

ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ВИБРОСТОЛ – МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ПОРОШОК – ПРИГРУЖАЮЩИЙ ПУАНСОН» ПРИ ВИБРОФОРМОВАНИИ

Савелов Д. В.

Проведены теоретические исследования динамической системы «вибростол – металлический порошок – пригружающий пуансон», в которой металлический порошок представлена в виде системы с распределенными параметрами, предложена физико-механическая модель, позволяющая достаточно точно определить упругие и диссипативные силы, действующие со стороны порошковой смеси на вибростол при его вертикальных колебаниях и пригружающий пуансон. Предложена реологическая модель уплотняемого металлического порошка, которая позволяет моделировать его упругие и диссипативные свойства, трение между металлическими частицами порошка, а также его пластическое деформирование при вибрационном формовании. Полученные теоретические зависимости позволяют установить закон перемещения любого элемента системы «вибростол – металлический порошок – пригружающий пуансон», закон движения нижнего слоя уплотняемого порошка и вибростола с учетом усилия пригружения и закон движения поверхности уплотняемого слоя порошка и пригружающего пуансона с учетом усилия пригружения.

Проведені теоретичні дослідження динамічної системи «вібростіл – металевий порошок – привантажуючий пуансон», в якій металевий порошок представлений у вигляді системи з розподіленими параметрами, запропонована фізико-механічна модель, що дозволяє досить точно визначити пружні і дисипативні сили, що діють з боку порошкової суміші на вібростіл при його вертикальних коливаннях і привантажуючий пуансон. Запропонована реологічна модель ущільнюваного металевого порошку, яка дозволяє моделювати його пружні і дисипативні властивості, тертя між металевими частками порошку, а також його пластичну деформацію при вібраційному формуванні. Отримані теоретичні залежності дозволяють встановити закон переміщення будь-якого елемента системи «вібростіл – металевий порошок – привантажуючий пуансон», закон руху нижнього шару ущільнюваного порошку і вібростола з врахуванням зусилля привантаження і закон руху поверхні ущільнюваного шару порошку і привантажуючого пуансона з врахуванням зусилля привантаження.

Theoretical researches of the dynamic system «vibrating table – metallic powder – loading punch» are conducted in which the metallic powder is presented as a system with distributed parameters. A physical and mechanical model allowing to precisely determine elastic and dissipative forces which act from the powder mixture on the vibrating table at its vertical vibrations and on the loading punch is offered. A rheological model of the metallic powder under compaction allowing to model its elastic and dissipative properties, friction among metallic of the powder and also its plastic deformation of vibroforming is offered. The received theoretical dependences allow to determine the law of moving of any element of the «vibrating table – metallic powder – loading punch» system, the law of motion of the lower layer of the compacted powder and vibrating table taking into account the loading forces and the law of motion of the upper layer of the powder being compacted and the loading punch taking into account the loading forces.

Савелов Д. В.

канд. техн. наук, доц. КрНУ
savelov@vizit-net.com

КрНУ – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг.

УДК 621.762.4

Савелов Д. В.

ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ВИБРОСТОЛ – МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ПОРОШОК – ПРИГРУЖАЮЩИЙ ПУАНСОН» ПРИ ВИБРОФОРМОВАНИИ

Известно, что применение вибрации при засыпке и утряске металлического порошка в пресс-форме при предварительном уплотнении порошков перед прессованием позволяет значительно снизить давление прессования и повысить равноплотность получаемых изделий как простой, так и сложной формы, уменьшить анизотропию при спекании [1–5]. Для повышения эффективности процесса уплотнения порошков в колеблющихся пресс-формах или «жестких» матрицах, расположенных на вибростолах, снабженных круговыми или направленными вибровозбудителями колебаний, одновременно с вибрационным воздействием на порошковую смесь должно оказываться небольшое статическое пригружение. Это объясняется тем, что вибрационные импульсы придают металлическим частицам порошка большую подвижность, способствуют их наиболее плотной переукладке и образованию нового брикета с большей плотностью, а одновременно прикладываемое сверху статическое пригружение обеспечивает заклинивание металлических частиц в этом положении. Отсутствие в процессе прессования такого статического пригружения может привести не к уплотнению, а к разрыхлению металлического порошка.

Однако на сегодняшний день отсутствуют теоретические исследования таких сложных динамических систем, что говорит об отсутствии общепринятой методики расчета основных параметров виброформовочного оборудования, что не позволяет точно выбрать требуемые режимы вибрирования на металлический порошок, находящийся в матрице, и параметры статического пригружения пуансоном и вибростола с вибровозбудителем колебаний.

