

також для пошуку альтернативних варіантів щодо енергоефективності.

Ключові слова: дротові стани, ефективна формозміна, енергоефективність, високоякісні сталі.

A.A. Minayev, Ye. N. Smirnov, V.M. Kashayev, V.V. Kashayev  
Donetsk National Technical University, Donetsk

#### THEORY AND PRACTICE OF CRITERIA ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF THE FORM CHANGE IN WIRE MILLS EXHAUST CALIBERS

The paper provides theoretical principles of evaluating the effectiveness of the form change with the help of plastic deformation efficiency coefficient. Besides, we propose the methods of using existing calibrations for analysis and developing new ones. The obtained criteria can be used for the analysis of exhaust caliber systems.

Keywords: wire mills, form change, energy efficiency, high-quality steels.

#### УДК 621.762.4

**Д.В. САВЕЛОВ** (канд.техн.наук, доц.)

Кременчугский национальный университет имени Михаила  
Остроградского, г. Кременчуг

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ НА ВИБРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКЕ С ДВУМЯ ИСТОЧНИКАМИ ВЕРТИКАЛЬНО НАПРАВЛЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Проведены теоретические исследования динамической системы «пуансон – порошок – вибростол», в которой порошковая смесь представлена в виде системы с распределёнными параметрами. Полученные теоретические зависимости позволяют установить закон движения пуансона и вибростола, определить их основные параметры и рациональные режимы вибрационного действия на порошковую смесь.

Ключевые слова: динамическая система, пуансон, вибростол, порошковая смесь, вибрационное воздействие.

#### Постановка задачи

При осуществлении технологического процесса прессования порошковой смеси на вибросиловой установке с двумя источниками вертикально направленных колебаний на характер колебаний пуансона и вибростола существенное влияние оказывают физико-механические характеристики уплотняемой порошковой смеси. Правильный учёт сил сопротивления, действующих со стороны порошковой смеси, определяет точность установления закона движения пуансона и вибростола, выбор их конструктивных параметров и режимов вибрационного воздействия, эффективность

процесса прессования. Возможности теоретического анализа и точность получаемых результатов в значительной степени будут зависеть от принятой расчётной модели порошковой смеси. Ранее в работах [1-4] были предложены реологические модели, которые хотя и использовались для решения аналогичных задач, однако дают представление о поведении материала под нагрузкой лишь в первом приближении. Более точное описание процесса даёт реологическая модель среды, представленная в работе [5]. Однако применение этой модели делает невозможным использование метода решения, основанного на элементарных функциях. В настоящей работе для теоретического определения закона движения и амплитуды колебаний пуансона и вибростолла, необходимых для прессования порошковой смеси, а также для изучения действия сил сопротивления со стороны порошковой смеси на пуансон и вибростолл при их вертикальных колебаниях применён метод решения в комплексных функциях, что позволило получить решения, вполне приемлемые для практического использования.

### **Формулировка целей статьи**

Целью настоящих исследований является установление характера взаимодействия пуансона и вибростолла вибросилового устройства, совершающих направленные колебания в вертикальном направлении с порошковой смесью, определение их законов движения, конструктивных параметров и режимов вибрационного воздействия при осуществлении технологического процесса прессования.

### **Основная часть**

Вибросиловая установка с двумя источниками вертикально направленных колебаний для формования изделий из порошков смесей (рис. 1), содержит станину 1 с вертикальными направляющими 2, соединенными в верхней части поперечиной 3, механизм вертикальных перемещений 4, кинематически связанный с размещенной на вертикальных направляющих 2 во втулках скольжения 5 реактивной плитой 6, к которой на упругих амортизаторах 7, установленных по дифференциальной схеме, подвешена виброплита 8 с формующим пуансоном 9, с расположенным на ней возбудителем 10 вертикально направленных колебаний и под которой соосно с ней размещена съемная пресс-форма 11 с порошковой смесью, установленный соосно с формующим пуансоном 9 с помощью упругих опор 12 на станине 1 вибростолл 13 с размещенным в нижней его части возбудителем 14 вертикально направленных колебаний [6].

