

УДК 621.762.4

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ И ПОРИСТЫХ ПОРОШКОВЫХ ЗАГОТОВОК

**Д. В. Савелов**

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

Рассмотрена математическая модель процесса деформирования дисперсных и пористых порошковых заготовок с использованием метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и сочетанием этого процесса с процессом вибрационного прессования. При моделировании учитывались следующие основные факторы: нагрев заготовки, масса продуктов синтеза при деформировании и процесс уплотнения. Составлены уравнения, устанавливающие взаимосвязь скорости деформаций и напряжения, а также кинематические соотношения и уравнение неразрывности, которые учитывают тензоры напряжений и скоростей деформаций, вектор скорости, скорость объемных изменений, сопротивление деформаций материала основы, интенсивность скоростей деформаций и относительную плотность. Найдено выражение для определения максимального размера образца порошковой заготовки, в котором все поры будут открыты.

**Ключевые слова:** модель, прессование, заготовка, деформация, процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДЕФОРМУВАННЯ ДИСПЕРСНИХ І ПОРИСТИХ ПОРОШКОВИХ ЗАГОТОВОК

**Д. В. Савелов**

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

Розглянуто математичну модель процесу деформації дисперсних і пористих порошкових заготовок із застосуванням методу само розповсюдженого високотемпературного синтезу, що сам розповсюджується, і поєднанням цього процесу з процесом вібраційного пресування. При моделюванні враховувалися наступні основні чинники: нагрів заготовки, маса продуктів синтезу при деформації і процес ущільнення. Складено рівняння, що пов'язують швидкості деформацій і напруження, а також кінематичні співвідношення і рівняння нерозривності, які враховують тензори напруження і швидкості деформацій, вектор швидкості, швидкість об'ємних змін, опір деформацій матеріалу основи, інтенсивність швидкостей деформацій і відносну щільність. Знайдено вирази для визначення максимального розміру зразка порошкової заготовки, в якому всі пори будуть відкриті.

**Ключові слова:** модель, пресування, заготовка, деформація, процес саморозповсюдженого високотемпературного синтезу.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Дисперсные композиции из гранул, низко- и высокодисперсный порошок широко используются для изготовления различных изделий методами порошковой металлургии. Кроме того, порошковые изделия различного рода материалы могут быть получены методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и сочетанием СВС-процесса с процессами вибрационного прессования. Новые возможности для получения плакированных полуфабрикатов открывает совмещение процессов вибрационного прессования с СВС-наплавкой.

На сегодня хорошо известен метод взрывной штамповки заготовок из труднодеформируемых материалов, нагреваемых пиротехническим составом [1]. Применение в качестве пиротехнического состава смесей порошков, способных к бескислородному горению, позволяет осуществить нагрев заготовки, сцепление продуктов горения с последней и при последующем деформировании – уплотнение покрытия.

Новыми направлениями в области получения порошковых заготовок является сочетание процессов вибрационного или вибрационно-статического пластического деформирования с СВС, а также пластическое деформирование двухслойных порошковых заготовок и разработка оборудования для осуществления этих процессов.

Следовательно, дальнейшие теоретические исследования сочетания процесса вибрационного деформирования дисперсных и пористых порошковых заготовок и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза являются актуальными.

Цель работы – моделирование процессов деформирования дисперсных и пористых порошковых заготовок сочетанием СВС-процесса с процессом вибрационного прессования.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Данная работа является попыткой дополнить существующие исследования процесса прессования порошковых заготовок и применить СВС-процессы к процессам вибрационного прессования.

При моделировании рассматриваемого процесса необходимо учитывать факторы, сопровождающие процесс формообразования. Прежде всего, это нагрев заготовки, учет дополнительной массы продуктов синтеза при деформировании и процесс уплотнения продуктов.

Расчет напряженно-деформированного состояния необходимо производить как самой порошковой заготовки, так и продуктов синтеза. Следует учесть, что вследствие высокого тепловыделения при реакции горения температура СВС – состава на поверхности заготовки во время синтеза – сильно возрастает. Это предопределяет благоприятные условия для спекания и формообразования. На заключительной

стадии горения формируются основные физико-химические свойства материала, и стабилизируется локальная пористость. Время выдержки продуктов горения перед деформированием выбирается в зависимости от химической активности реагентов. Необходимо, чтобы произошел достаточный разогрев деформируемой заготовки и «сваривание» ее с продуктами синтеза.