Целью работы является установление закона движения и характера взаимодействия вибростола и пригружающего пуансона с порошком, находящимся в «жесткой» матрице, определение основных рабочих параметров вибростола и параметров вибрирования при одновременном воздействии на металлический порошок статического пригружения от пуансона прессы.

Для составления математической модели и изучения динамических процессов, происходящих при предварительном уплотнении металлического порошка на вибростоле с «жесткой» матрицей, используем метод реакций, предложенный в работе [6]. Для этого исследуем динамическую систему «вибростол – металлический порошок – пригружающий пуансон», в которой металлический порошок представлен в виде системы с распределенными параметрами (рис. 1, а). Реологическая модель уплотняемого металлического порошка представлена на рис. 1, б.

Вибростол 1 с «жесткой» матрицей 2 массой m , заполненной металлическим порошком, установлен на станине 3 вибрационного прессы при помощи упругих амортизаторов 4, имеющих коэффициенты жесткости k_5 и демпфирования b_5 . Снизу на вибростол 1 действует возмущение от вибровозбудителя направленных колебаний 5 в виде вертикально направленной гармонической силы $P_b \sin \omega t$. При этом сверху плита 6 с пуансоном 7 массой m_n действует на поверхность металлического порошка в «жесткой» матрице 2 со статическим усилием пригружения $P_{пр}$.

Дифференциальное уравнение движения уплотняемого металлического порошка в направлении координаты x за время t будет иметь вид:

$$E \cdot (1 + \mu) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial x^2 \partial t} + E \cdot \delta \cdot (1 + \mu) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + \eta \cdot \delta \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t} - \rho \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где u и x – эйлерова и лагранжева координаты;

E – динамический модуль упругой деформации металлического порошка;

η – коэффициент динамической вязкости, характеризующий внутреннее трение в металлическом порошке;

μ – коэффициент внутреннего трения, позволяющий моделировать упрочнение слоя порошка в процессе объемного уплотнения [7];

δ – показатель, учитывающий способность порошка распределять нагрузку при внешнем нагружении [8];

t – время.

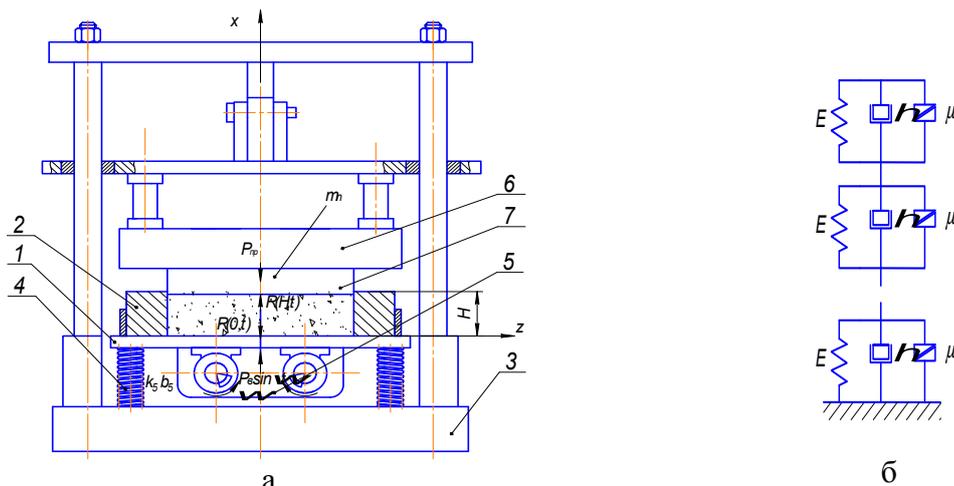


Рис. 1. Расчетная схема динамической системы «вибростол – металлический порошок – пригружающий пуансон» (а) и реологическая модель элементарного объема металлического порошка (б):

1 – вибростол; 2 – «жесткая» матрица; 3 – станина; 4 – упругие амортизаторы; 5 – вибровозбудителя направленных колебаний; 6 – плита; 7 – пригружающий пуансон

При действии на поверхность металлического порошка в «жесткой» матрице 2 пригружения от инерционного пуансона 7 напряжения на верхней поверхности уже не будут равны нулю. Это значит, что пуансон 7 будет при своем движении испытывать влияние сопротивления металлического порошка. Поэтому для определения граничных условий, рассмотрим схему сил, действующих в рассматриваемой системе (рис. 1, а). Граничные условия с учетом рис. 1, а будут иметь следующий вид:

