Савелов Д. В.

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

Savelov D. V.

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

УДК 621.762.4

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ВИБРОСИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПОРОШКАМИ

Аннотация. *Описаны существующие и предложена более общая реологическая модель, удовлетворяет целям описания зависимостей «напряжение – объемное уплотнение», которая позволяет описать процесс объемного уплотнения слоя металлического порошка вибрирующим рабочим органом формующего оборудования. Она учитывает упругие и диссипативные свойства металлического порошка и позволяет моделировать процесс межчастичного трения.*

Ключевые слова: *реологическая модель, металлический порошок, объемное уплотнение, вибрирующий рабочий орган.*

Введение. Феноменологический подход в реологии развивается уже в течение многих десятилетий. Изучение различными учеными реологических свойств порошковых сред объясняется тем, что при взаимодействии вибрирующих рабочих органов формующего оборудования с уплотняемыми порошковыми средами происходит поглощение вибрационной энергии, которое непосредственно связано с деформацией порошковых материалов [1]. Описания реологических характеристик порошковых сред представлены в работах Гончаревича И.Ф., Драгобецкого В.В., Зеленина А.Н., Маслова А.Г., Роботнова Ю.Н. и других ученых.

Некоторые реологические модели порошковых, асфальтобетонных и цементобетонных сред и грунтов, которые использовались для исследования их взаимодействия с вибрирующими рабочими органами уплотняющих машин, представлены на рис. 1.

Ряд феноменологических моделей порошковых сред для исследования процесса взаимодействия вибрирующих рабочих органов с порошковыми средами были разработаны в ИГД им. А.А. Сочинского [2] (рис. 1, а). В этих моделях помимо упругих и диссипативных элементов были учтены элементы массы, учитывающие инерционность среды; учтены взаимодействия напряжений во взаимно перпендикулярных плоскостях и статическое изменение свойств среды.

Эти модели воспроизводят стохастический характер динамического процесса и удачно использовались при решении задач вибрационного транспортирования массовых грузов. Предложенный метод моделирования взаимодействия вибрационных механизмов с рабочей средой предусматривает детерминированное решение задачи со всеми его преимуществами, возможностями прогнозирования оптимальных параметров процесса, позволяет учесть статическое изменение свойств среды. Другие исследователи в работах [3, 4, 5] предлагали реологические модели асфальтобетонных и цементобетонных сред и грунтов, взаимодействующих с вибрирующими рабочими органами уплотняющих машин. Предложенные реологические модели, которые хотя и использовались для решения аналогичных задач, однако дают представление о поведении материала под нагрузкой лишь в первом приближении и не учитывают внутреннего трения между частицами и уплотнения среды в процессе деформирования.

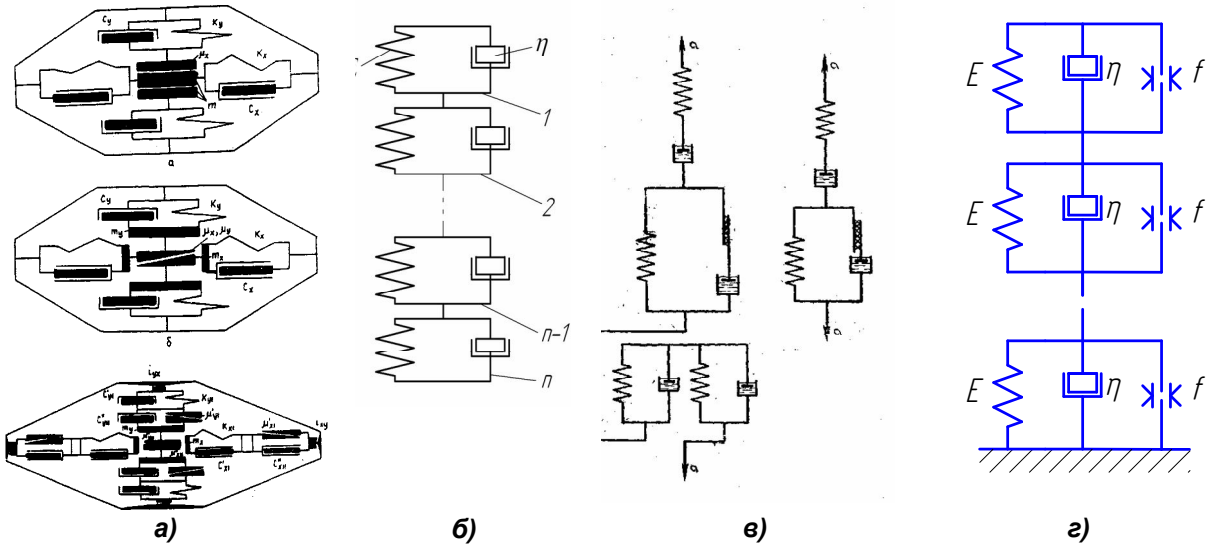

Рис. 1. Реологические модели порошковых, асфальтобетонных и цементобетонных сред и грунтов для исследования их взаимодействия с вибрирующими рабочими органами уплотняющих машин

