F_z = 0. \quad (1)$$

Величину инерционных напряжений, возникающих вследствие изменения скорости движения деформируемой порошковой среды, найдем с учетом предположений, приведенных в работе [5]. Импульс силы, приложенный к элементу массы порошкового слоя, представим в виде:

$$dP = dm \frac{dv}{dt}. \quad (2)$$

Выражая дифференциалы скорости, массы и времени их значениями и предполагая преимущественность течения материала в направлении сжатия  $z$ , определим инерционное усилие из следующего выражения:

$$dP = v_0^2 \cdot \rho \cdot F_0 d\lambda, \quad (3)$$

где  $F_0$  – площадь поперечного сечения порошковой заготовки до начала процесса деформации;  $\rho$  – плотность материала порошкового слоя;  $v_0$  – скорость движения поверхности порошковой заготовки, нагружаемой внешней деформирующей нагрузкой;  $\lambda$  – уменьшение размера прессуемой порошковой заготовки в сечении  $F_z$ .

Пренебрегая в уравнении (1) бесконечно малыми величинами второго порядка, разделив на  $F_z$  и учитывая, что  $dF_z = d(F_0 \cdot \lambda) = -F_0 \frac{d\lambda}{\lambda^2}$ ,  $\frac{dF_z}{d\lambda} = -\frac{d\lambda}{\lambda}$ , получим:

$$\frac{d\sigma_z^{(1)}}{d\lambda} - \frac{\sigma_z^{(1)}}{\lambda} - \rho_1 \cdot v_0^2 \cdot \lambda = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) имеет следующий вид:

$$\sigma_z^{(1)} = \rho_1 \cdot v_0^2 \cdot \lambda^2 + C \cdot \lambda, \quad (5)$$

где  $C$  – произвольная постоянная.

В начальной стадии деформирования при  $t = 0$  и  $\lambda = 1$ ,  $\sigma_z^{(1)}(1,0) = Q(t)$ , где  $Q(t)$  – давление на поверхности нагружения. В свою очередь,  $v(1,0) = v_0$ .

Тогда:

$$\sigma_z^{(1)} = \rho_1 \cdot v_0^2 \cdot \lambda^2 + [Q(t) - \rho_1 \cdot v_0^2] \cdot \lambda. \quad (6)$$

Для второго случая получаем уравнение, аналогичное уравнению (5). Однако в данном случае на границе разделов слоев с координатой  $z = h_2(t) = H(t) - h_1(t)$ , где  $H(t)$  – общая толщина порошковой заготовки,  $h_1(t)$  и  $h_2(t)$  – толщины первого и второго слоев. Очевидно, что на второй слой действует давление, равное напряжению  $\sigma_z((H - h_1), (t))$ . Кроме того очевидно, что

$$v_{02} = \frac{v_0 \cdot F_0}{F} = \frac{v_0 \cdot h_2}{H_0}.$$

Следовательно, для второго случая получим:

$$\sigma_z^{(2)} = \rho_2 \cdot v_0^2 \cdot \frac{h_2}{H_0} \cdot \lambda^2 + \left[ \frac{\sigma_z^{(1)} \Big|_{\lambda=\frac{h_2}{H_0}}}{h_2 \cdot H_0^{-1}} - \rho_2 \cdot v_0^2 \cdot \left( \frac{h_2}{H_0} \right) \right] \cdot \lambda \quad (7)$$

Пластическое течение материала порошковой заготовки начинается при  $\sigma_z = \sigma_{DS}^i$ , где  $\sigma_{DS}^i$  – динамический предел текучести  $i$ -го порошкового слоя. Его значение наиболее часто выражается зависимостью:

$$\sigma_{DS}^i = \left( \sigma_S^{(i)} + B^{(i)} \cdot \dot{e}^{n(i)} \right) \cdot k^{(i)} \cdot e^{m(i)}, \quad (8)$$

где  $\sigma_S^{(i)}$  – статическое напряжение текучести;  $\dot{e}$  – линейная скорость деформации;  $e$  – относительная деформация;  $B, k, m, n$  – константы;  $i=1, 2$ .

Уровень напряжений при высокоскоростном нагружении в слоях порошковой заготовки в существенной мере зависит от скорости нагружения и плотности слоев.

Для прессуемых порошков одного типа движение системы может рассматриваться как движение пуансона и присоединенной массы из прессуемого порошка. Для порошковых материалов бинарной системы с существенной разницей пластических свойств твердого (Т) и мягкого (М), например, в заготовках содержащих слои карбида вольфрама и кобальта, движение можно рассматривать следующим образом. Для системы «Т+М» – как движение твердого тела с присоединенной массой из мягкого материала по аналогии с гидромеханикой, либо как задачу проникновения твердого тела в пластическую среду [5]. Для системы «М+Т» можно рассматривать как обтекание твердого тела вязкими материалами. При этом, в отличие от процессов статического деформирования, сила сопротивления порошка мягкого материала в зависимости от скорости течения и массы может вызвать пластическую деформацию более твердого порошкового материала.