Основными исходными данными при построении математической модели процесса принимаем следующие: интенсивность тепловыделения при

$$\begin{aligned} \nabla_{\gamma} M_{mn}^{\beta\alpha} - Q_{mn}^{\beta} R_{\gamma mn}^{\beta} + P_{mn}^{\alpha} + T_{mn}^{\alpha} + S_{mn}^{\alpha} &= \bar{\rho} \dot{X}_{mn}^{\alpha} - \rho \dot{X}_{mn}^{\alpha} c, \\ M_{mn}^{\beta\alpha} R_{\beta\alpha}^{mn} + \nabla_{\beta} Q_{\beta}^{mn} + P_{mn}^3 + T_{mn}^3 + S_{mn}^3 &= \rho \dot{X}_{mn}^3 - \rho \dot{X}_{mn}^3 c, \\ \nabla_{\beta} L^{\alpha\beta} - Q_{mn}^{\alpha} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\nabla_{\beta}$  – знак ковариантного дифференцирования;  $M_{mn}$  – мембранные силы,  $L$  – изгибающие моменты;  $Q_{mn}^{\beta}$  – перерезывающие силы;  $\bar{\rho}$  – приведенная масса;  $\dot{X}_{mn}^j$  – ускорение;  $P_{mn}^j$  – силовое воздействие импульсной нагрузки;  $T_{mn}$  – усилия трения в периферийной зоне заготовки;  $S_{mn}$  – усилия тормозящих элементов матрицы;  $\Pi_{mn}$  – усилия, действующие на заготовку со стороны матрицы;  $R_{mn}$  – тензор кривизны;  $c$  – скорость звука в последующей заготовке.

Систему дифференциальных уравнений заменяем конечно-разностным аналогом. В принятой модели подслои, составляющие каждый слой, разделены друг от друга материалом с модулем сдвига  $G^i$  и сопротивлением пластическому сдвигу  $\tau_s^i$ . Весь изгиб концентрируется в точках расположения масс.

Расчет производится в следующем порядке. На первом этапе производится разбивка слоя порошковой заготовки на элементы и подслои, определяются начальные и граничные условия.

Реологическая модель материала порошковой заготовки выбирается с учетом его физических свойств.

Далее определяются компоненты ускорений  $\ddot{x}_1$  и  $\ddot{x}_2$  во всех узлах, а затем определяются положения узлов в начальный момент времени  $\tau \rightarrow 1$  из выражений, определяющих ускорения:

$$x_{1,\tau+1}^i = \ddot{x}_{1,\tau+1}^i \cdot \Delta t^2 + 2x_{1,\tau}^i - x_{1,\tau-1}^i; \quad (2)$$

$$x_{2,\tau+1}^i = \ddot{x}_{2,\tau+1}^i \cdot \Delta t^2 + 2x_{2,\tau}^i - x_{2,\tau-1}^i, \quad (3)$$

$$M_{mn}^{\alpha\beta} = \int_{-0,5\delta}^{+0,5\delta} \left[ \sigma_{\alpha_1}^{mn} (\delta_1^{\beta} - x^3 B_{1mn}^{\beta}) + \sigma_{\alpha_2}^{mn} (\delta_2^{\beta} - x^3 B_{2mn}^{\beta}) (G_{mn} \cdot A_{mn}^1)^{0,5} \right]; \quad (7)$$

$$L_{mn}^{\alpha\beta} = \int \left[ \sigma_{\alpha_1}^{mn} (\delta_1^{\beta} - x^3 B_{1mn}^{\beta}) + \sigma_{\alpha_2}^{mn} (\delta_2^{\beta} - x^3 B_{2mn}^{\beta}) \right] x; \quad (8)$$

$$x \cdot (G_{mn} \cdot A^{-1})^{0,5} x^3 dx^3; \quad (9)$$

сгорании; удельные теплоемкость и теплопроводность.

Материал продуктов синтеза предполагается объемно-сжимаемым, изотропным, обладающим скоростным и деформационным упрочнением, термически разупрочняемым. При этом упругие деформации не учитываются.

Дифференциальные уравнения динамического равновесия элемента синтеза имеют вид:

где  $\Delta t$  – величина шага интегрирования по времени;  $\tau$  – номер шага по времени.

Зная координаты точек приведения и учитывая условия постоянства объема, рассчитываем величины относительных деформаций по подслоям каждого слоя. После этого находим приращения деформаций  $\Delta \epsilon_{43,\tau+1}^i$ ,  $\Delta \epsilon_{4,\tau+1}^i$  и  $\Delta \epsilon_{3,\tau+1}^i$ .