Вибровозбудитель 10 вертикально направленных колебаний, расположенный на виброплите 8, выполнен в виде смещенных на одинаковое расстояние от центра тяжести виброплиты 8 двух возбудителей 15 и 16 круговых колебаний, дебалансы которых имеют синхронное вращение и вращающиеся в противоположных направлениях.

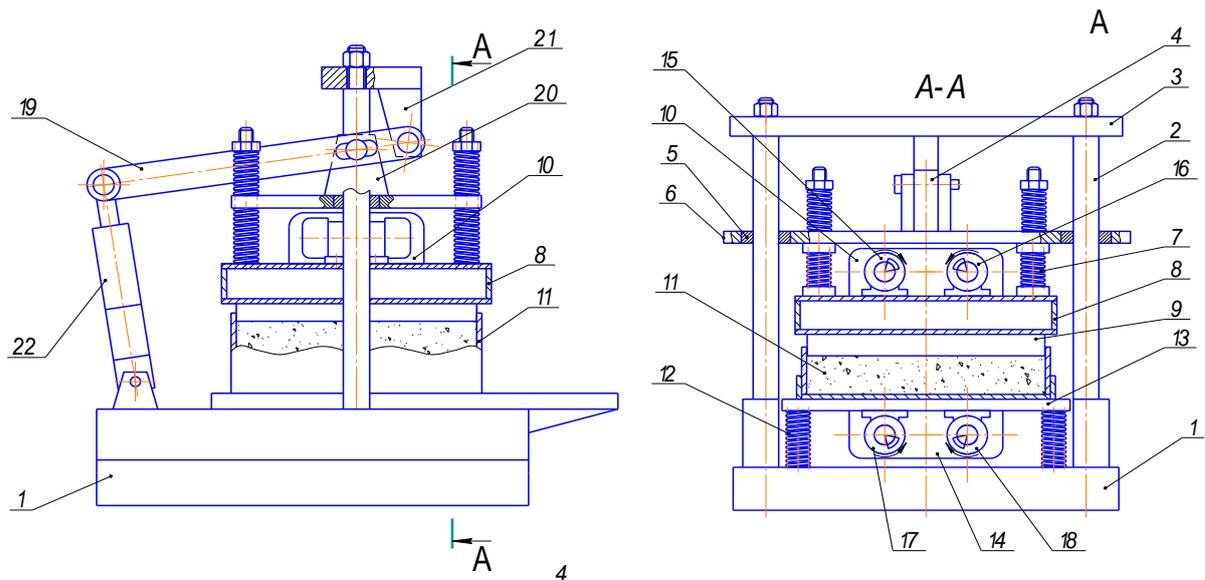


Рисунок 1 – Общий вид вибросиловой установки с двумя источниками вертикально направленных колебаний.

Вибровозбудитель 14 вертикально направленных колебаний, расположенный под вибростолом 13, выполнен в виде смещенных на одинаковое расстояние от центра тяжести вибростола 13 двух возбуждателей 17 и 18 круговых колебания, дебалансы которого имеют синхронное вращение и вращающиеся в противоположных направлениях. Механизм вертикальных перемещений 4 выполнен в виде двухплечевого рычага 19 относительно шарнира тяги 20, при этом один конец рычага 19 шарнирно соединенный с рамой 21, а второй конец рычага 19 соединен шарнирно со штоком гидроцилиндра 22, причем отношение длины первого конца рычага 19 к длине второго конца рычага 19 равняется  $1/5 \dots 1/8$ .