Попытка учесть перемещение частиц в процессе вибрационного уплотнения была предложена в работе [3, 4]. Здесь для определения влияния реологических характеристик среды на поведение вибрационного рабочего органа при вибрационном уплотнении асфальтобетонных и цементобетонных смесей была предложена реологическая модель этих сред (рис. 1, г). В этом случае зависимость между напряжением и деформацией была описана зависимостью вида [3, 4]:

$$\sigma = E\frac{\partial u}{\partial x} + \eta\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + fu, \qquad (1)$$

где u и x – эйлерова и лагранжева координаты; σ – напряжения, возникающие в асфальтобетонной смеси; E – динамический модуль упругой деформации асфальтобетонной смеси; η – коэффициент динамической вязкости асфальтобетонной смеси; f – коэффициент сопротивления, учитывающий затраты энергии на процессы, сопровождающие колебания уплотняемого материала (конечные перемещения частиц, их соударения и переориентация, трение слоев асфальтобетона, перераспределения битума и т.д.).

Анализ данной зависимости позволяет сделать вывод о том, что все компоненты, входящие в правую часть должны иметь размерность напряжения. При этом третий коэффициент, фактически учитывающий трение между частицами f, должен иметь размерность МПа/м, чтобы при подстановке в (1) при умножении на величину перемещения в метрах (м), была получена размерность в МПа, соответствующая напряжению. По всей видимости, числовые значения данного коэффициента f автором взяты из экспериментальных исследований и использованы в теоретических расчетах. Поэтому данная модель не получила распространения среди других исследований, является нефизичной и не может быть использована для установления зависимости между напряжением и деформацией при уплотнении асфальтобетонных и цементобетонных смесей, а следовательно не может быть применима к изучению процессов динамического уплотнения металлических порошков.

Цель работы. Целью работы является создание такой реологической модели деформированного слоя металлического порошка, позволяющей в дальнейшем обоснованно выбрать рациональные условия нагружения металлического порошка вибрирующими органами формующего оборудования с учетом его физико-механических характеристик при наименьших энергетических затратах.

Материал и результаты исследований. Анализ вибрационных процессов формования изделий из металлических порошков достаточно точно может быть выполнен на основе применения

систем с распределенными параметрами [1]. Это значит, что упруго-вязкопластичнось распределены по всему объему прессуемого металлического порошка. Кроме того это является основным условием для получения из металлических порошков качественных по своей структуре и равноплотности изделий. Схема расчетной реологической модели слоя металлического порошка представлена на рис. 2.

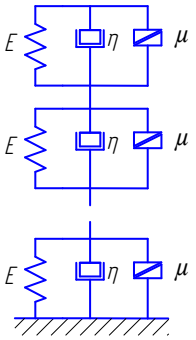

Рис. 2. Схема расчетной реологической модели слоя металлического порошка

Разработанная феноменологическая модель является более пригодной для исследования и анализа динамических процессов и достаточно точно воспроизводит физические закономерности процесса вибрационного прессования. Предлагаемый метод моделирования взаимодействия вибрирующих рабочих органов формующего оборудования с металлическими порошками предусматривает такое решение задачи, при котором появляется возможность определять физико-механические характеристики порошка, и в то же время учитывать статическое изменение порошковой среды, что значительно увеличивает достоверность получаемых результатов.

Тогда при вертикальном деформировании слоя металлического порошка, зависимость между напряжением и объемным уплотнением может быть описана уравнением следующего вида:

$$\sigma = E\frac{\partial u}{\partial x} + \eta\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \mathrm{sgn}(\dot{u})\mu \cdot \sigma, \qquad (2)$$

где μ – коэффициент сухого трения, позволяющий моделировать объемное уплотнение слоя порошка.

Коэффициент динамической вязкости η существенно зависит от скорости распространения волны возмущения в уплотняемом слое, плотности и толщины формуемого изделия [3, 6]:

$$\eta = c \cdot \rho \cdot H, \qquad (3)$$

где c – скорость распространения волны деформации в уплотняемом слое порошковой смеси, которая в первом приближении может быть найдена из выражения $c = \sqrt{E/\rho}$ [7]; H – расчетная толщина уплотняемого слоя порошка, принимаемая в зависимости от соотношения толщины уплотняемого слоя и длины волны возмущения L [6]:

$$L = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \cdot c \cdot \qquad (4)$$

Сила P, действующая на поверхность металлического порошка, вызывает в нем напряжения σ, обеспечивающие разрушение начальных структурных связей и арочных образований в порошке и вызывают в нем пластическое деформирование (сдвинуть клин, моделирующий уплотняющийся пластический элемент μ на рис. 2).