Предполагая, что изменение напряжений происходит в соответствии с законом Гука, определяем величину

$$\Delta \sigma_{3,\tau+1} = \frac{E^i}{1 - \nu_i^2} (\Delta \epsilon_3^i + \nu^i \Delta \epsilon_4^i)_{\tau+1}; \quad (4)$$

$$\Delta \sigma_{4,\tau+1} = \frac{E^i}{1 - \nu_i^2} (\Delta \epsilon_4^i + \nu^i \Delta \epsilon_3^i)_{\tau+1}; \quad (5)$$

$$\Delta \sigma_{34,\tau+1} = G^i \Delta \epsilon_{34}, \quad (6)$$

где  $\nu^i$  – коэффициент Пуассона  $i$ -го слоя,  $G^i$  – модуль сдвига  $i$ -го слоя.

Затем осуществляется проверка, находятся ли результирующие напряжения внутри области, ограниченной кривой текучести, т.е. вычисляем критерий текучести Губера–Мизеса  $F_{\tau+1}$ . При  $F_{\tau+1} > 0$ , когда Закон Гука уже не справедлив, используем уточненную теорию пластического течения, либо усложненную модель Г. Бакхауза, учитывающую эффект Боушингера.

На границе слоев выполняются условия неразрывности деформаций и напряжений. При определении ускорений заготовку приводим к однослойной, а остальные параметры определяются для каждого компонента порошкового слоя.

Значения усилий и моментов, действующих на каждый элемент, определяются из выражений:

$$\nabla_{\beta} L_{mn}^{\alpha\beta} = \partial_{\beta} L_{mn}^{\alpha\beta} + \left\{ \gamma^{\alpha} \right\} \cdot L_{mn}^{\gamma\beta} + \left\{ \gamma^{\beta} \right\} \cdot L_{mn}^{\alpha\gamma} = Q_{mn}^{\alpha}; \quad (10)$$

$$Q_{mn}^{\alpha} = \frac{\partial L_{mn}^{\alpha\beta}}{\partial x^{\beta}} + \bar{A}_{mn}^{\alpha} \cdot \frac{\partial \bar{A}_{\gamma}^{mn}}{\partial x^{\beta}} \cdot L_{mn}^{\gamma\beta} + \bar{A}_{mn}^{\beta} \frac{\partial \bar{A}_{\gamma}^{mn}}{\partial x^{\beta}} \cdot L_{mn}^{\alpha\gamma}; \quad (11)$$

$$|G_{\alpha\beta}^{mn}| = |A_{\alpha\beta}^{mn} - 2x^3 B_{\alpha\beta}^{mn}|, \quad (12)$$

где  $A_{\alpha\beta}^{mn}$  – метрический тензор;  $B_{\alpha\beta}^{mn}$  – тензор кривизны;  $\{\alpha/\gamma \cdot \beta\} = \bar{A}_{mn}^{\alpha} (\partial A_{\gamma}^{mn} / \partial x^{\beta})$  – символ Кристофиля первого рода. Ускорения узлов сетки сре-

динной поверхности порошковой слоистой заготовки на очередном поле интегрирования определяем из зависимости, имеющей следующий вид:

$$\ddot{x}_{mn}^j = \frac{A_{mn}^{0,5}}{\bar{\rho}_o} \cdot \left( P_{mn}^j + T_{mn}^j + S_{mn}^j + \Pi_{mn}^j + \left( \frac{\partial V_{mn}^{\beta j}}{\partial x^{\beta}} + \bar{A}_{mn}^{\beta} \cdot \frac{\partial \bar{A}_{\gamma}^{mn}}{\partial x^{\beta}} \cdot V^{\gamma j} \right) \right), \quad (13)$$

где  $A_{mn}$  – определитель метрического тензора,  $V_{mn}^{\alpha j}$  – пространственно-поверхностный тензор. Усилия тормозящих элементов матрицы при вытяжке с совмещением операций сварки и штамповки взрывом определяем из решения задачи проникновения сферической оболочки в сыпучий грунт. На каждом шаге интегрирования, считая, что поверхность заготовки близка к сферической, определяем радиус сферы:

$$a_i = (D^2 + 4\chi^2) / 8\chi, \quad (14)$$

где  $a_i$  – текущий радиус сферы;  $D$  – диаметр очка матрицы;  $\chi$  – перемещение центральной точки порошковой заготовки.

