

существенное влияние оказывает радиальная составляющая силы резания. Поэтому основным условием уменьшения энергоёмкости необходимо рассматривать в первую очередь уменьшение радиальной составляющей силы резания. Полученные теоретические решения могут быть использованы при выборе оптимальных методов механической обработки деталей машин.

**Список литературы:** 1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с. 2. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с. 3. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с. 4. Новиков Ф.В. Теорія високоякісної обробки деталей машин: монографія / Ф.В. Новиков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 384 с. 5. Новиков Г.В. Элементы теории энергоёмкости процессов механической обработки / Г.В. Новиков // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Харків: НТУ«ХПІ», 2006. – Вип. 2 (13). – С. 74–86. 6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. «Механика резания материалов» – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 7. Новиков Ф.В. Повышение эффективности механической обработки отверстий в деталях гидравлической аппаратуры / Ф.В. Новиков, В.И. Полянский, И.А. Рябенков и др. // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы научн.-техн. конф., 19-22 сентября 2011 г., Одесса. – Киев: АТМ України, 2011. – С. 156–159.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bobrov V.F. Osnovy teorii rezaniya metallov V.F. Bobrov. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 343 p. 2. Granovskiy G.I. Rezanie metalov: uchebnyy G.I. Granovskiy, V.G. Granovskiy. – Moscow: Vysshaya shkola, 1985. – 304 p. 3. Matalin A.A. Tekhnologiya mashinostroeniya: uchebnyy A.A. Matalin. – Leningrad: Mashinostroenie, 1985. – 496 p. 4. Novikov F.V. Teoriya vysokoiakisnoi obrobky detalei mashyn: monografiya F.V. Novikov. – Kharkiv: Vyd. KhNEU, 2013. – 384 p. 5. Novikov G.V. Elementy teorii energoyemkosti protsessov mekhanicheskoy obrabotki G.V. Novikov Vysoki tekhnologii v mashynobuduvanni: Zb. nauk. prats – Kharkiv: NTU «KhPI», 2006. – Vyp. 2(13). – P. 74–86. 6. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya Pod obsh. red. F.V. Novikova i A.V. Yakimova. V 10 tomakh. – T. 1. «Mekhanika rezaniya materialov» – Odessa: ONPU, 2002. – 580 p. 7. Novikov F.V. Povyshenie effektivnosti mekhanicheskoy obrabotki otverstiy v detalyakh gidravlicheskoj apparatury F.V. Novikov, V.I. Polyanskiy, I.A. Ryabenkov i dr. Novye i netraditsionnye tekhnologii v resurso- i energosberezhenii: materialy nauchn.-tekhn. konf., 19–22 sentyabrya 2011 g., Odessa. – Kiev: ATM Ukrainy, 2011. – P. 156–159.

Надійшла до редколегії 23.10.2014р.

УДК 621.762.4

**Д. В. САВЕЛОВ**, канд. техн. наук, доц., КрНУ им. М. Остроградского, Кременчуг

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА НА ВИБРОСТОЛЕ С «ЖЕСТКОЙ» МАТРИЦЕЙ И ОДНОВРЕМЕННЫМ СТАТИЧЕСКИМ ПРИГРУЖЕНИЕМ**

В статье предложена математическая модель динамической системы «вибростол – металлический порошок – пригружающий пуансон», в которой металлический порошок представлен в виде системы

с распределенными параметрами. Дифференциальное уравнение движения в своем составе учитывает трение слоев порошка и его распределяющую способность. Получены теоретические выражения, описывающие закономерности движения прессуемого металлического порошка, вибростола с «жесткой» матрицей и пуансона с учетом действующего усилия пригружения.

**Ключевые слова:** математическая модель, динамическая система, металлический порошок, вибростол, пуансон.

**Введение.** При производстве изделий методами порошковой металлургии значительные трудности представляет прессование порошков непластичных металлов и формование из них прессовок с равномерно распределенной плотностью по всему объему. Одним из путей, способных в значительной степени разрешить эту проблему, является внедрение вибрационного формования изделий из металлических порошков.