При пластических деформациях вибрирующий рабочий орган воздействует на металлический порошок следующими силами: силой F_n, действующей в плоскости колеблющегося рабочего органа, вызывая необратимое деформирование порошка и стремясь сдвинуть его относительно рабочего органа, а также силой N_n, действующей в перпендикулярном направлении и спрессовывающей обрабатываемый порошок.

При скольжении прессуемого порошка по поверхности вибрирующего рабочего органа на последний действует напряжение от силы сухого трения, значение которого можно представить следующей зависимостью:

$$\sigma_{\pm} = sign(\dot{u})\mu \cdot \sigma. \qquad (5)$$

Знак $sign(\dot{u})$ в третьем члене выражения (2) и в выражении (5) учитывает направление скорости движения рабочего органа и сил трения, возникающих между металлическими частицами элементарных объемов.

Графическая интерпретация зависимости $sign(\dot{u})$ от времени t представлена на рис. 3. Для пояснения значения $sign(\dot{u})$ в зависимости (2) рассмотрим расчетную схему взаимодействия металлического порошка, находящегося в пресс-форме, с вибрирующим рабочим органом на рис. 4.

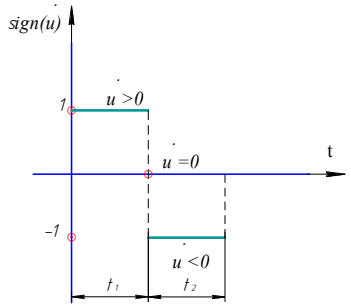

Рис. 3. Графическая зависимость $sign(\dot{u})$ ***от времени*** t

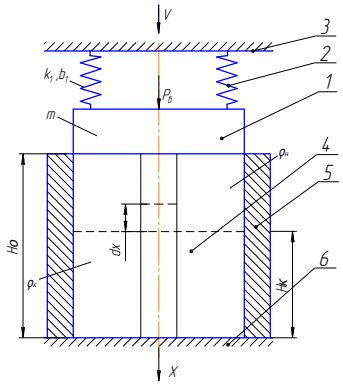

Рис. 4. Расчетная схема взаимодействия металлического порошка с вибрирующим рабочим органом:
1 − рабочий орган; 2 − упругий амортизатор; 3 − нажимная плита; 4 − металлический порошок; 5 − пресс-форма; 6 − основание пресс-формы

При движении рабочего органа 1 в направлении координаты x происходит его взаимодействие с элементарным объемом, в результате чего выделенный элемент dx движется вниз в направлении координаты x.

При движении элемента dx вниз между ним и таким же элементом соседнего элементарного объема возникают силы трения. В результате этого этот элемент захватывается и также перемещается в направлении координаты x. В этом случае направления действия возмущающей силы и силы трения совпадает. В соответствии с этим и с учетом графической зависимости, представленной на рис. 3,

$$sign(\dot{u}) = \dot{u}/|\dot{u}| = 1, \qquad (6)$$

а зависимость между напряжением и деформацией примет следующий вид:

$$\sigma = E\,\partial u/\partial x + \eta\,\partial^2 u/\partial x \partial t + \mu\sigma. \qquad (7)$$

Через некоторый момент времени произойдет максимальное деформирование поверхности порошковой смеси, и скорость рабочего органа 1 при этом станет равной нулю. После этого происходит отрыв пуансона 1 от поверхности порошковой смеси и начинается его движение вверх. В этом случае направление возмущающей силы и силы трения между элементарными объемами будут противоположны. В этом случае с учетом графической зависимости на рис. 4:

$$sign(\dot{u}) = \dot{u}/|\dot{u}| = -1, \qquad (8)$$

а зависимость между напряжением и деформацией будет иметь вид:

$$\sigma = E\,\partial u/\partial x + \eta\,\partial^2 u/\partial x \partial t - \mu\sigma. \qquad (9)$$

Выводы. Обоснована реологическая модель металлического порошка, которая позволяет описать распространение волн деформаций в прессуемом порошке при динамической нагрузке. Данная реологическая модель удовлетворяет целям описания зависимостей «напряжение – объемное уплотнение», характерных для порошков, прессуемых вертикальными колебаниями. Она позволяют учесть упругие и диссипативные свойства порошковой смеси и смоделировать процесс межчастичного трения. Элементы реологической модели существенно зависят от относительной плотности и гранулометрического состава порошковой смеси.