Далее следует заметить, что в первом случае  $Q(t)$  – это давление в прямой проходящей ударной волне, то есть  $Q(t) = P(t)$ . Во втором случае к этой величине для первого слоя следует добавить давление в отраженной волне  $\sigma_{\text{отр}}(t)$  и вычесть давление в волне, во втором слое  $\sigma_2(t)$ . Так как давления в прямой и отраженной волнах связаны условием равенства скоростей частиц на поверхности раздела первого и второго слоев, имеем:

$$\sigma_{\text{отр}}(t) = P(t) - P_{\text{отр}}(t). \quad (9)$$

В свою очередь,

$$Q(t) = 2 \cdot P(t) - (\rho_1 \cdot a_1 + \rho_2 \cdot a_2) \cdot \frac{dz}{dt}, \quad (10)$$

где  $a_1, a_2$  – массовые скорости в первом и вто-

ром слоях порошковой заготовки;  $\frac{dz}{dt} = v_0 \cdot \lambda$  – значение, получаемое после преобразования выражения (2).

Для второго слоя, который установлен на неподвижном основании с жесткостью  $\rho_3 \cdot a_3$ , получим:

$$Q^{(2)}(t) = 2 \cdot Q^1(t) - (\rho_2 \cdot a_2 + \rho_3 \cdot a_3) \cdot \frac{v_0 \cdot h_2 \cdot \lambda}{H_0}. \quad (11)$$

Таким образом, при  $\rho_1 \cdot a_1 < \rho_2 \cdot a_2$  и  $\rho_2 \cdot a_2 < \rho_3 \cdot a_3$  возникают дополнительные волны сжатия, увеличивающие деформативность системы в целом, причем в большей мере порошковых материалов с меньшей жесткостью напряжений. Ряд материалов при высоких показателях пластичности обладают высокой акустической жесткостью и в составе с малопластичными материалами с низкой акустической жесткостью (титановые, высокопрочные алюминиевые сплавы) вовлекают их в процесс сжатия и уменьшают объем выдавливания более пластичного материала. В отличие от процесса одноосного растяжения слоистого тела при свободных условиях на контуре, который в условиях стационарного нагружения мало отличается от процесса сжатия. При растяжении импульсной нагрузкой имеет место обратный эффект. Он состоит в дополнительной догрузке порошковых материалов с меньшей акустической жесткостью.

Рассмотрим случай продольного сжатия бинарной системы без внешнего трения на контакте с пуансоном по аналогии со статическим нагружением [6]. Допущение об отсутствии межслойного трения для случаев совместной пластической деформации неприемлемо [4, 6].

При импульсном нагружении слои порошка с меньшей массой (плотностью) и акустической жесткостью имеют большие ускорения и перемещения. Поэтому одновременная пластическая деформация слоев и плоскопараллельное перемещение нормальных к действующей нагрузке сечений невозможно. И если выровнять массы слоев невозможно путем подбора их площадей  $\frac{F_i}{F_{i+1}} = \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i}$ , то реализовать

допущение о равенстве акустических жесткостей слоев технически сложно. Будем считать, что слои соединены между собой и поверхность раздела не деформируется в поперечном направлении.

В этом случае уравнение равновесия для каждого слоя имеет вид (4). Однако в этом случае учет отраженных волн обязателен вследствие их распространения в направлении большего размера. Граничные условия для каждого слоя одинаковы и имеют вид:  $\sigma_z^1(1,0) = \sigma_z^2(1,0) = Q(t)$ .

Когда волны разгрузки начинают распространяться по слоям, разница напряжений  $\rho_1 \cdot a_1 \cdot v - \rho_2 \cdot a_2 \cdot v$  не должна превышать прочности сцепления слоев. Следует, однако, заметить, что в рассматриваемом случае продольного одноосного сжатия бинарной системы независимое реше-

ние уравнения (4) для каждого слоя не корректно по той причине, что деформации и скорости деформаций слоев совпадают. Задание этих условий на поверхности раздела переводит задачу в разряд двумерных. Однако с учетом аксиом параллельных и последовательных соединений [6] при относительно малой жесткости одного из слоев напряженно-деформируемое состояние обобщенного тела определяется для более твердого (менее деформируемого) слоя. распределение деформаций в мягком слое принимается как для твердого, но в условиях динамического нагружения необходимо учесть влияние инерционных напряжений, зависящих от деформируемых масс.