Сила сопротивления сыпучей среды, действующая на каждый узел, определяется из выражения [2]:

$$\bar{S}_{mn} = \frac{S}{4n} \rho \ddot{\Psi}_{mn} \tau_1 a_a^2 \left[ (1 - \lambda^2) \rho \frac{\chi}{a_i} \left( 2 - \frac{\chi}{a_i} \right) - f^2 \left( \frac{\chi}{a_i} \right)^2 \left( 2 - \frac{\chi}{a_i} \right) \right], \quad (15)$$

где  $n$  – количество узлов;  $S$  – сила сопротивления;  $\lambda = l - b$  – коэффициент сжимаемости сыпучей среды;  $\rho$  – плотность сыпучей среды;  $a_i$  – радиус среды текущий.

Временной интервал  $\Delta t$  выбирается из условия устойчивости вычислительного процесса [3–5]:

$$\Delta t \leq \Delta X_{5,j,0} \left[ \rho_3^k (1 - \nu^k)^2 (E^k)^{-1} \right]^{0,5}, \quad (16)$$

где  $\rho_3^k$  – плотность  $k$ -го материала заготовки;  $\nu_k$  – коэффициент Пуассона;  $E^k$  – модуль Юнга  $k$ -го материала порошковой заготовки.

В данной модели задача определения параметров внешней нагрузки, параметров матрицы и напряжений контактного трения сводится к минимизации функционала:

$$\Gamma(P_{mnl}, \tau_l) = \sum_1^{\bar{N}} \sum_1^N \left( \frac{N_{mn}^{\varepsilon}}{N_{\varepsilon}^*} \right)^{(2)} + \left( \frac{\dot{x}_{mn}^{\varepsilon}}{\dot{x}_{\varepsilon}^*} \right)^{(2)}, \quad (17)$$

где  $N_{mn}^{\varepsilon}$  – длина нормали, восстановленной в  $mn$ -м узле заготовки на  $\varepsilon$ -м шаге приближения, до поверхности матрицы;  $\dot{X}_{mn}^{\varepsilon}$  – скорость подхода  $mn$ -го узла заготовки к поверхностям матрицы;  $N_{\varepsilon}^*, \dot{x}_{\varepsilon}^*$  –

среднее значение зазора между заготовкой и матрицей и среднее значение скорости подхода заготовки к поверхности матрицы;  $\tau_l$  – время процесса.

Приращения деформаций термических компонент выражаются следующим образом:

$$\Delta \varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m} = (\Delta \varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m})^p - (\Delta \varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m})^t; \quad (18)$$

$$(\Delta \varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m})^p = \Delta \lambda_{\gamma,\eta,\tau} \cdot \sigma_{\gamma,\eta,\tau}^{k,e,m}, \quad (19)$$

где  $\varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m}$  – компоненты девиатора деформаций;

$\sigma_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m}$  – компоненты девиатора напряжений;  $\Delta \lambda_{\gamma,\eta,\tau}$  – мера пластической деформации;  $k, l$  – индексы;  $\gamma$  – номер узла;  $\eta$  – номер слоя;  $\tau$  – момент времени процесса деформирования.

Уравнение связи между скоростями деформаций и напряжениями, а также кинематические соотношения и уравнение неразрывности имеют вид:

$$\sigma_{ik} = \frac{\tau_s}{\sqrt{f_1^2 H^2 + f_2^2 \xi_0}} \left[ f_1 \xi_{ik} + \left( f_2 - \frac{1}{3} f_1 \right) \delta_{ik} \xi_0 \right]; \quad (20)$$

$$\xi_{ik} = 0,5 (\dot{\varepsilon}_{i,k} + \dot{\varepsilon}_{k,i}); \quad (21)$$

$$\partial \rho / \partial t + \rho_{,i} \dot{\varepsilon}_i / \rho + \xi_0 = 0, \quad (22)$$

где  $\sigma_{i,k} \xi_{ik}$  – тензоры напряжений и скоростей деформаций;  $\dot{\varepsilon}_i$  – вектор скорости;  $\xi_0 = \xi_i$  – скорость объемных изменений;  $\tau_s$  – сопротивление деформаций материала основы;  $H$  – интенсивность скоростей деформаций;  $\rho$  – относительная плотность;  $f_1, f_2$  – функции, зависящие от плотности  $\rho$ .

Функции  $f_1$  и  $f_2$ , зависящие от плотности  $\rho$  и входящие в условие пластичности эллипсоидного типа, связаны следующим уравнением:

$$T^2 / f_1^2 + \sigma_0^2 / f_2^2 = 1, \quad (23)$$

где  $T$  – интенсивность касательных напряжений;  $\sigma_0$  – среднее напряжение.

