

# Порошковая металлургия, композиционные материалы и покрытия

УДК 621.7.014.2

DOI: 10.14529/met210308

## МИКРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

**В.А. Иванов**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

В статье представлены результаты компьютерного моделирования поведения представительного объема порошкового материала на начальных стадиях уплотнения при одноосном сжатии и результаты натурных экспериментов по прессованию порошковых материалов. Модель представительного объема – это 640 сферических частиц двух разных диаметров (2 мм – 427 шт.; 1,4 мм – 213 шт.), разбитых на конечные элементы и вброшенных под действием силы тяжести в кубический объем с жесткими стенками. Подвижная верхняя стенка оказывает давление на начальную укладку частиц. Компьютерное моделирование выполнялось с применением параллельного пакета LS-DYNA. Натурные эксперименты проведены на башенном копре Instron CEAST 9350 в пресс-форме одностороннего прессования диаметром 10 мм. Для экспериментальных исследований использовался порошок на основе искусственного графита ГИИ-А ТУ 1916-109-071-2009, частицы менее 315 мкм, с добавлением фенолформальдегидной смолы марки СФП-011А, а также порошок медный электролитический марки ПМС-1 ГОСТ 4960–2009 размером частиц менее 80 мкм. Скорость нагружения в компьютерном моделировании и натурном эксперименте принята – 2 м/с. Компьютерная модель представительного объема показала высокую повторяемость результатов при случайных изменениях в начальной укладке частиц, что позволяет в дальнейшем использовать одну случайную укладку для моделирования различных условий нагружения. Влияние внешнего и внутреннего трения при уплотнении порошкового материала имеет качественное совпадение с известными из литературы данными. Построенная модель позволяет получать однородное деформированное состояние представительного объема путем исключения внешнего трения. При сравнении результатов моделирования с экспериментом получено качественное совпадение, а количественные расхождения хорошо объясняются принятыми при моделировании допущениями и упрощениями, а также отличием в начальных условиях. Построенная модель представительного объема может быть использована при исследовании механического поведения порошковых материалов на начальных стадиях уплотнения.

*Ключевые слова: порошковые материалы, представительный объем, многочастичный метод конечных элементов, LS-DYNA, уплотнение, прессование.*

### Введение

Медно-графитовые материалы широко применяются при изготовлении электроконтактных изделий, в том числе скользящих контактов для электротранспорта, электроприводов промышленного назначения [1–3], и изделий с повышенной теплопроводностью [4]. Такие материалы обладают высокой электро- и теплопроводностью, хорошими трибологическими свойствами в сочетании с приемлемой дугостойкостью и малой плотностью в сравнении с металлокерамикой. Электро- и теплопроводность обеспечивается медью, трибологические свойства реализуются бла-

годаря смазывающим свойствам графита. Технология получения изделий из медно-графитовых композиций базируется на классической технологической схеме порошковой металлургии: подготовка исходного материала, формование (компактирование), спекание, пропитка расплавом металла (при необходимости). При этом получаемые изделия обладают выраженной анизотропией свойств, которые зависят в первую очередь от характера движения материала на операции формования [3–6].

В настоящее время при разработке технологических процессов получения изделий из

порошковых материалов широко применяется компьютерное моделирование на базе метода конечных элементов [7, 8], метода дискретных частиц [9, 10], комбинированных методов [11–13]. Разнообразие подходов объясняется сложностью процессов, протекающих при уплотнении порошковых материалов.

Для порошковых материалов характерны: газонасыщенность, микроскопическая неустойчивость, «слабые» межчастичные связи, полидисперсный состав. Отдельный вклад в механику деформирования вносит форма частиц. Порошковый материал обычно не имеет прочности на растяжение. Из-за этого наибольшую сложность с точки зрения компьютерного моделирования представляет технологическая операция предварительного уплотнения исходного порошкового материала, где происходит переход от несвязанного порошкового материала к связанному пористому состоянию. При этом из объема уплотняемого порошка удаляется значительное количество адсорбированных газов, отдельные частицы занимают микроскопически устойчивое положение, устанавливаются прочные межчастичные связи, сами частицы необратимо деформируются или разрушаются. На стадии уплотнения полуфабрикат получает технологическую прочность, достаточную для последующих технологических операций.