**Анализ последних исследований и литературы.** Известно, что применение вибрации при засыпке и утряске металлического порошка в пресс-форме, при предварительном уплотнении перед прессованием позволяет значительно снизить давление прессования и повысить равноплотность получаемых изделий как простой, так и сложной формы, уменьшить анизотропию при последующем спекании [1–5]. Для повышения эффективности процесса уплотнения порошков тугоплавких металлов в колеблющихся пресс-формах, расположенных на вибростолах, снабженных круговыми или направленными вибровозбудителями колебаний, одновременно с вибрационным воздействием на порошок должно оказываться 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 прессовки из металлического порошка.

На сегодняшний день в рассмотренной литературе присутствуют описания пригружения цементобетонных смесей пригрузами и вибропригрузами [6, 7]. Однако в этих моделях виброситом не учитывается межчастичное трение и распределительная способность порошковых сред, которые в значительной степени будут определять амплитуду возмущающей силы, угловую частоту колебаний, величину усилия пригружения и энергетические показатели оборудования. Учет усилия пригружения, межчастичного трения и распределительной способности металлических порошков в уравнениях движения рабочих органов формующего оборудования

позволит повысить точность получаемых научных результатов и выбрать режимы вибрирования металлического порошка, находящегося в «жесткой» матрице на вибростоле, параметры статического пригружения.

**Цель исследований и постановка проблемы.** Целью работы является исследование динамических процессов, происходящих при воздействии на металлический порошок статического пригружения от пуансона при его предварительном уплотнении на вибростоле в «жесткой» матрице с учетом межчастичного трения и распределяющей способности металлического порошка.

**Материал исследований.** Для составления математической модели вибросистемы и изучения динамических процессов, происходящих при предварительном уплотнении металлического порошка на вибростоле с «жесткой» матрицей, используем метод реакций, предложенный в работе [8]. Для этого исследуем динамическую систему «вибростол – металлический порошок – пригружающий пуансон», в которой металлический порошок представлен в виде системы с распределенными параметрами (рис. 1, а).

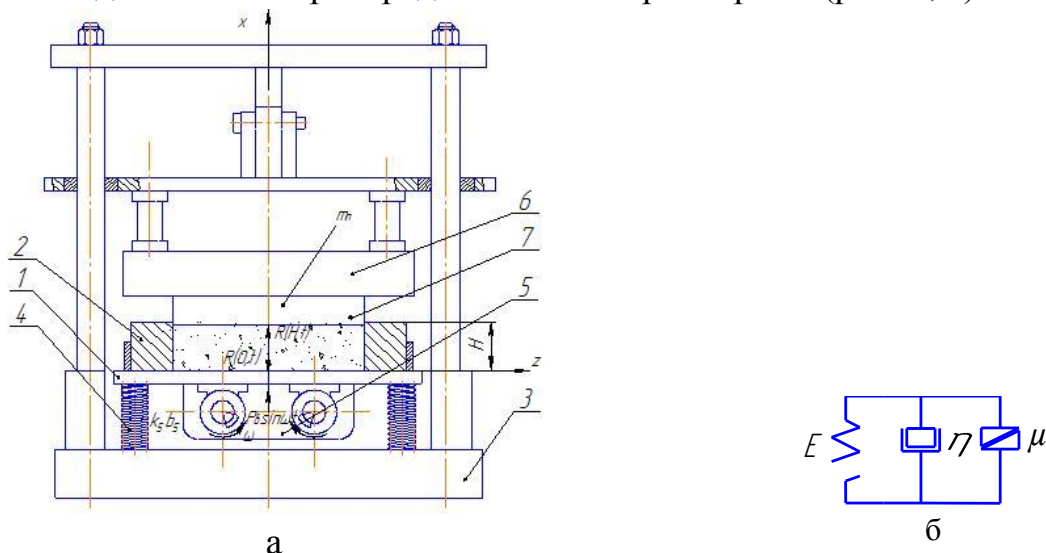


Рис. 1 – Гибридная динамическая система «вибростол – металлический порошок – пригружающий пуансон» а – расчетная схема :и б – реологическая модель слоя металлического порошка

Дифференциальное уравнение движения уплотняемого металлического порошка в направлении координаты  $x$  за время  $t$  будет иметь вид [9]:

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

где  $u$  и  $x$  – эйлерова и лагранжева координаты;

$E$  – модуль упругости Юнга;

$\eta$  – коэффициент динамической вязкости металлического порошка;

$\mu$  – коэффициент внутреннего трения, позволяющий моделировать уплотнение слоя порошка в процессе объемного уплотнения;

$\delta$  – показатель, учитывающий способность порошка распределять нагрузку при внешнем нагружении;

$t$  – время.