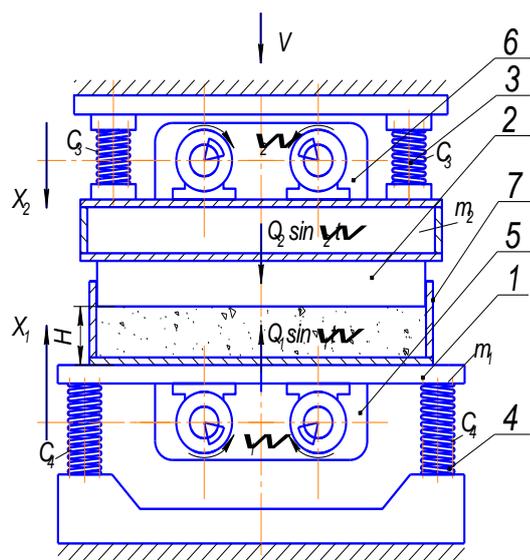
Вибросиловая установка работает таким образом. Вибросиловая установка находится в исходном положении, при котором шток гидроцилиндра 22 полностью выдвинут, а реактивная плита 6 вместе с виброплитой 8 и формирующим пуансоном 9 подняты по вертикальным направляющим 2 вверх. После этого на вибростол 13 устанавливают пресс-форму 11, заполненную тщательным образом перемешанной порошковой смесью. После этого происходит одновременное включение вибровозбудителей круговых колебаний 17 и 18 и привода насосной станции (на схеме не показано) механизма вертикальных перемещений 4. После включения вибровозбудители круговых колебаний 17 и 18, имеющих разное направление вращения, на вибростол 13 вместе с пресс-формой 11 действует вибрационное воздействие в виде вертикально направленных колебаний с угловой частотой колебаний 293 рад/с и амплитудой 1,1...1,2 мм. В результате этого вибростол 13 осуществляет колебания в вертикальном направлении и подвергает вибрационному воздействию порошковую смесь, находящуюся в пресс-форме 11. Одновременно с этим насосная станция подает рабочую жид-

кость в штоковую полость гидроцилиндра 22, в результате чего рычаг 19 механизма вертикальных перемещений 4 перемещает реактивную плиту 6 при помощи тяги 23 по вертикальным направляющим 2 вниз и опускает виброплиту 8 вместе с формующим пуансоном 9 на поверхность порошковой смеси в пресс-форме 11. Плавающая подвеска позволяет формующему пуансону 9 точно опираться на порошковую смесь, которая обеспечивает необходимую ровность поверхности формуемого изделия. В момент контакта формующего пуансона 9 с порошковой смесью включаются вибро-возбудители круговых колебаний 15 и 16, под действием которых вибро-плита 8 вместе с формующим пуансоном 9 осуществляют вертикально направленные колебания с угловой частотой колебаний 293 рад/с и амплитудой 1,5...1,6 мм. В результате такого вибрационного воздействия на порошковую смесь оказывается мощное двухстороннее вибрационное воздействие, под действием которого порошковая смесь переходит в состояние повышенной текучести, в результате чего из неё отдалается часть воздуха и происходит более компактное укладывание металлических частиц. При этом реактивная плита 6 продолжает двигаться вниз по вертикальным направляющим 2. В момент времени, когда гидропривод вибросилового устройства развивает наибольшее статическое усилие прессования, а на порошковую смесь оказывается статическое давление в 5 МПа, движение реактивной плиты 6 вниз прекращается, а приводы вибровозбудителей 15, 16 и 17, 18 круговых колебания отключаются. Рабочая жидкость подается в поршневую камеру гидроцилиндра 22, в результате чего поршень со штоком перемещаются вверх, перемещая тем самым рычаг 19 механизма вертикальных перемещений 4 вместе с реактивной плитой 6 по вертикальным направляющим 2 вверх. Упругие амортизаторы 7 в подвеске виброплиты 8 разжимаются и виброплита 8 вместе с формующим пуансоном 9, отрываясь от поверхности отформованного изделия, поднимается вверх вместе с реактивной плитой 6, а пресс-форма 11 вместе с отформованным изделием выдвигается из рабочей зоны. После извлечения изделия пресс-форма 11 заполняется порошковой смесью и рабочий цикл повторяется.

Для изучения динамических процессов, происходящих при двустороннем вибрационном уплотнении порошковой смеси изучим поведение динамической системы «пуансон – порошковая смесь – вибростол», в которой последняя представлена в виде системы с распределёнными параметрами (рис. 2). Реологическая модель уплотняемой порошковой смеси представлена на рис. 3.