Список использованных источников

1. Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем: Навч. посібник / І. І. Назаренко. – К. : ІСДО, 1993. – 216 с. – Рос. мовою.

2. Гончаревич И.Ф. Реологические методы описания взаимодействия вибромеханизмов с рабочей средой / И.Ф. Гончаревич // Вибротехника: Сб. науч. трудов. – 1973. – № 3(20). – С. 107 – 114.

3. Маслов А.Г. Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве / А.Г. Маслов, В.М. Пономарь. – Київ : Будівельник, 1985. – 128 с.

4. Маслов А. Г. Научные основы и разработка поличастотных машин для обработки и уплотнения асфальтобетонных и цементобетонных смесей: автореф. дис. на соискание науч.степени докт. техн. наук : спец. 05.05.04 «Дорожные и строительные машины». – Харков, 1994. – 50 с.

5. Зеленин А.Н. Машины для земляных работ // Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение , 1975. – 424с., ил.

6. Маслов А.Г. Исследование процесса взаимодействия вибрационной головки с грунтом // А.Г. Маслов, Д.В. Савелов. Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды Кременчугского государственного политехнического института. Вып. 1/2001 (10). – Кременчуг: КГПИ, 2001. – С. 407 – 410.

7. Бальшин М.Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургия волокна. – Металлургия, 1972. – 264 с.

Список источников в транслитерации

1. Nazarenko I.I. Prikladni zadachi teorії vibracijnih sistem: Navch. posibnik / I.I. Nazarenko. – K.: ISDO, 1993. – 216 s. – Ros. movoju.

2. Goncharevich I.F. Reologicheskie metody opisanija vzaimodejstvija vibromehanizmov s rabochej sredoj / I.F. Goncharevich // Vibrotehnika: Sb. nauch. trudov. – 1973. – № 3(20). – S. 107 – 114.

3. Maslov A.G. Vibracionnye mashiny i processy v dorozhnom stroitel'stve / A.G. Maslov, V.M. Ponomar. – Kiïv : Budivelnik, 1985. – 128 s.

4. Maslov A. G. Nauchnye osnovy i razrabotka polichastotnyh mashin dlja obrabotki i uplotnenija asfaltobetonnyh i cementobetonnyh smesej: avtoref. dis. na soiskanie nauch.stepeni dokt. tehn. nauk: spec. 05.05.04 «Dorozhnye i stroitel'nye mashiny». – Harkov, 1994. – 50 s.

5. Zelenin A.N. Mashiny dlja zemljanyh rabot // Zelenin A.N., Balovnev V.I., Kerov I.P. Uchebnoe posobie dlja vuzov. M.: Mashinostroenie, 1975.–424s., il.

6. Maslov A.G. Issledovanie processa vzaimodejstvija vibracionnoj golovki s gruntom // A.G. Maslov, D.V. Savelov. Problemy sozdanija novyh mashin i tehnologij. Nauchnye trudy Kremenchugskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo instituta. Vyp. 1/2001 (10). – Kremenchug: KGPI, 2001. – S. 407 – 410.

7. Balshin M.Ju. Nauchnye osnovy poroshkovoj metallurgii i metallurgija volokna. – Metallurgija, 1972. – 264 s.

РЕОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ОПИСАННЯ ВЗАЄМОДІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ВІБРОСИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ З МЕТАЛЕВИМИ ПОРОШКАМИ

Анотація. *Описані існуючі та запропонована більш загальна реологічна модель, що задовольняє цілям опису залежностей «напруження – об'ємне ущільнення», яка дозволяє описати процес об'ємного ущільнення шару металевого порошку вібруючим робочим органом формувального обладнання. Вона враховує пружні та дисипативні властивості металевого порошку і дозволяє моделювати процес тертя між частками металевого порошку.*

Ключові слова: *реологічна модель; металевий порошок, об'ємне ущільнення, вібруючий робочий орган.*

THE REOLOGICAL METHODS OF DESCRIPTION OF COOPERATION OF WORKINGS ORGANS OF VIBROPOWER EQUIPMENT WITH METALLIC POWDERS

Annotation. *The present existing is described and more general rheological model which satisfies the aims of description of dependences of «tension – volume compression» is offered, which allows to describe the process of by volume compression of layer of metallic powder the vibrating working organ of forming equipment. It takes into account resilient and dissipative properties of metallic powder and allows to design the process of friction between parts of metallic powder.*

Key words: *rheological model, metallic powder, volume compression, vibrating working organ.*