при $x = 0$:

$$-m \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} - b_5 \frac{\partial u(0,t)}{\partial t} - k_5 u(0,t) + F \cdot E \cdot (1 + \mu) \frac{\partial u(0,t)}{\partial x} + \eta \cdot F \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial x \partial t} = -P_B \sin(\omega \cdot t); \quad (2)$$

при $x = H$:

$$-m_n \frac{\partial^2 u(H,t)}{\partial t^2} - P_{\text{пр}} = R(H,t) = F \cdot E \cdot (1 + \mu) \frac{\partial u(H,t)}{\partial x} + \eta \cdot F \frac{\partial^2 u(H,t)}{\partial x \partial t}, \quad (3)$$

где R – сила сопротивления металлического порошка, выраженная через его свойства для рассматриваемого элементарного объема;

F – площадь днища матрицы;

H – высота слоя порошковой смеси.

Представим функцию $u(x,t)$ в виде мнимой части комплексного числа [9]:

$$u(x, t) = u(x) \cdot e^{\delta \cdot x} \cdot e^{i(\omega \cdot t)}, \quad (4)$$

где амплитуда $u(x)$ считается комплексной величиной.

Подставив зависимость (4) в выражение (1) получим уравнение, решая которое найдем функцию $u(x)$ в следующем виде [9]:

$$u(x) = e^{-1,5 \cdot \delta \cdot x} (D_1 \cos \beta x + D_2 \sin \beta x), \quad (5)$$

где D_1 и D_2 – постоянные интегрирования, определяемые граничными условиями (2) и (3); β – волновое число, определяемое зависимостью:

$$\beta = 0,5 \cdot \sqrt{(\rho \omega^2 / E_k) - 1,25 \cdot \delta^2}. \quad (6)$$

Из выражения (8) следует, что волновое число β – комплексная величина, а значит, ее можно представить в виде [6, 9, 10]:

$$\beta = k - i\lambda = \frac{\omega}{c} - i\lambda, \quad (7)$$

где λ – коэффициент затухания возмущения, характеризующий уменьшение амплитуды колебаний в зависимости от расстояния до источника возмущения;

c – фазовая скорость распространения возмущения в порошке.

Для определения c и λ приравняем выражения (6) и (7), возведем левую и правую части в квадрат и, выделяя соответственно вещественную и мнимую части выражения, получим следующую систему уравнений, решая которую найдем:

$$c = \sqrt{\frac{2 \cdot \omega^2 \cdot (E^2 \cdot (1 + \mu)^2 + \eta^2 \cdot \omega^2)}{0,75 \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot E \cdot (1 + \mu) - 0,9375 \cdot \delta^2 \cdot (E^2 \cdot (1 + \mu)^2 + \eta^2 \cdot \omega^2) - \sqrt{Z}}}; \quad (8)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sqrt{Z} - (0,25 \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot E \cdot (1 + \mu) - 0,3125 \cdot \delta^2 \cdot (E^2 \cdot (1 + \mu)^2 + \eta^2 \cdot \omega^2))}{2 \cdot (E^2 \cdot (1 + \mu)^2 + \eta^2 \cdot \omega^2)}}, \quad (9)$$

$$\text{где } Z = [0,25 \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot E \cdot (1 + \mu) - 0,3125 \cdot \delta^2 \cdot (E^2 \cdot (1 + \mu)^2 + \eta^2 \cdot \omega^2)]^2 + \rho^2 \cdot \omega^6 \cdot \eta^2. \quad (10)$$

На основании выражений (4), (5) и (7) функция $u(x, t)$ примет следующий вид [9, 11]:

$$u(x, t) = e^{-0,5 \cdot \delta \cdot x} (D_1 \cos \beta x + D_2 \sin \beta x) \cdot e^{i(\omega \cdot t)}. \quad (11)$$

Используя граничные условия (2) и (3) и выражение (11) получим выражение для определения перемещения любого элемента системы «вибростол – металлический порошок – пригружающий пуансон» в следующем виде:

$$u(x, t) = \frac{e^{-0,5 \cdot \delta \cdot x} \cdot [[Z_e(d \cos(\beta x) + b \sin(\beta x)) - Z_i(P_B \sin(\beta(H - x)) + \cos(\beta(H - x)))] + P_{\text{пр}}(c \cos(\beta x) + a \sin(\beta x))] \cos \omega t}{Z_e^2 + Z_i^2} + \frac{[Z_i(d \cos(\beta x) + b \sin(\beta x)) + Z_e(P_B \sin(\beta(H - x)) + \cos(\beta(H - x)))] + P_{\text{пр}}(c \cos(\beta x) + a \sin(\beta x))] \sin \omega t}{}, \quad (12)$$

$$\text{где } Z_e = k_5 - m \omega^2 + FE(1 + \mu)[0,5\delta + \beta \text{ctg}(\beta H - \chi)]; \quad Z_i = \omega[b_5 + F\eta][0,5\delta + \beta \text{ctg}(\beta H - \chi)]; \quad (13)$$

$$a = k_5 - m \omega^2 + 0,5\delta FE(1 + \mu); \quad b = FE\beta; \quad c = FE\beta(1 + \mu); \quad d = F\omega\beta\eta. \quad (14)$$