При действии на поверхность металлического порошка в «жесткой» матрице 2 пригружения от статического (инерционного) пуансона 7 напряжения на верхней поверхности уже не будут равны нулю [10]. 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  $x = H$ :

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

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

$F$  – площадь дна матрицы;

$H$  – высота слоя порошка.

Решение волнового уравнения колебаний (1) с учетом (2) и (3) было получено в виде:

$$u(x,t) = \frac{e^{-0,5 \cdot \delta \cdot x} \cdot [Z_e (d \cos(\beta x) + b \sin(\beta x)) - Z_i (P_b \sin(\beta(H-x)) + \cos(\beta(H-x))) + P_{np} (c \cos(\beta x) + a \sin(\beta x))] \cos \omega t}{Z_e^2 + Z_i^2} + \frac{[Z_i (d \cos(\beta x) + b \sin(\beta x)) + Z_e (P_b \sin(\beta(H-x)) + \cos(\beta(H-x)))] + P_{np} (c \cos(\beta x) + a \sin(\beta x)) \sin \omega t}{}, \quad (4)$$

где  $Z_e = k_5 - m \cdot \omega^2 + F \cdot E \cdot (1 + \mu) \cdot [0,5 \cdot \delta + \beta \cdot ctg(\beta \cdot H - \chi)]; \quad (5)$

$$Z_i = \omega [b_5 + F \cdot \eta \cdot [0,5 \cdot \delta + \beta \cdot ctg(\beta \cdot H - \chi)]; \quad (6)$$

$$a = k_5 - m \omega^2 + 0,5 \tilde{\delta} F E (1 + \mu); \quad b = F E \beta; \quad c = F E \beta (1 + \mu); \quad d = F \omega \beta \eta. \quad (7)$$

При  $x = 0$  выражение (4) определяет закономерности движения нижнего слоя прессуемого порошка и вибростола с учетом усилия пригружения  $P_{np}$ , а

при  $x = H$  – слоя прессуемого порошка и пригружающего пуансона с учетом усилия пригружения  $P_{np}$ :

$$u(0,t) = \frac{[Z_e \cdot d - Z_i \cdot (P_b(\sin(\beta H) + \cos(\beta H)) + P_{np} \cdot c)] \cos \omega t}{Z_e^2 + Z_i^2} + \frac{[Z_i \cdot d - Z_e \cdot (P_b(\sin(\beta H) + \cos(\beta H)) + P_{np} \cdot c)] \sin \omega t}{Z_e^2 + Z_i^2}; \quad (8)$$

$$u(H,t) = \frac{e^{-0,5 \cdot \delta \cdot H} \cdot [Z_e(d \cos(\beta H) + b \sin(\beta H)) - Z_i \cdot P_b + P_{np}(c \cos(\beta x) + a \sin(\beta x))] \cos \omega t}{Z_e^2 + Z_i^2} + \frac{[Z_i(d \cos(\beta H) + b \sin(\beta H)) + Z_e \cdot P_b + P_{np}(c \cos(\beta x) + a \sin(\beta x))] \sin \omega t}{Z_e^2 + Z_i^2}. \quad (9)$$

**Результаты исследований.** По полученным теоретическим зависимостям (4), (8) и (9) были построены закономерности движения слоев порошка в направлении координаты  $x$  за время  $t$  (рис. 2) в зависимости от угловой координаты  $\omega t$  с учетом усилия пригружения  $P_{np}$  при следующих основных параметрах: 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, модуль упругости порошка титана  $E = 2,5 \cdot 10^6$  Па, насыпная плотность  $\rho = 1020$  кг/м<sup>3</sup>, высота уплотняемого слоя  $H = 0,2$  м, площадь рабочей поверхности матрицы  $S = 0,00785$  м<sup>2</sup>; статическое давление  $p = 0,5$  МПа и соответствующее ему усилие пригружения  $P_{np} = 6160$  Н.