Дифференциальное уравнение движения уплотняемой порошковой смеси в направлении координаты  $x$  за время  $t$  можно описать следующим дифференциальным уравнением [7]:

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



1 – вибростол; 2 – формуючий пуансон; 3, 4 – упругие амортизатори; 5, 6 – вивервозбудители коливань; 6 – прес-форма

Рисунок 2 – Расчётная схема динамической системы "пуансон – порошковая смесь – вибростол" при вертикально направленных колебаниях

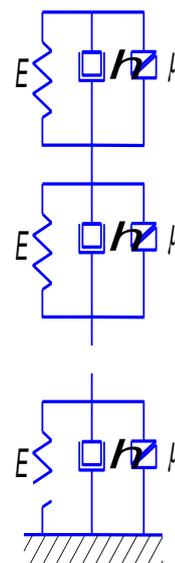


Рисунок 3 – Реологическая модель элементарного объема порошковой смеси из  $n$  элементов

Решение волнового уравнения колебаний (1) отыскивалось при следующих граничных условиях:

при  $x = 0$ :

$$\begin{aligned} -m_1 \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} - b_4 \frac{\partial u(0,t)}{\partial t} - c_4 u(0,t) + F \cdot E \frac{\partial u(0,t)}{\partial x} + \\ + F \cdot \eta \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial x \partial t} + F \cdot \mu \cdot E \frac{\partial u(0,t)}{\partial x} = -Q_1 \sin(\omega_1 t) \end{aligned} \quad (2)$$

при  $x = H$ :

$$\begin{aligned} -m_2 \frac{\partial^2 u(H,t)}{\partial t^2} - b_3 \frac{\partial u(H,t)}{\partial t} - c_3 u(H,t) + F \cdot E \frac{\partial u(H,t)}{\partial x} + \\ + F \cdot \eta \frac{\partial^2 u(H,t)}{\partial x \partial t} + F \cdot \mu \cdot E \frac{\partial u(H,t)}{\partial x} = -Q_2 \sin(\omega_2 t) \end{aligned} \quad (3)$$

где  $F$  – площадь дна прес-формы;  $H$  – высота формируемого изделия.

Представим функцию  $u(x,t)$  в виде мнимой части комплексного числа [7]:

$$u(x,t) = I(m)[u(x) \cdot e^{i\omega t}], \quad (4)$$

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

После подстановки (4) в уравнение (1) получим:

$$u(x, t) = (A \cdot e^{-(\alpha+i \cdot k) \cdot x} + B \cdot e^{(\alpha+i \cdot k) \cdot x}) \cdot e^{i \cdot \omega t}, \quad (5)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные интегрирования (комплексные амплитуды), определяемые из граничных условий (2) и (3).

Вынужденные колебания рассматриваемой динамической системы можно описать комплексной волновой функцией:

$$u_1(x, t) = (A_1 \cdot e^{-(\alpha+i \cdot k_1) \cdot x} + B_1 \cdot e^{(\alpha+i \cdot k_1) \cdot x}) \cdot e^{i \cdot \omega_1 t}, \quad (6)$$

$$u_2(x, t) = (A_2 \cdot e^{-(\alpha+i \cdot k_2) \cdot x} + B_2 \cdot e^{(\alpha+i \cdot k_2) \cdot x}) \cdot e^{i \cdot \omega_2 t}. \quad (7)$$

Здесь  $k_1 = \frac{\omega_1}{a}$ ,  $k_2 = \frac{\omega_2}{a}$  – скорости волн в уплотняемой порошковой