При $x = 0$ выражение (12) определяет закон движения нижнего слоя уплотняемого порошка и вибростола с учетом усилия пригружения $P_{пр}$, а при $x = H$ – закон движения поверхности уплотняемого слоя порошка и пригружающего пуансона с учетом усилия пригружения $P_{пр}$:

$$u(0,t) = \frac{[Z_e \cdot d - Z_i \cdot (P_B (\sin(\beta H) + \cos(\beta H)) + P_{пр} \cdot c)] \cos \omega t}{Z_e^2 + Z_i^2} + \frac{[Z_i \cdot d - Z_e \cdot (P_B (\sin(\beta H) + \cos(\beta H)) + P_{пр} \cdot c)] \sin \omega t}{Z_e^2 + Z_i^2}; \quad (15)$$

$$u(H,t) = \frac{e^{-0,5 \cdot \delta \cdot H} \cdot [Z_e (d \cos(\beta H) + b \sin(\beta H)) - Z_i \cdot P_B + P_{пр} (c \cos(\beta x) + a \sin(\beta x))] \cos \omega t}{Z_e^2 + Z_i^2} + \frac{[Z_i (d \cos(\beta H) + b \sin(\beta H)) + Z_e \cdot P_B + P_{пр} (c \cos(\beta x) + a \sin(\beta x))] \sin \omega t}{Z_e^2 + Z_i^2}. \quad (16)$$

Амплитуда вынужденных колебаний вибростола вместе с пресс-формой:

$$A = P_B / \sqrt{Z_e^2 + Z_i^2}. \quad (17)$$

На рис. 2 показаны осциллограммы теоретических (а) и экспериментальных (б) кривых законов движения слоев уплотняемой порошковой смеси в зависимости от угловой координаты ωt . Для теоретических кривых на рис. 2, а $u1(t)$ – график, соответствующий зависимости (12); $u2(t)$ – график, соответствующий зависимости (15); $u3(t)$ – график, соответствующий зависимости (16). Здесь масса вибростола вместе с «жесткой» матрицей и вибровозбудителями колебаний $m = 47$ кг, амплитуда возмущающей силы $P_B = 10000$ Н, жесткость упругих опор вибростола $k_5 = 235440$ Н/м; угловая частота колебаний $\omega = 650$ рад/с, динамический модуль упругости порошка титана $E = 2,5 \cdot 10^6$ Па, насыпная плотность $\rho = 1020$ кг/м³, высота уплотняемого слоя $H = 0,2$ м, площадь рабочей поверхности матрицы $S = 0,00785$ м²; статическое давление $p = 0,5$ МПа и соответствующее ему усилие пригружения $P_{пр} = 6160$ Н.

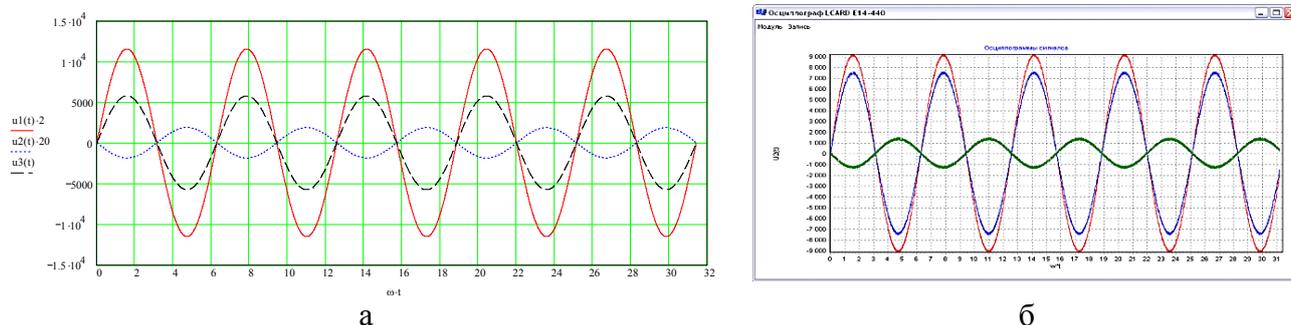


Рис. 2. Осциллограммы теоретической (а) экспериментальной (б) кривых законов движения слоев уплотняемой порошковой смеси в зависимости от угловой координаты ωt

При формировании изделий из порошковых смесей с использованием пригружения рекомендуется следующая технология: после загрузки порошковой смеси в матрицу, сначала производится ее предварительное вибрационное уплотнение без пригружения для достижения порошком «сырой» плотности в течение 7–10 с. Затем на поверхность порошковой смеси опускается пригружающий пуансон и производят окончательное формование изделия.