При равенстве масс (М) и (Т) слоев в третий член уравнения (4) добавляется плотность мягкого слоя. если масса слоя больше, то наличие мягкого слоя снижает скорость деформации и массовую скорость частиц слоя (Т). При меньшей массе слоя (М) твердый слой (Т), как бы дополнительно увлекается более пластичным материалом. Импульс этой массы слоя (М) по аналогии с выражением (1) равен  $v_0 \cdot d \cdot \lambda \cdot dm$ , а действующая сила  $dp = v_0^2 \cdot \rho_2 \cdot F_{20} d\lambda$ .

В уравнение (4) вводится дополнительный параметр  $v_0^2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{F_{20}}{F_{10}}$ , знак которого противоположен

$v_0^2 \cdot \rho_1 \cdot \lambda$ . При массе слоя (М), превосходящей массу слоя (Т), знаки параметров совпадают.

Далее, по аналогии с равномерной совместной пластической деформацией порошков различных металлов при поперечном сжатии [6], попытаемся установить связь между напряжениями и скоростями деформаций слоев и прессовки, что в целом удовлетворяют соотношениям:

$$\sigma_{SD} = f(\sigma_{SM}, \dot{e}_M, D_M, m); \quad (12)$$

$$\sigma_{SD} = f(\sigma_{ST}, \dot{e}_T, D_T, m_T); \quad (13)$$

$$\sigma_{SD} = f(\sigma_{SO}, \dot{e}_O, D_O, m_O). \quad (14)$$

Наиболее часто принимают аппроксимирующую зависимость динамического предела текучести от скорости деформации в виде:

$$\sigma_{SDO} = \sigma \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\dot{e}}{D} \right)^m \right]; \quad (15)$$

$$\sigma_{SDO} = \sigma_{SO} + m \cdot \lg \dot{e}; \quad (16)$$

$$\lg \sigma_{SDO} = \lg \sigma_{SO} + m \cdot \lg \dot{e}. \quad (17)$$

Уравнения (16) и (17) совместно с уравнениями (12)–(14) содержат по четыре неизвестных и, используя соотношения для скорости деформаций слоистого порошкового тела с частными обжатиями его компонентов  $\lambda_M, \lambda_T$ , получаем замкнутую систему уравнений.

Уравнение (15) приведем к виду:

$$\sigma_{SDO} - \sigma_{SO} = \frac{\sigma_{SO}}{D^n} \cdot \dot{e}^n. \quad (18)$$

Введем следующие обозначения:

$$\frac{1}{n} = B; \quad \frac{\sigma_{SO}}{D^n} = A; \quad \sigma_{SDO} - \sigma_{SO} = \sigma. \quad (19)$$

В этом случае выражение (15) с учетом (18) и (19) примет вид:

$$\sigma = A \cdot \dot{e}^B. \quad (20)$$

Используя соотношения [7]:  $\dot{e} = \frac{V}{H}$ ;

$$V = V_0 \cdot \lambda_{\Sigma} = V_0 \cdot \frac{(h_M + h_T)}{H_0}; \quad h_M = (1 - e_M) \cdot \lambda_{MO} \cdot H_0$$

$$\text{где } \lambda_{MO} = \frac{h_{MO}}{H_0}; \quad \lambda_{TO} = \frac{h_{TO}}{H_0}; \quad h_{TO} = (1 - e_T) \cdot \lambda_{TO} \cdot H_0,$$

получим:

$$\dot{e}_0 = V_0 \cdot [(1 - e_M) \cdot \lambda_{MO} + (1 - e_T) \cdot \lambda_{TO}]. \quad (21)$$

Если в случае равномерной установившейся деформации необходимо установить зависимость  $\sigma_0 = f(e_e)$  и решить систему (15)–(17) путем элементарных преобразований, то в динамике зависимость  $\dot{e} = f(e)$  определяется из уравнения (3). Следует учесть, что  $\lambda = \frac{h}{H_0} = 1 - e$ , а  $d\lambda = -de = -dz$ .

Силу инерции можно представить в виде:

$$\rho \cdot F_z dz \cdot \frac{dv}{dt}. \quad (22)$$

Учитывая, что  $\sigma_z = \sigma = A \cdot \dot{e}^B$ ,  $d\sigma = A \cdot \dot{e}^{B-1} \cdot d\dot{e}$ ,

$\frac{d\dot{e}}{dt} = \frac{1}{H_0} \cdot \frac{dV}{dt}$  [7], уравнение (3) преобразуется к

виду:

$$\frac{de}{1-e} = \left( \frac{m}{\dot{e}} - \frac{\rho}{H_0^2} \cdot \frac{\dot{e}^{1-m}}{A} \right) d\dot{e}. \quad (23)$$

После интегрирования получаем:

$$e = 1 - \left( \frac{\dot{e}}{\dot{e}_0} \right)^{m-2} \cdot \exp \left( \rho \cdot \frac{\dot{e}^{2-m} - \dot{e}_0^{2-m}}{H_0^2 \cdot A \cdot (2-m)} \right). \quad (24)$$

где  $\dot{e}_0$  – относительная линейная скорость деформации в начале осадки при  $e = 1$ .