среде;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – угловые частоты вынужденных колебаний;  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$  и  $B_2$  – постоянные интегрирования (комплексные амплитуды), определяемые из граничных условий (2) и (3). Для их нахождения подставим, предварительно продифференцировав, выражения (6) и (7) в граничные условия (2) и (3) и после преобразований получим:

$$\begin{cases} (z_1 + z_2) \cdot A_1 + (z_1 - z_2) \cdot B_1 = Q_1; \\ (z_3 + z_2) \cdot A_1 \cdot e^{-(\alpha+i \cdot k_1) \cdot H} + (z_3 - z_2) \cdot B_1 \cdot e^{(\alpha+i \cdot k_1) \cdot H} = 0; \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} (z_4 + z_5) \cdot A_2 \cdot e^{-(\alpha+i \cdot k_2) \cdot H} + (z_4 - z_5) \cdot B_2 \cdot e^{(\alpha+i \cdot k_2) \cdot H} = Q_2; \\ (z_6 + z_5) \cdot A_2 + (z_6 - z_5) \cdot B_2 = 0, \end{cases} \quad (9)$$

где

$$z_1 = c_4 - m_1 \cdot \omega_1^2 + i \cdot \omega_1 \cdot b_4; \quad (10)$$

$$z_2 = F \cdot (\alpha + i \cdot k_1) \cdot [E \cdot (1 + \mu) + i \cdot \eta \cdot \omega_1]; \quad (11)$$

$$z_3 = c_3 - m_2 \cdot \omega_1^2 + i \cdot \omega_1 \cdot b_3; \quad (12)$$

$$z_4 = c_3 - m_2 \cdot \omega_2^2 + i \cdot \omega_2 \cdot b_3; \quad (13)$$

$$z_5 = F \cdot (\alpha + i \cdot k_2) \cdot [E \cdot (1 + \mu) + i \cdot \eta \cdot \omega_2]; \quad (14)$$

$$z_6 = c_4 - m_1 \cdot \omega_2^2 + i \cdot \omega_2 \cdot b_4. \quad (15)$$

Используя выражения системы (8) и (9) найдём значения комплексных амплитуд в следующем виде:

$$A_1 = \frac{Q_1 \cdot (z_3 - z_2) \cdot e^{(\alpha+i \cdot k_1) \cdot H}}{\Delta_1}; \quad B_1 = -\frac{Q_1 \cdot (z_3 + z_2) \cdot e^{-(\alpha+i \cdot k_1) \cdot H}}{\Delta_1}; \quad (16)$$

$$A_2 = \frac{Q_2 \cdot (z_6 - z_5)}{\Delta_2}; \quad B_2 = -\frac{Q_2 \cdot (z_6 + z_5)}{\Delta_2}; \quad (17)$$

где  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  – определители системы:

$$\Delta_1 = (z_1 + z_2) \cdot (z_3 - z_2) \cdot e^{(\alpha+i \cdot k_1) \cdot H} - (z_1 - z_2) \cdot (z_3 + z_2) \cdot e^{-(\alpha+i \cdot k_1) \cdot H}; \quad (18)$$

$$\Delta_2 = (z_4 + z_5) \cdot (z_6 - z_5) \cdot e^{-(\alpha+i \cdot k_2) \cdot H} - (z_4 - z_5) \cdot (z_6 + z_5) \cdot e^{(\alpha+i \cdot k_2) \cdot H}. \quad (19)$$

Подставляя выражения (16) – (19) в выражения (6) и (7) и, проведя преобразования, определим в комплексном виде законы движения рассматриваемой динамической системы в следующем виде:

$$u_1(x,t) = \frac{Q_1}{\Delta_1} [(z_3 - z_2) \cdot e^{(\alpha+i \cdot k_1)(H-x)} - (z_3 + z_2) \cdot e^{-(\alpha+i \cdot k_1)(H-x)}] \cdot e^{i \cdot \omega_1 t}; \quad (20)$$

$$u_2(x,t) = \frac{Q_2}{\Delta_2} [(z_6 - z_5) \cdot e^{-(\alpha+i \cdot k_2) \cdot x} - (z_6 + z_5) \cdot e^{(\alpha+i \cdot k_2) \cdot x}] \cdot e^{i \cdot \omega_2 t}; \quad (21)$$