На рис. 3 показано изменение плотности порошка в зависимости от продолжительности вибрационного воздействия, состава и толщины уплотняемого слоя  $H$  в диапазоне от 0,1 до 0,2 м при уплотнении порошков титана и карбида титана с использованием статического пригружения от инерционного пуансона.

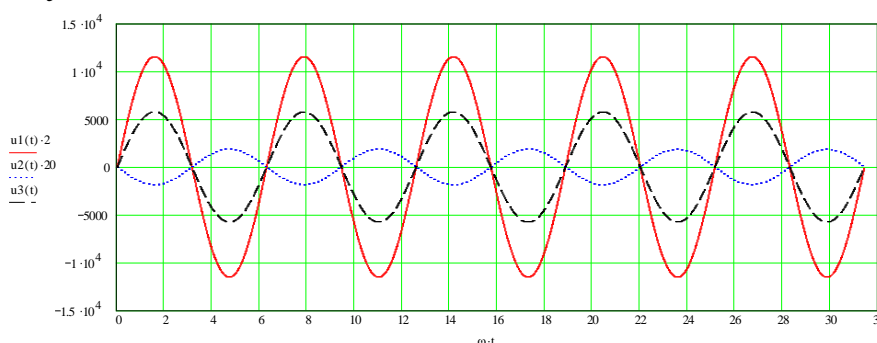


Рис. 2 – Законы движения слоев уплотняемого порошка титана в зависимости от угловой координаты  $\omega t$ :  $u1(t)$  – график, соответствующий зависимости (4);  $u2(t)$  – график, соответствующий зависимости (7);  $u3(t)$  – график, соответствующий зависимости (8)

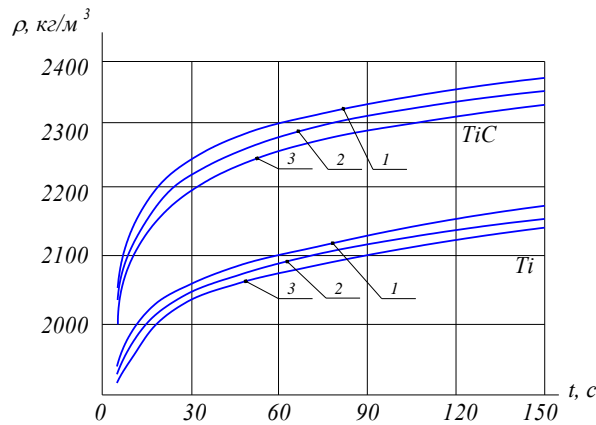


Рис. 3 – Изменение плотности  $\rho$  порошка титана  $Ti$  и карбида титана  $TiC$  в зависимости от продолжительности вибрационного воздействия  $t$  и толщины пресуемого слоя  $H$ : 1 – при  $H=0,1$  м; 2 – при  $H=0,15$  м; 3 – при  $H=0,2$  м

График показывает, что на начальной стадии процесс нарастания плотности порошка значительно интенсифицируется по сравнению с уплотнением на вибростоле без статического пригружения, затем постепенно замедляется. Нарастание плотности с течением времени проходит более интенсивно по сравнению с уплотнением на вибростоле без использования статического пригружения.

При проведении исследований процесса уплотнения порошков с учетом приложения усилия пригружения было установлено, что одновременное нагружение металлического порошка усилием пригружения и вибрационным воздействием замедляет процесс уплотнения, особенно в его начальном периоде. Причем чем выше усилие пригружения, 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 порошком. Это в свою очередь приводит к увеличению сил межчастичных связей. Уплотнение же порошков 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 пригружения. Поэтому при формовании изделий из металлических порошков с использованием пригружения рекомендуется следующая технология: после загрузки порошка в матрицу сначала производится его предварительное вибрационное уплотнение без пригружения для достижения порошком «сырой» плотности в течении 7–

10 с. Затем на поверхность порошка опускается пригружающий пуансон и производят окончательное формование изделия.