При проведении исследований процесса уплотнения порошков с учетом приложения усилия пригрузки было установлено, что одновременное нагружение металлического порошка усилием пригрузки и вибрационным воздействием замедляет процесс уплотнения, особенно в его начальном периоде. Причем чем выше усилие пригрузки, тем в большей степени замедлялся процесс нарастания плотности порошка. Это объясняется тем, что статическое давление, приложенной к порошку, находящемуся в матрице, вызывает его предварительное уплотнение и упрочнение в месте контакта с порошковой смесью. Это в свою очередь приводит к увеличению сил межчастичных связей. Уплотнение же порошковой смеси может протекать только при условии разрушения ранее образованных связей и арок, что приводит к увеличению энергетических затрат. В результате этого процесс замедляется. Поэтому процесс прессования нужно начинать с предварительного вибрационного воздействия, а не с приложения статического усилия пригрузки. Поэтому при формировании изделий из металлических порошков с использованием пригрузки рекомендуется следующая технология: после загрузки порошка в матрицу, сначала производится его предварительное вибрационное уплотнение без пригрузки для достижения порошком «сырой» плотности в течение 5–10 с. Затем на поверхность порошка опускается пригружающий пуансон и производят окончательное формирование изделия.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили исследовать характер одновременного взаимодействия вибростола и пуансона с металлическим порошком, который находится в «жесткой» матрице. Найдены закономерности движения вибростола и пуансона с металлическим порошком, находящимся в «жесткой» матрице, определены основные рабочие параметры вибростола и параметры вибрирования при одновременном воздействии на металлический порошок статического пригрузки от пуансона пресса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Купарисов С. С. Порошковая металлургия / С. С. Купарисов, Г. А. Либенсон. – Москва, Металлургия, 1980. – 496 с.
2. Evans P. E. *Vibratory Compacting of Powders* / P. E. Evans, R. S. Millman // *Powder Metallurgy*. – 1964. – V. 7, No. 13. – P. 51–63.
3. Иващенко В. В. Влияние инерционного нагружения на процесс вибрационного уплотнения порошковых материалов / В. В. Иващенко // *Порошковая металлургия*. – 1972. – № 5. – С. 18–21.
4. Белл У. К. *Вибрационное уплотнение порошков* / под ред. Г. В. Кингери // *Процессы керамического производства*. – М.: ИЛ, 1960. – 280 с.
5. Mc. Geary R. C. *Mechanical Packing of Spherical Particles* / Mc. Geary R. C. // *J. of the Amer. Cer. Soc.* – 1964. – V. 44, No. 10. – P. 49–58.
6. Чубук Ю. Ф. *Вибрационные машины для уплотнения бетонных смесей* / Ю. Ф. Чубук, И. И. Назаренко, В. Н. Гарнец. – Киев: Выща шк., 1985. – 168 с.
7. Савелов Д. В. Теоретические исследования процесса вибрационного формирования изделий из металлических порошков / Д. В. Савелов // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. пр.* – Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2012. – № 1 (13) 2012. – С. 243–252.
8. Савелов Д. В. Исследование способности металлического порошка распределять нагрузку при его взаимодействии с пуансоном вибрационного пресса / Д. В. Савелов, В. В. Драгобецкий // *Обработка металлов давлением: сб. науч. тр.* – Краматорск: ДГМА, 2013. – № 2 (35). – С. 168–172.
9. Маслов А. Г. Теоретические исследования процесса взаимодействия вибрационной головки грунтопрокалывающей установки с грунтом / А. Г. Маслов, Д. В. Савелов // *Зб. наук. пр. Кіровоградського державного технічного університету*. – Кіровоград: КДТУ, 2003. – Вип. 13. – С. 26–32. – (Серія «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація»).
10. Маслов А. Г. *Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве* / А. Г. Маслов, В. М. Пономарь. – Київ: Будівельник, 1985. – 128 с.
11. Савелов Д. В. *Розробка вібраційного робочого органа грунтопрокалюючої установки: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.04 «Машины для земляних та дорожніх робіт»* / Д. В. Савелов. – Полтава, 2004. – 21 с.