при  $x = 0$  они описывают в комплексной форме соответственно законы движения вибростола и формующего пуансона:

$$u_1(0,t) = \frac{Q_1}{\Delta_1} [(z_3 - z_2) \cdot e^{(\alpha+i \cdot k_1) \cdot H} - (z_3 + z_2) \cdot e^{-(\alpha+i \cdot k_1) \cdot H}] \cdot e^{i \cdot \omega_1 t}; \quad (22)$$

$$u_2(0,t) = \frac{Q_2}{\Delta_2} [-(2 \cdot z_5)] \cdot e^{i \cdot \omega_2 t}. \quad (23)$$

### Выводы и перспективы дальнейших исследований

В результате проведённых исследований полученные теоретические зависимости, которые позволяют достаточно точно учесть физико-механические характеристики уплотняемой порошковой среды и определить рациональные параметры пуансона и вибростола вибросиловой установки с двумя источниками колебаний и режимы вибрационного воздействия, при которых обеспечивается эффективное уплотнение порошковых смесей при формовании габаритных заготовок из металлических порошков. Результаты исследований послужили основой для создания достаточно простой и надёжной конструкции вибросиловой установки с двумя источниками вертикально направленных колебаний.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдман П.С. Феноменологическая модель напряженного состояния слоя материала при сжатии / П. С. Гольдман, Л. В. Яхкинд // Дробильно-размольное оборудование и технология дезинтеграции : Междувед. сб. науч. тр. – Л.: «Механобр», 1989. – С. 78–85.
2. Рудь В.Д. Фізико-механічні засади складних схем обробки тиском та вібраційних процесів в технологіях формування порошкових виробів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.16.06 «Порошкова металургія та композиційні матеріали» / В.Д. Рудь. – К., 2005. – 21 с.

3. Гончаревич И.Ф. Реологические методы описания взаимодействия вибромеханизмов с рабочей средой / И.Ф. Гончаревич // Вибротехника: Сб. науч. трудов. – 1973. – № 3(20). – С. 107–114.
4. Овчинников П.Ф. Виброреология / П.Ф. Овчинников. - К.: Наук. думка, 1983. – 272 с.
5. Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем: навч. посібник. / І.І. Назаренко. – К.: ІСДО, 1995. – 256 с.
6. Вібропрес для формування виробів з металевих порошків: патент 69960 Україна, МПК В28В 1/08./ Савелов Д.В., Драгобецький В.В.; заявник і патентовласник КрНУ імені Михайла Остроградського. – № 200111937; заявл. 11.10.2012; опубл. 25.05.2012, Бюл. №10. – 5 с.
7. Савелов Д.В. Теоретические основы вибрационного формования изделий из металлических порошков / Д.В. Савелов, В.В. Драгобецкий // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Зб. наук. пр. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2011. – № 45. – С. 91–98.

Надійшла до редакції 26.11.2012

Рецензент д-р техн. наук, проф. Є.М. Смирнов

Д.В. Савелов

Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, м. Кременчук

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ ПОРОШКОВИХ СУМІШЕЙ НА ВІТРОСИЛОВІЙ УСТАНОВЦІ ІЗ ДВОМА ДЖЕРЕЛАМИ ВЕРТИКАЛЬНО СПРЯМОВАНИХ КОЛИВАНЬ

Проведено теоретичні дослідження динамічної системи «пуансон – порошкова суміш – вібростіл», у якій порошкова суміш представлена у вигляді системи з розподіленими параметрами. Отримані теоретичні залежності дозволяють установити закон руху пуансона й вібростола, визначити їхні основні параметри й раціональні режими вібраційної дії на порошкову суміш.

Ключові слова: динамічна система, пуансон, вібростіл, порошкова суміш, вібраційний вплив.

D.V. Savelov

Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyi National University, Kremenchuk

#### THE STUDY OF POWDER MIX PRESSING IN VIBRATION POWER UNIT WITH TWO SOURCES OF VERTICALLY-DIRECTED OSCILLATIONS

The article deals with the study of the dynamic system “punch – powder mix – vibration exciter”, where the powder mix is a system with distributed parameters. The obtained theoretical dependences make it possible to define the laws of punch and vibration exciter motion, define their basic parameters and rational modes of vibration effect on the powder mix.

Keywords: dynamic system, punch, vibration exciter, powder mix, vibration effect.