

**Выводы.** На основе разработанной конечно-элементной модели и методики расчета НДС станины пресса при работе с упругими компенсаторами различной формы выполнен расчет угловых деформаций и растягивающих напряжений. Показано, что наиболее эффективным является использование компенсаторов № 2 и № 3 (с 7-ю отверстиями), сопровождающееся реализацией максимального значения эквивалентного момента реакции. Это позволяет снизить угловые деформации станины на 10 – 22 % и растягивающие напряжения в опасном сечении – на 6 – 10 %. Установлено, что монтаж компенсаторов № 2 и № 3 (с 7-ю отверстиями), а также № 4 и № 5 (с 10-ю отверстиями) более жесткой или менее жесткой стороной к тылу пресса существенного влияния на НДС станины не оказывает.

**Список литературы:** 1. *Диамантопуло К. К.* Компенсация несоосности системы «пресс-штамп» изношенного штамповочного оборудования / *К. К. Диамантопуло, В. В. Кухарь, А. И. Евтеев* // *Металлургические процессы и оборудование.* – Июнь 2005 г. – № 2. – С. 31–34. 2. Пат. 11782 Україна, МПК(2006) В 21 В 23/00. Компенсатор похибок напряму переміщення повзуна преса / *Диамантопуло К. К., Кухарь В. В., Єрмолов Д. В.* (Україна); заявник і патентовласник Приазовський держ. техн. ун-т. – № u200505677; заяв. 13.06.2005; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1. – 4 с.; іл. 3. *Кухарь В. В.* Методика оценки напряженно-деформированного состояния станины кривошипного пресса открытого типа при работе с упругими компенсаторами перекосов ползуна / *В. В. Кухарь, А. А. Никитченко, Е. Ю. Балалаева, О. А. Тузенко* // *Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2009. – Вип. 11. – С. 176 – 182.* 4. *Кухарь В. В.* Экспериментальное исследование напряжений в станине кривошипного пресса открытого типа при работе с упругими компенсаторами перекосов ползуна / *В. В. Кухарь, Е. Ю. Балалаева* // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: Зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2009. – С. 177 – 181.*

#### УДК 621.762.4

**САВЕЛОВ Д.В.**, канд. техн. наук, доц.,  
**ДРАГОБЕЦКИЙ В.В.** докт. техн. наук, проф.,  
КНУ имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВИБРАЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Уточнена существующая и предложена более общая гипотеза, которая позволяет описать вибрационный процесс формования изделий из конструкционных металлических порошков. Получены теоретические выражения для определения нарастания плотности смеси из металлического порошка в зависимости от величины и вида динамической нагрузки, позволяющие обосновать режимы вибрационного и основные параметры вибрационной машины, построена реологическая модель смеси из металлического порошка.

**Ключевые слова:** математическая модель, вибрационный процесс, конструкционный металлический порошок, плотность, динамическая нагрузка, вибрационная машина.

Уточнена існуюча та запропонована більш загальна гіпотеза, яка дозволяє описати вібраційний процес формування виробів з конструкційних металевих порошків. Отримано теоретичні залежності для визначення нарощування щільності суміші з металевого порошку залежно від величини та виду динамічного навантаження, які дозволяють обґрунтувати режими вібраційної дії та основні параметри вібраційної машини, побудовано реологічну модель суміші з металевого порошку.

**Ключові слова:** математична модель; вібраційний процес, конструкційний металевий порошок, щільність, динамічне навантаження, вібраційна машина.

The present hypothesis has been revised and a more general hypothesis has been presented describing the vibrational forming process of construction metal powder articles. Theoretical expressions have been defined for determination of density increase of a metal powder mix depending on the value and type of the dynamic loading and allowing to ground the regimes of vibrational influence and the main parameters of a vibrational machine, the rheological model of powder-like mixture is built.

**Key words:** mathematical model, vibrational process, construction metal powder, density, dynamic loading, vibrational machine.

**Актуальность работы.** При осуществлении технологического процесса формования заготовок и изделий из металлических порошков на вибрационных прессах происходит взаимодействие вибрирующего пуансона с обрабатываемой смесью из металлического порошка, находящейся в пресс-форме. Основной задачей теории уплотнения смесей из металлических порошков является создание рабочей гипотезы, позволяющей описать процесс деформирования слоя смеси из металлического порошка и обоснованно выбрать как уплотняющие средства, так и интенсивность вибрационного воздействия на смесь из металлического порошка при наименьших энергетических затратах. Существующая основная гипотеза вибрационного формования базируется на том, что порошковая масса при вибрировании приобретает свойства вязкой жидкости и в соответствии с законом Паскаля заполняет формы различной сложности вблизи вибрирующей поверхности [1-4]. Однако представленная теория не в полной мере описывает вибрационный процесс формования заготовок и изделий из металлических порошков и требует дальнейшего уточнения.