Данная статья посвящена развитию методов компьютерного моделирования процессов уплотнения порошков меди и графита с использованием иерархического подхода и концепции элементарного представительного объема. Концепция элементарного представительного объема предполагает, в частности, что исследование механического поведения выбранного элементарного объема позволяет с достаточной точностью судить о механическом поведении материала в целом. Выбор элементарного представительного объема в случаях с упорядоченными укладками частиц простой геометрической формы обычно проблем не вызывает [14–18]. Однако в случаях, когда укладка частиц нерегулярная и геометрия частиц сложная, выбор элементарного представительного объема требует некоторого обоснования. В частности, в [19] рекомендуется принимать величину характерного размера элементарного представительного объема не менее  $10d_{cp}$ , где  $d_{cp}$  – средний эквивалентный диаметр частиц. Действительно, большое количество частиц позволяет хорошо

описывать поведение сыпучего материала, однако при реализации комбинированного многочастичного метода конечных элементов увеличение числа частиц приводит к экспоненциальному росту времени расчета. В связи с этим разумно ограничиться таким числом частиц, при котором результаты компьютерного моделирования имеют хорошую повторяемость вне зависимости от начальной укладки частиц, а время расчета приемлемо.

Примененный в настоящей работе комбинированный многочастичный метод конечных элементов в трехмерной постановке со случайной укладкой частиц под действием силы тяжести опирается на работы [11, 12] и является их логическим продолжением. В частности, реализована трехмерная постановка задачи, рассматриваются полидисперсные укладки частиц, варьируются условия трения.

Цель настоящей работы – обосновать применимость микромеханической модели представительного объема к процессам уплотнения порошковых материалов на основе графита и меди, в том числе на начальных стадиях. В связи с этим особое внимание уделено исследованию свойств модели представительного объема в цикле «нагрузка – разгрузка» (относительной плотности, статистических характеристик, условий трения, характер кривых разгрузки), а также качественному/количественному сопоставлению результатов компьютерного моделирования и натурных экспериментов.

### Методика и материалы

#### 1. Компьютерное моделирование

Компьютерное моделирование одноосного нагружения представительного объема порошка проводилось на 1 вычислительном узле (12 ядер) кластера «Торнадо-ЮУрГУ» с использованием параллельной версии пакета LS-DYNA. При моделировании использован комбинированный многочастичный метод конечных элементов в трехмерной постановке со случайной укладкой частиц под действием силы тяжести. Влияние адсорбированных в объеме порошка газов не учитывалось.

Моделировался представительный объем с размерами  $0,014 \times 0,014 \times 0,014$  м. Боковые стенки и дно жесткие, неподвижные. Верхняя стенка – подвижная. К подвижной стенке приложена сила, изменяющаяся во времени по графику (рис. 1). Длительность цикла «нагрузка – разгрузка» составила 17 мс. Мак-

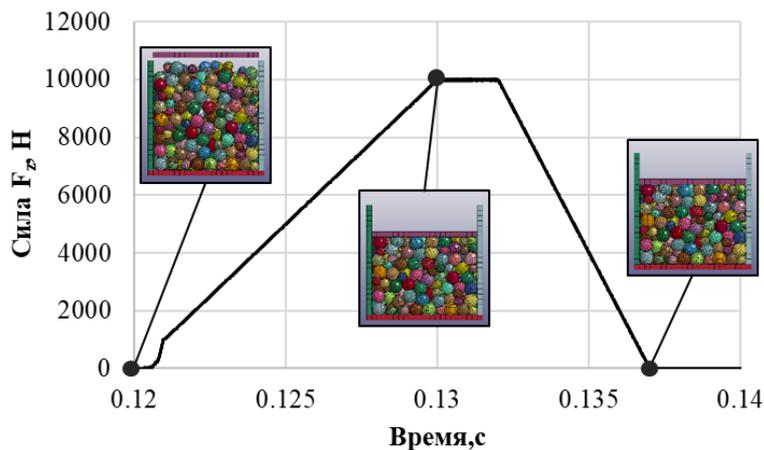


Рис. 1. График изменения силы, приложенной к верхней подвижной стенке от времени

симальная скорость перемещения подвижной 2 м/с. Частицы представляли собой конечно-элементные аппроксимации сфер диаметром 2 мм – 427 шт. и диаметром 1,4 мм – 213 шт. Общее количество частиц – 640 шт. Каждая частица была разбита на 256 8-узловых конечных элементов. Трение между частицами (внутреннее), частицами и стенками представительного объема (внешнее) задавалось пропорционально нормальному контактному давлению (закон трения Кулона) с коэффициентом трения  $\nu$ .

Моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе регулярная расстановка частиц вбрасывалась в представительный объем через «бункер» под действием силы тяжести. На втором этапе частицы, случайным образом уложившиеся в представительном объеме (см. рис. 1), подвергались одноосному сжатию по циклу «нагрузка – разгрузка», при этом регистрировались силы, возникающие на боковых стенках, дне и верхней подвижной стенке, а также перемещение верхней подвижной стенки.