Физический закон (реологическое уравнение) принимаем в виде:

$$\begin{aligned} T &= T(\rho_0, \Lambda, \varepsilon); \\ \sigma &= \sigma(\rho_0, \Lambda, \varepsilon). \end{aligned} \quad (24)$$

Решение задач, связанных с формообразованием некомпактных материалов, в значительной степени зависит от правильного задания граничных условий, в частности, условий трения. Последние вытекают из корректности формулировки закона трения, связывающего контактные касательные напряжения от нормальных. Установлено [6], что при деформации металлических порошков в холодном состоянии зависимость касательных напряжений от нормальных существенно нелинейная. Кроме того, ход кривых, описывающих зависимость  $f(\tau) \sim f(\sigma)$  различен для нагрузки и разгрузки. Это вытекает из того, что при нагрузке растет плотность материала, изменяя механику взаимодействия шероховатостей инструмента и заготовки. При разгрузке плотность практически не меняется. При холодной деформации порошков закон трения обычно формулируют в следующем виде [7]:

$$f_\tau = f_\tau(f(\sigma), \rho_s) \quad (25)$$

где  $\rho$  – плотность деформируемого материала в некоторой точке контактной поверхности.

Математическую модель зависимости можно принимать в виде:

$$\left. \begin{aligned} f_\tau &= a + bf_\sigma + cf_\sigma^2, \text{ при } \dot{\rho} > 0 \\ f_\tau &= (\rho \cdot d + e)f_\sigma, \text{ при } \dot{\rho}_t = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (26)$$

где  $a, b, c, d, e$  – эмпирические коэффициенты.

В случае использования СВС-процесса для нанесения покрытий и разогрева деформируемой заготовки продукты синтеза слипаются с ней, и имеет место совместная деформация с компактированием, т.е. имеет место равенство межслойных деформаций на границе раздела продуктов синтеза и порошковой заготовки.

Для решения системы уравнений используем сетку  $x_1, x_2$ , ячейками которой являются квадраты. Физическими элементами модели являются узлы с соответствующими количествами массы. При построении дискретной модели деформирования заготовки необходимо учитывать наличие пористости и ее особенности в СВС-продуктах. Отличительная особенность пористых материалов, получаемых методом СВС – высокая доля открытых пор (~99 %) [8].

Максимальный размер образца порошковой заготовки, в котором все поры будут открыты, определится по формуле:

$$R_{\max} = t_2 \cdot V. \quad (27)$$

Величина  $t_2$  находится из распределения температуры в зоне Михельсона [9]:

$$t_2 = a \cdot V_1^{-1} \ln(T_1 - T_o) / (T_2 - T_o), \quad (28)$$

где  $a$  – температуропроводность;  $V_1$  – скорость горения;  $T_2, T_o$  – температура плавления и начальная температура.

Для порошковой смеси карбида титана  $TiC$  со следующими значениями:  $a=10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $V_1=10^{-2}$  м/с,  $T_1=2300$  К,  $T_2=1940$  К,  $T_o=600$  К получаем значение максимального размера образца порошковой заготовки –  $R_{\max}=10^{-1}$  м.

При использовании порошковых заготовок больших размеров получаются СВС-материалы с двухслойной структурой пористости. Внешний слой – это открытые поры, центральная область образца – закрытые.

Решение задачи проводится методом прямой пригонки. На начальном этапе производится разбивка заготовки на элементы и три слоя, определяются начальные и граничные условия для узлов, подвергнутых воздействию внешней нагрузки и соприкасаемых со стенками пресс-формы.

На первом шаге определяются положения узлов сетки после волнового нагружения, а затем ускорения  $\ddot{x}_1$  и  $\ddot{x}_2$  во всех узлах и положения узлов в новый момент времени  $\tau+1$  из выражений, определяющих ускорения. Далее по координатам узлов рассчитываем деформации. Третью деформацию  $\varepsilon_{4,j}^i$  находим из закона сохранения массы с учетом сжимаемости прессуемого материала и воздуха в порах. В дальнейшем параметры заготовки определяются в соответствии с методикой, приведенной в работе [10].

**ВЫВОДЫ.** В результате проведенных теоретических исследований выполнено моделирование процессов деформирования дисперсных и пористых порошковых заготовок сочетанием СВС – процесса с процессами вибрационного прессования. Предложена новая теоретическая зависимость для определения максимального размера образца порошковой заготовки, в котором все поры будут открыты и описан алгоритм решения задачи.