Целью работы является создание теории, позволяющей описать вибрационный процесс формования смесей из металлических порошков, выбрать основные параметры вибрационного оборудования и установить требуемый режим вибрационного воздействия на смесь из металлического порошка.

**Материал и результаты исследований.** Смесь из металлического порошка (далее порошковая смесь) представляет собой рыхлую среду с произвольной формой и ориентированием хорошо смачиваемых металлических частиц и их агрегатов, покрытых пленками наполнителя или поверхностно-активных веществ (ПАВ). В качестве наполнителей применяют 7-8 % раствор синтетического каучука в бензине, парафин, поливиниловый спирт, глицерин в количестве 100-150 см<sup>3</sup> на 1 кг смеси [4]. В качестве ПАВ для формования порошков железа, никеля, кобальта, тугоплавких металлов используются карбоновые кислоты и спирты жирного ряда; для формования порошков цветных металлов – водные коллоидные растворы жирных кислот; для формования различных порошков – защитные коллоиды [4].

При вибрационном воздействии периодические импульсы, передаваемые от вибрирующего пуансона, создают в уплотняемом слое порошковой смеси упругопластические волны деформаций, периодически создающие напряжения сжатия и растяжения, что приводит к уменьшению сил поверхностного натяжения наполнителя или ПАВ, нарушению первоначальных связей в смеси, увеличению подвижности металлических частиц порошка. Большая подвижность металлических частиц порошка приводит к их соударениям, переориентации и относительному сближению друг с другом с образованием большего количества контактов, вытеснению воздуха и образованию более плотной упаковки.

В начале процесса вибрационного формования, длящегося несколько секунд, происходит заметная осадка (пластическая деформация) порошковой смеси. При этом происходит дополнительное перемешивание порошковой смеси. Вместе с увеличением подвижности порошковой смеси возрастают инерционные силы, действующие на металлические частицы смеси и покрывающие их пленки наполнителя или ПАВ. Когда инерционные силы превышают силы поверхностного натяжения, от поверхности металлических частиц отделяется часть наполнителя или ПАВ, которая заполняет пространство между металлическими частицами, обеспечивая тем самым роль смазки, а также способствует лучшей передаче вибрационного воздействия по всей толщине формируемого слоя.

Для формования заготовок и изделий из металлических порошков требуются вибрационные воздействия большой интенсивности, способные вызвать такие инерционные силы, которые по своей величине будут превышать силы поверхностного натяжения пленок наполнителя или ПАВ. Так как инерционные силы пропорциональны ускорениям, то для перевода порошковой смеси в тиксотропное состояние необходимы высокочастотные режимы формования с малыми амплитудами [1, 4].

После перевода порошковой смеси в состояние повышенной текучести следует заключительный этап процесса уплотнения смеси – формирование плотной структуры с одновременным разрушением агрегатов из слипшихся между собой металлических частиц. Этот процесс наиболее длительный и трудоемкий. Для его интенсификации необходимо развить в порошковой смеси достаточно большое динамическое давление. Повысить динамическое давление можно за счет увеличения размаха колебаний путем применения жестко-упругих ограничителей хода, пригрузов и вибропригрузов при формовании заготовок и изделий из металлических порошков. По мере возрастания плотности порошковой смеси возрастают напряжения, необходимые для разрушения образовавшихся связей и дальнейшего роста уплотнения, т.е. каждому значению плотности соответствует свое минимальное значение напряжений, обеспечивающих разрушение структуры порошковой смеси. При этом пластическая деформация порошковой смеси при каждом последующем цикле нагружения уменьшается. Поскольку напряжения и частота их приложения оказывают существенное влияние на процесс формования, то в качестве основного фактора, определяющего характер процесса уплотнения, можно

принять произведение этих параметров, называемое интенсивностью динамической нагрузки [5]. Интенсивность динамической нагрузки  $I_d$  может быть найдена из следующей зависимости [5, 6]:

$$I_d = \sigma_0 \cdot \omega, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – амплитуда напряжений, возникающих в уплотняемом слое порошковой смеси;  $\omega$  – угловая частота колебаний.