При компьютерном моделировании варьировался материал частиц, условия трения и начальные скорости частиц.

Вариант 1: модель абсолютно упругого материала, с параметрами  $E = 10$  ГПа,  $\mu = 0,25$ ,  $\rho = 2060$  кг/м<sup>3</sup>, характерными для искусственных графитов [20]. Коэффициенты внутреннего  $\nu_{inside}$  и внешнего трения  $\nu_{outside}$  принимались равными 0,3.

Вариант 2: билинейная упруго-пластическая модель, с линейным упрочнением, с параметрами  $G = 46,4$  ГПа,  $K = 142$  ГПа,  $\sigma_Y = 80$  МПа,  $E_{TAN} = 300$  МПа,  $\rho = 8900$  кг/м<sup>3</sup>,

характерными для меди состава электролитического порошка ПМС-1 [21]. Коэффициенты внутреннего и внешнего трения попарно принимали следующие значения:  $\nu_{inside} = \nu_{outside} = 0,3$ ;  $\nu_{inside} = 0,3$ ;  $\nu_{outside} = 0,0$ ;  $\nu_{inside} = \nu_{outside} = 0,0$ .

## 2. Натурные эксперименты

Эксперименты по одностороннему прессованию проводились на башенном копре Instron CEAST 9350, схема пресс-формы приведена на рис. 2. Диаметр пуансона – 10 мм. Масса пуансона – 102,9 г, зазор между матрицей и пуансоном – менее 100 мкм.

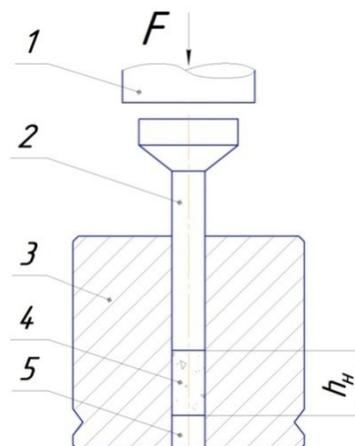


Рис. 2. Пресс-форма: 1 – боек; 2 – пуансон верхний; 3 – матрица; 4 – пресс-порошок; 5 – пуансон нижний

Проводилось 2 серии опытов на разных материалах.

Первая серия – на порошках искусственного графита в смеси с фенолформальдегидной смолой новолачного типа марки СФП-011А. Порошок искусственного графита ГИИ-А ТУ 1916-109-071-2009 получен размолом в

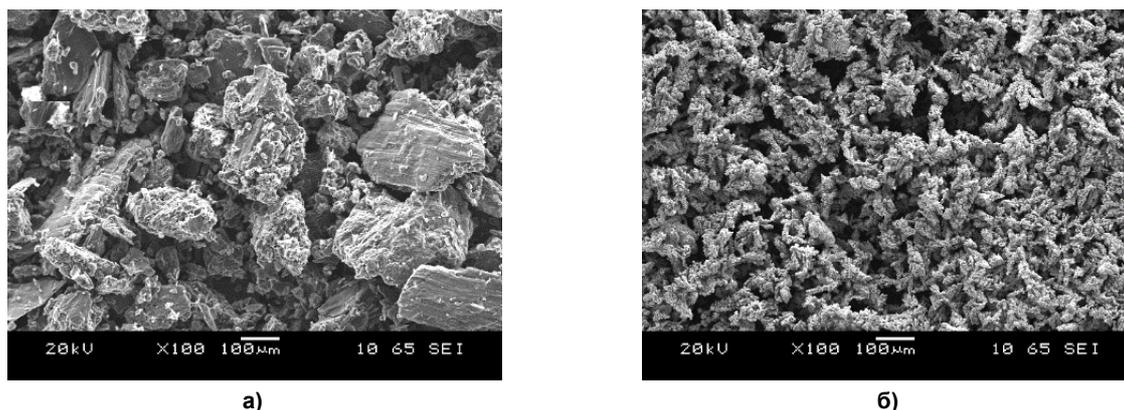


Рис. 3. Форма и размеры частиц порошков: а – порошок графита в смеси с фенолформальдегидной смолой; б – медный порошок ПМС-1

шаровой мельнице с последующей магнитной сепарацией и отсевом фракции менее 315 мкм. Смешивание порошков искусственного графита и смолы проводилось в барабанном смесителе в соотношении 86 мас. % графитового порошка, 14 мас. % фенолформальдегидной смолы. Частицы осколочной формы, уплотненные (рис. 3а). Теоретическая плотность пресс-композиции – 1935 кг/м<sup>3</sup>. Насыпная плотность – 830 кг/м<sup>3</sup>. Относительная насыпная плотность – 0,43. Масса насыпки – 1,6 ± 0,02 г. Скорость бойка в момент удара – 2,0 м/с. Масса бойка – 5,144 кг.