В соответствии с математической моделью динамического поведения многослойной порошковой заготовки и алгоритмом были составлены программы расчета динамического поведения многослойного порошкового слоя и определены значения критических значений интенсивностей деформаций и напряжений, при которых наступает межслойное разрушение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов // В.Г. Степанов, И.А. Шавров. – Л.: Машиностроение. 1975. – 280 с.
2. Сагомоян А.Я. Проникание (проникание твердых тел в сжимаемые сплошные среды). – М.: МГУ, 1974. – 300 с.
3. Пластинирование деталей машин / Н.И. Соболев, Б.А. Титунин. – Л.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
4. Теплофизика механической обработки / Якимов А.В., Слободяник П.Т., Усов А.В. – К.: Лыбидь, 1991. – 240 с.
5. Рихтмайер Р.Д. Разностные методы решения краевых задач. – М.: Иностранная литература. 1960. – 264 с.

6. Колмогоров В.А. Обработка металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
7. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. – М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.
8. Теоретическая физика: учебное пособие. В 10 т. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. Лит., Т. 6: Гид-

родинамика. 1986. – 736 с.

9. Экспериментальные исследования штампуемости сплава ЭП915 при импульсном нагружении / Воронин В.Н., Кривцов В.А., Еременко В.Е. // Обработка материалов давлением импульсными нагрузками. – Харьков: ХАИ, 1988. – С. 43–47.

10. Прюмер Р. Обработка порошковых материалов взрывом. – Москва: Мир, 1990. – 128 с.

## MODELLING OF THE DEFORMATION PROCESS FOR DISPERSIBLE AND POROUS POWDER-LIKE WORK-PIECES

**D. Savelov**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

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

The mathematical model of the deformation process for dispersible and porous powder-like work-pieces by the self-propagating high temperature synthesis (SHTS) method and a combination of the SHTS process with the vibration compaction is considered. The following basic factors were taken into account during the modeling: heating of a work-pieces, the mass of the synthesis products during deformation and the compaction process. The equalization tying up the deformations speeds and tension and also the kinematic correlations and the continuity equation which take into account the tensors of tensions and deformation speeds, the vector of speed, the speed of volume changes, the resistance of deformations of the material of the basis, the intensity of speeds of deformations and the relative density are formulated. An expression for determination of the maximal size of a powder-like work-pieces, in which all pores are opened, is found.

**Key words:** model, pressing, compaction, deformation, SHTS process.

### REFERENCES

1. Stepanov, V.G. (1975), *Vysokojenergeticheskie impul'snye metody obrabotki metallov* [High-energy impulsive methods of treatment of metals], Mashinostroenie, Leningrad, Russia.
2. Sagomonjan, A.Ja. (1974), *Pronikanie (pronikanie tverdyh tel v szhimaemye sploshnye sredy)* [Penetrating (getting of solids to the coercible continuous environments)], MGU, Moscow, Russia.
3. Sobolev, N.I. and Titunin, B.A. (1987), *Plastinirovanie detalej mashin* [Flowage of details of machines], Mashinostroenie, Leningrad, Russia.
4. Jakimov, A.V., Slobodjanik, P.T. and Usov, A.V. (1991), *Teplofizika mehanicheskoy obrabotki* [Thermal physics of tooling], Lybid', Kiev, Ukraine.
5. Rihtmajer, R.D. (1960), *Raznostnye metody reshenija kraevykh zadach* [Methods of difference of decision of regional tasks], Foreign literature, Moscow, Russia.
6. Kolmogorov, V.A. (1986), *Obrabotka metallov davleniem* [Treatment of metals pressure], Metallurgija, Moscow, Russia.

7. Smirnov, O.M. (1979), *Obrabotka metallov davleniem v sostojanii sverhplatichnosti* [Treatment of metals pressure in a state of most plastic], Mashinostroenie, Moscow, Russia.

8. Landau, L.D. and Lifshic, E.M. (1986) *Teoreticheskaja fizika* [Theoretical physics], Nauka, Moscow, Russia.

9. Voronin, V.N., Krivcov, V.A. and Eremenko, V.E. (1988), “Experimental researches of alloy of Ep915 at an impulsive lading”, *Obrabotka materialov davleniem impul'snymi nagruzkami*, pp.43–47, Ukraine.

10. Prjumer, R. (1990), *Obrabotka poroshkovyh materialov vzryvom* [Treatment of powder-like materials by an explosion], Mir, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 05.06.2015.