Согласно эмпирическому закону Герстнера зависимость относительной пластической деформации уплотняемого слоя порошковой смеси от прикладываемой нагрузки может быть аппроксимирована выражением [7]:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = b \cdot P^n, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – величина относительной пластической деформации;  $\varepsilon_1$  – упругая составляющая деформации;  $\varepsilon_2$  – пластическая составляющая деформации;  $P$  – динамическая нагрузка;  $b$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты, характеризующие упругопластические деформации (с учетом динамичности нагружения).

Аналогичной зависимостью определится максимальная относительная величина пластической деформации  $\varepsilon_{\max}$ , при которой достигается полное уплотнение слоя порошковой смеси:

$$\varepsilon_{\max} = b \cdot P_k^n, \quad (3)$$

где  $P_k$  – значение динамической нагрузки, при которой достигается требуемая плотность формируемого изделия из металлического порошка.

Рассмотрим модель пластического деформирования слоя порошковой смеси при действии внешней динамической нагрузки  $P$ , схема которой приведена на рис. 1.

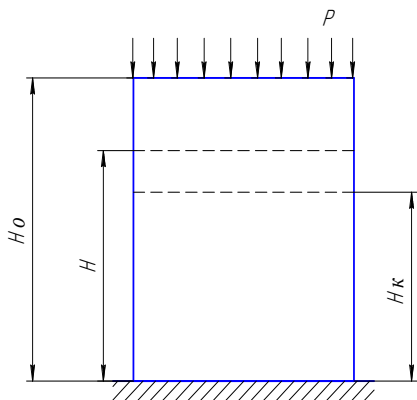


Рис. 1 – Расчетная схема пластического деформирования слоя порошковой смеси

В представленной на рис. 1 схеме  $H_0$  и  $H_k$  – высота формируемого слоя соответственно в неуплотненном состоянии при насыпной плотности  $\rho_0$  и в уплотненном состоянии при окончательном значении плотности  $\rho_k$ ;  $H$  – промежуточное значение высоты формируемого слоя при плотности  $\rho$ .

Поскольку при деформировании слоя порошковой смеси его масса  $m$  остается постоянной, то значения высот  $H_0, H$  и  $H_k$  можно представить в следующем виде:

$$H_0 = \frac{m}{S \cdot \rho_0}; \quad H = \frac{m}{S \cdot \rho}; \quad H_k = \frac{m}{S \cdot \rho_k}, \quad (4)$$

где  $S$  – площадь основания формируемого слоя порошковой смеси.

Исходя из расчетной схемы, представленной на рис. 1 и выражений (4) найдем величины пластических деформаций  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_{\max}$  в следующем виде:

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{H_0 - H}{H_0} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho}; \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\Delta H_k}{H_0} = \frac{H_0 - H_k}{H_0} = \frac{\rho_k - \rho_0}{\rho_k}. \quad (6)$$

Подставляя выражения (5) и (6) в зависимости (2) и (3), получим:

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho} = b \cdot P^n; \quad (7)$$

$$\frac{\rho_k - \rho_0}{\rho_k} = b \cdot P_k^n. \quad (8)$$

Разделим выражение (7) на (8) и, проведя преобразования, получим уравнение для определения плотности уплотняемого слоя порошковой смеси в зависимости от величины прикладываемой динамической нагрузки:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \varepsilon_k \left( \frac{P}{P_k} \right)^n}. \quad (9)$$

Динамическую нагрузку, действующую в процессе вибрационного уплотнения слоя смеси, можно выразить через интенсивность динамической нагрузки  $I_d$  и продолжительность ее воздействия  $t$  [5, 6]:

$$P = I_d \cdot t = \sigma_0 \cdot \omega \cdot t. \quad (10)$$

На основании выражения (10) зависимость (9) преобразуется к виду:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \varepsilon_k \cdot \left( \frac{\sigma_0 \cdot \omega \cdot t}{P_k} \right)^n}. \quad (11)$$

Значение показателя  $n$  выбирается по данным [6] в зависимости от вида нагрузки и вида металлического порошка.