Вторая серия опытов ставилась на порошке медном электролитическом марки ПМС-1 ГОСТ 4960–2009. Размер частиц – менее 80 мкм. Частицы дендритной формы (рис. 3б). Теоретическая плотность – 8900 кг/м<sup>3</sup>. Насыпная плотность – 1780 кг/м<sup>3</sup>. Относительная насыпная плотность – 0,232. Масса насыпки – 5 ± 0,02 г. Скорость бойка в момент удара – 2,0 м/с. Масса бойка – 15,144 кг.

При проведении опытов порошок заданной

массы всыпался в пресс-форму, разравнивался, после чего устанавливался пуансон, производилось измерение начальной высоты насыпки.

Измерение массы насыпки порошка и образцов после прессования проводилось на лабораторных весах «Масса-К» ВК-1500, с точностью 0,02 г. Измерение геометрических размеров – с использованием штангенциркуля с цифровым электронным отсчетным устройством с точностью 0,01 мм. При проведении опытов встроенными средствами измерения копра фиксировались значения силы на бойке после удара по верхнему пуансону и его перемещение. Форма и размеры частиц исследовались на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6460 LV.

### 3. Обработка результатов и критерии оценок

При обработке результатов компьютерного моделирования и натурных экспериментов использованы расчетные схемы, представленные на рис. 4.

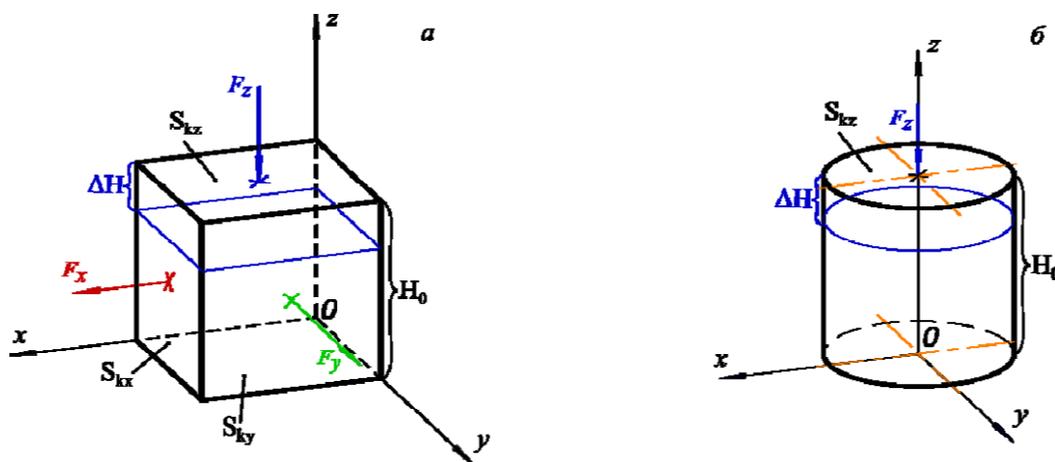


Рис. 4. Схемы нагружения элементарного представительного объема (а), в натурном эксперименте (б)

Для статистической оценки и сопоставления результатов компьютерного моделирования с результатами натуральных экспериментов вычислялись нормальные осевые напряжения  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  на стенках (1), и логарифмическая степень деформации  $\varepsilon_z$  (2):

$$\sigma_x = \frac{F_x}{S_{kx}}, \quad \sigma_y = \frac{F_y}{S_{ky}}, \quad \sigma_z = \frac{F_z}{S_{kz}}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_z = \ln \frac{H_{0i} - \Delta H_i}{H_{0i}}, \quad (2)$$

где  $F_x, F_y$  – силы на боковых неподвижных стенках, Н;

$F_z$  – сила на верхней подвижной стенке, Н;

$S_{kx}, S_{ky}, S_{kz}$  – площади стенок, м<sup>2</sup>;

$H_{0i}$  – начальная высота насыпки порошка, м;

$\Delta H_i$  – перемещение верхней подвижной стенки (верхнего пуансона), м;

$i$  – индекс, принимающий значения: км – для компьютерного моделирования, э – для натурального эксперимента.