Полученная зависимость  $e = f(\dot{e})$  пригодна для слоев порошковой заготовки «М» и «Т». Выражения  $e_M = f(\dot{e}_M)$  и  $e_T = f(\dot{e}_T)$  сначала подставляем в формулу (21), после подстановки которой в (15) и с учетом обозначений (19), получаем связь между напряжениями и скоростями деформации слоев и порошковой заготовки в целом. Использование зависимости  $\sigma = f(\dot{e})$  в виде (16) и (17) приводит к интегралам, не выражающимся в элементарных функциях.

**ВЫВОДЫ.** Таким образом, в результате проведенных теоретических исследований получены аналитические зависимости для определения послы-

ных скоростей деформаций и напряжений в слоях порошковой заготовки, которая представлена в виде бинарной системы.

Установлено, что на характер деформирования слоистой порошковой заготовки существенное влияние оказывают акустическая жесткость и плотность слоев.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Маринин В.М., Чистяков Е.Н.; под ред. В.А. Григоряна. – М.: РадиоСофт, 2008. – 406 с.
2. Порошковая металлургия / С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. – М.: Металлургия, 1980. – 496 с.
3. Высокоскоростная деформация металлов // Беляев В.И., Ковалевский В.Н., Смирнов Г.В. –

Минск.: Наука и техника, 1987. – 352 с.

4. Драгобецкий В.В. Решение одномерной задачи пластического деформирования биметаллических заготовок при импульсном нагружении // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 8–9. – Днепропетровск: Изд-во НметАУ. – С. 507–511.

5. Скоростное деформирование конструкционных материалов / Майборода В.П., Кравчук А.С., Холин Н.Н. – М.: Машиностроение, 1986. – 264 с.

6. Теория пластичности: учебное пособие. Сварка взрывом // Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г., Конон Ю.А. и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.

7. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П.Б. Меллор; пер. с англ. А.Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.

#### DECISION-DIMENSIONAL PROBLEMS PLASTIC DEFORMATION THE TWO-LAYER POWDER PREPARATIONS UNDER IMPACT LOADING

V. Dragobetsky, D. Savelov

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: savelov@vazit-net.com

Analytical solution of unidimensional task of flowage of powder-like purveyance is offered at its impulsive lading. The process of deformation is modelled for the stratified powder-like purveyance, which is presented as a binary system, containing in the structure of sprinkle of snow of hard and soft metals. For the high-quality estimation of process of deformation two maximum cases, taking into account the sizes of powder-like purveyance in relation to length of shock wave of deformation, are considered. For different correlations of hard and soft metals grounded differential equalization of motion of element of powder-like purveyance. Analytical dependences are found for determination of layer deformations and tensions in the layers of the binary system. It is set that the closeness of layers and acoustic inflexibility influences on character of deformation of powder-like purveyance.

**Key words:** deformation, powder-like purveyance, binary system closeness, inflexibility.

#### REFERENCES

1. Grigorjan, V.A., Kobylykin, I.F., Marinin, V.M., and Chistjakov, E.N. (2008), *Materialy i zashhitnye struktury dlja lokal'nogo i individual'nogo bronirovaniya* [Materials and protective structures for the local and individual reserving], RadioSoft, Moscow, Russia.
2. Kiparisov, S.S., and Libenson, G.A. (1980), *Poroshkovaja metallurgija* [Powder-like metallurgy], Metallurgija, Moscow, Russia.
3. Beljaev, V.I., Kovalevskij, V.N., and Smirnov, G.V. (1987), *Vysokoskorostnaja deformacija metallov* [High-speed deformation of metals], Nauka i tehnika, Minsk, Byelorussia.
4. Dragobetsky, V. (2002), "Decision of unidimensional task of flowage of bimetallic purveyances at an

impulsive lading", *Metallurgical and Mining Industry*, no. 8–9, pp. 507–511.

5. Mayboroda, V.P., and Kravchuk, A.S., and Kholin N.N., (1986), *Skorostnoye deformatsionnoe konstruksionnikh matherialov* [High-speed deformation of structural materials], Mashinostroyeniye, Moscow, USSR.

6. Arkulis, G. (1987) *Teorija plastichnosti* [Theory of plasticity], Mashinostroyeniye, Moscow, Russia.

7. Dzhonson, U. and Mellor, P.B. (1979) *Teorija plastichnosti dlja inzhenerov* [Theory of plasticity for engineers], ed. English by Ovchinnikov A.G., Mashinostroyeniye, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 20.03.15.