В том случае, когда порошковая смесь испытывает сложное напряженное состояние, возникающее при одновременном действии нормальных напряжений  $\sigma_0$  в вертикальном направлении и касательных напряжений  $\tau$  в горизонтальной плоскости, эквивалентное напряжение  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  определится по гипотезе энергии формоизменения:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\sigma_0^2 + 3 \cdot \tau^2}. \quad (12)$$

В этом случае, зависимость (11) преобразуется к виду:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \varepsilon_k \left( \frac{\sigma_{\text{ЭКВ}} \cdot \omega \cdot t}{P_k} \right)^n}. \quad (13)$$

Таким образом, получена теоретическая зависимость, позволяющая описать закон нарастания плотности порошковой смеси при вибрационном воздействии

на неё в зависимости от физико-механических характеристик самой смеси, вида, направления и продолжительности вибрационного воздействия, частоты и величины импульсных напряжений порошковой смеси.

Полученное выражение (13) справедливо в том случае, если величина эквивалентного напряжения  $\sigma_{\text{экв}}$ , возникающего в уплотняемом слое, не меньше минимального напряжения  $\sigma_{\text{min}}$ , обеспечивающего предельное разрушение связей в порошковой смеси для образования плотной упаковки, т.е.  $\sigma_{\text{экв}} \geq \sigma_{\text{min}}$ .

Требуемую продолжительность вибрационного воздействия для достижений определенной плотности  $\rho$  в зависимости от вида вибрационного воздействия можно определить из выражений (13):

$$t = \frac{P_k}{\sigma_{\text{экв}} \cdot \omega \cdot t} \cdot \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho \cdot \varepsilon_k} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (14)$$

Интенсивность вибрационного воздействия нужно выбирать так, чтобы общая продолжительность вибрационного воздействия на порошковую смесь из металлического порошка не превышала 16 – 30 секунд [1].

В процессе вибрационного формования заготовок и изделий из металлических порошков каждый элементарный объём порошковой смеси подвержен действию инерционных и упруго-вязких сил, испытывает пластическое течение и обладает кинетической и потенциальной энергией. Это значит, что масса и упруго-вязко-пластичность распределены по всему объёму деформированной среды. Следовательно, порошковую смесь можно с достаточной степенью точности рассматривать как систему с распределенными параметрами, а упруго-вязко-пластические свойства порошковой смеси в каждом элементарном объёме представить реологической моделью, схема которой приведена на рис. 2.

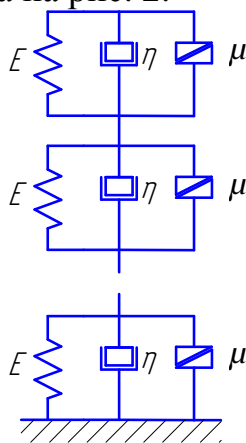


Рис. 2 – Схема расчетной реологической модели слоя порошковой смеси

Тогда при вертикальном деформировании слоя смеси, зависимость между напряжением и деформацией может быть описана уравнением:

$$\sigma = E \frac{\partial u}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \text{sign}(\dot{x}) \mu \sigma_0, \quad (15)$$

где  $u$  и  $x$  – эйлерова и лагранжева координаты;  $E$  – динамический модуль упругой деформации порошковой смеси;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости, характеризующий внутреннее трение в порошковой смеси;  $\mu$  – коэффициент сухого трения, позволяющий моделировать упрочнение слоя порошковой смеси в процессе пластической деформации.

Коэффициент динамической вязкости  $\eta$  существенно зависит от скорости распространения волны возмущения в уплотняемом слое, плотности и толщины

формуемого изделия [5, 6]:

$$\eta = a \cdot \rho \cdot H_1, \quad (16)$$

где  $a$  – скорость распространения волны деформации в уплотняемом слое порошковой смеси, которая в первом приближении может быть найдена из выражения  $a = \sqrt{E/\rho}$ ;  $H_1$  – расчетная толщина уплотняемого слоя порошковой смеси, принимаемая в зависимости от соотношения толщины уплотняемого слоя и длины волны возмущения  $L$ :

$$L = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (17)$$

если толщина уплотняемого слоя  $H \leq \frac{1}{4} \cdot L = \frac{\pi}{2 \cdot \omega} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ , то  $H_1 = H$ ;

если  $H > \frac{1}{4} \cdot L$ , то  $H_1 = \frac{1}{4} \cdot L = \frac{\pi}{2 \cdot \omega} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ .

Динамическая нагрузка  $P$ , действующая на порошковую смесь, вызывает в ней напряжения  $\sigma_0$ , обеспечивающие предельное разрушение структуры порошковой смеси и вызывают в ней необратимые пластические деформации (сдвинуть клин, моделирующий уплотняющийся пластический элемент  $\mu$  на рис. 2).