**Выводы.** В работе предложена математическая модель динамической системы «вибростол – металлический порошок – пригружающий пуансон». 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 пригружения от пуансона.

**Список литературы:** 1. Порошковая металлургия / С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. – М.: 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 / Иващенко В. В. – Порошковая металлургия», 1972, No 5, С. 18–21. 4. Белл У. К. Вибрационное уплотнение порошков. В кн.: «Процессы керамического производства», Под ред. Кингери Г. В. М.: «И.Л.», 1960, – 280 с. 5. Mc. Geary R. C. Mechanical Packing of Spherical Particles. J. of the Amer. Cer. Soc. 1964, v. 44, No. 10. – p. 49–58. 6. Маслов А. Г. Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве / А. Г. Маслов, В. М. Пономарь. – К.: Будівельник, 1985. – 128 с. 7. Иткин А.Ф. Исследование рабочего режима вибрационного пригруза для формования плоских изделий / А.Ф. Иткин, А.Г. Маслов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету, вип. 1/2007 (42). Частина 1. – Кременчук, 2007. – С. 82–86. 8. Чубук Ю. Ф. Вибрационные машины для уплотнения бетонных смесей / Ю. Ф. Чубук, И. И. Назаренко, В. Н. Гарнец. – К.: Выща шк., 1985. – 168 с. 9. Savelov D.V. The theoretical study of process of metal powder compression at vibration exciter with «hard» matrix and with simultaneous static tightness / D.V. Savelov, V.V. Dragobetsky, A.D. Konovalenko. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Academic Conference «Applied and Fundamental Studies», 2013, pp. 90–96. 10. Назаренко И. И. Машины для виробництва будівельних матеріалів: Назаренко І.І. – К.: КНУБА, 1999. – 488 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Poroshkovaja metallurgija S.S. Kiparisov, G.A. Libenson. – Moskva: Metallurgija, – 1980. – 496 p. 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. Ivashhenko V. V. Vlijanie inercionnogo nagruzhennija na process vibracionnogo uplotnenija poroshkovyh materialov Ivashhenko V. V. – Poroshkovaja metallurgija», 1972, No 5, P. 18–21. 4. Bell U. K. Vibracionnoe uplotnenie poroshkov. V kn.: «Processy keramicheskogo proizvodstva», Pod red. Kingeri G. V. M.: «I.L.», 1960, – 280 p. 5. Mc. Geary R. C. Mechanical Packing of Spherical Particles. J. of the Amer. Cer. Soc. 1964, v. 44, No. 10. – p. 49–58. 6. Maslov A. G. Vibracionnye mashiny i processy v dorozhnom stroitel'stve A. G. Maslov, V. M. Ponomar'. – Kiiv: Budivel'nik, 1985. – 128 p. 7. Itkin A.F. Issledovanie rabocheho rezhima vibracionnogo prigruga dlja formovanija ploskih izdelij A.F. Itkin, A.G. Maslov Visnik Kremenuchuk'kogo derzhavnogo politehnicnogo universitetu, vip. 1 2007 ( 42). Chastina 1. – Kremenchuk, 2007. – P. 82–86. 8. Chubuk Ju.F. Vibracionnye mashiny dlja uplotnenija betonnyh smesej Ju.F. Chubuk, I.I. Nazarenko, V. N. Garnec. – Kiev: Vyshha shk., 1985. – 168 p. 9. Savelov D.V. The theoretical study of process of metal powder compression at vibration exciter with «hard» matrix and with simultaneous static tightness D.V. Savelov, V.V. Dragobetsky, A.D. Konovalenko. Proceedings of the 3rd International Academic Conference «Applied and Fundamental Studies», 2013, pp. 90–96. 10. Nazarenko I. I. Mashini dlja virobnictva budivel'nih materialiv: Nazarenko I.I. – Kiiv: KNUBA, 1999. – 488 p.

Поступила (recieved) 31.10.2014