При пластических деформациях вибрирующий формующий пуансон воздействует на порошковую смесь следующими силами: силой  $F_n$ , действующей в плоскости вибрационного формующего пуансона, вызывая необратимые деформации обрабатываемой порошковой смеси и стремится сдвинуть ее относительно рабочего органа, а также силой  $N_n$ , действующей в перпендикулярном направлении и спрессовывающей обрабатываемую смесь.

При скольжении обрабатываемой среды по вибрирующему пуансону на последний действует напряжение от силы сухого трения, значения которого можно представить следующей зависимостью:

$$\sigma_{\pm} = \text{sign}(\dot{x}) \mu \sigma_0. \quad (18)$$

**Выводы.** Уточнена существующая и предложена более общая гипотеза, позволяющая описать вибрационный процесс формования заготовок и изделий из металлических порошков при вибрационном уплотнении их формующим пуансоном. Получены теоретические зависимости для определения нарастания плотности порошковой смеси и продолжительности вибрационного воздействия в зависимости от величины динамической нагрузки, позволяющие обосновать режимы вибрационного воздействия и основные параметры вибрационного оборудования. Предложена реологическая модель порошковой смеси для исследования закономерностей взаимодействия вибрирующего пуансона с обрабатываемой порошковой средой.

**Список литературы:** 1. Порошковая металлургия / С.С. Купарисов, Г.А. Либенсон. – Москва: Металлургия, – 1980. – 496 с. 2. Пористые материалы / Б.Б. Еськов, Д.В. Лагунов, В.С. Лагунов. – Воронеж, 1995. – 256 с. 3. Жданович Г.К. Теория прессования металлических

порошков / *Г.К. Жданович.* – Москва : Машиностроение, 1969. – 303 с. **4.** *Раковский В.С.* Порошковая металлургия в машиностроении : справочник / *В.С. Раковский, В.В. Саклинский.* – Москва : Машиностроение, 1972. – 126 с. **5.** *Іткін О.Ф.* Наукові основи розробки вібраційних машин для ущільнення цементобетонних сумішей: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.05.02 «Машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій». – Харків, 2008. – 44 с. **6.** *Маслов А.Г.* Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве / *А.Г. Маслов, В.М. Пономарь.* – Київ : Будівельник, 1985. – 128 с. **7.** *Батуев Г.С.* Инженерные методы исследования ударных процессов / *Г.С. Батуев, Ю.В. Голубков, А.К. Ефремов.* – Москва : Машиностроение, 1977. – 240 с.

**УДК 621.735.2.043**

**ТАРАНЕНКО М.Е.**, докт. техн. наук, проф., НАКУ «ХАИ», Харьков  
**МАКОВЕЦКИЙ А.В.**, ассистент, НАКУ «ХАИ», Харьков

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ПОКОВОК ИЗ АВИАЦИОННЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО И ПРИБЛИЖЕННЫХ К НЕМУ ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Приведены возможности использования изотермической штамповки для получения качественных поковок с тонкими полотнами, тонкими и высокими ребрами. Предложено конечно-элементное решение задачи горячей объемной штамповки в штампах с дополнительными элементами формы. Выполнено решение для случая штамповки поковок П-образной формы из авиационного сплава типа В95. Проведен анализ полученных результатов.

Наведено можливості використання ізотермічного штампування для отримання якісних поковок з тонкими полотнами, тонкими і високими ребрами. Запропоновано скінчено-елементне рішення задачі гарячого об'ємного штампування у штампах з додатковими елементами форми. Виконано рішення для випадку штампування поковок П-образної форми з авіаційного сплаву типу В95. Проведено аналіз отриманих результатів.

The possibility of using isothermal forging to produce high-quality forgings with thin blades, thin and tall fins are given. A finite-element decision of the problem of open-die forging with a flash in dies with additional shape elements is offered. The decision for the case of forging П-shaped billets from aircraft alloy such as В95. Analysis of the results is carried out.

Свою актуальность вопрос разработки и исследования технологий изотермической штамповки приобрел в середине XX века с появлением жаростойких и жаропрочных инструментальных материалов. Изначально данная технология разрабатывалась и внедрялась на предприятиях авиационной промышленности, однако уже в 70-е годы XX века нашла свое применение на машиностроительных предприятиях [1].

Изотермическая штамповка представляет собой процесс горячего деформирования заготовок в штамповом инструменте, при котором заготовка и инструмент нагреты до температуры горячей штамповки материала. Устраненная