Для оценки повторяемости в качестве критериев приняты [9]: среднее значение (3), погрешность (4), относительная погрешность (5) оцениваемого параметра:

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i; \quad (3)$$

$$\Delta_a = \frac{t_\gamma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}; \quad (4)$$

$$\delta_a = \frac{\Delta_a}{\bar{a}} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где  $a_i$  – значения оцениваемого параметра (кинетическая энергия, перемещение, нормальные напряжения по осям);

$n$  – количество опытов;

$t_\gamma$  –  $\gamma$ -квантиль распределения Стьюдента,  $\gamma = 0,95$ .

При постановке натуральных экспериментов по одноосному сжатию порошковых материалов крайне трудно исключить влияние внешнего трения на результаты, в связи с чем практически всегда в натуральных экспериментах реализуется неоднородное напряженное состояние порошкового материала. Иногда, для практических целей, неоднородностью напряженного состояния пренебрегают [22]. Однородное напряженное состояние подразумевает равенство соответствующих компонент напряжений на параллельных гранях выделенного объема.

В качестве критерия оценки однородности напряженного состояния в данной работе принята осредненная по времени процесса относительная разница нормальных напряже-

ний на противоположных гранях элементарного представительного объема (6):

$$\bar{\delta}_i = \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{2 \cdot (|\sigma_{1i}^j| - |\sigma_{2i}^j|)}{(|\sigma_{1i}^j| + |\sigma_{2i}^j|)} \right|, \quad (6)$$

где  $i$  – индекс, принимающий значения по осям  $x, y$  или  $z$  и обозначающий ось, вдоль которой рассматривается соответствующая относительная разница;

$j$  – номер шага по времени;

$N$  – общее количество шагов по времени на соответствующей стадии процесса (нагружение, выдержка, разгрузка);

$\sigma_{1i}^j$  – нормальные напряжения на передней, правой и верхней стенках вдоль соответствующей оси;

$\sigma_{2i}^j$  – нормальные напряжения на задней, левой и нижней стенках вдоль соответствующей оси.

Для расчета относительной плотности порошка после разгрузки использовано уравнение неразрывности (закон сохранения массы) для единицы объема в форме (7), преобразованное к выражению (8), которое связывает текущее значение относительной плотности прессовки с относительной насыпной плотностью и логарифмической степенью деформации вдоль оси  $Oz$ :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \text{div}(\vec{v}) = 0; \quad (7)$$

$$\bar{\rho} = \bar{\rho}_0 e^{\varepsilon_z}, \quad (8)$$

где  $\vec{v}$  – вектор скорости в точке порошкового материала;

$\rho$  – плотность порошкового материала в точке;

$t$  – время;

$\bar{\rho}$  – относительная плотность после разгрузки;

$\bar{\rho}_0$  – относительная плотность перед прессованием;

$\varepsilon_z$  – логарифмическая деформация вдоль оси  $Oz$ .

## Результаты и обсуждение

### 1. Параметры масштабирования

Как видно из вышеизложенного, абсолютные размеры частиц в компьютерном моделировании и экспериментах существенно отличаются. Так, для порошков на основе искусственного графита отличие в максимальных размерах частиц – в 6,35 раза, для медного порошка – 25 раз. Это требует некоторых пояснений.

1. Размеры частиц в компьютерном моделировании выбирались исходя из вычислительных ограничений пакета LS-DYNA. Масса и моменты инерции моделируемых тел принимают значения соответственно  $\sim d^3$  и  $\sim d^2$ , где  $d$  – характерный размер моделируемого тела. При размерах частиц, выраженных в метрах масса отдельных частиц составляет величины порядка  $10^{-9}$  кг и менее, а моменты инерции – порядка  $10^{-6}$  кг·м<sup>2</sup> и менее, что с учетом ошибок округления существенно снижает точность решения или делает решение невозможным.

2. Концепция представительного объема позволяет установить связь между микроскопической структурой исследуемого материала и макромеханическими характеристиками деформируемого твердого тела. В связи с этим при выборе представительного объема акцент делается в первую очередь на возможность выделить характерные структурные характеристики, при этом абсолютные размеры отдельных структурных составляющих и самого представительного объема являются важным, но второстепенным фактором. Оценка влияния масштабного фактора (соотношение абсолютных размеров структурных элементов в модели и в эксперименте) выходит за рамки настоящей статьи и должна быть оценена отдельно.

## 2. Оценка статистических характеристик результатов компьютерного моделирования

Для оценки статистических характеристик результатов компьютерного моделирования было предварительно поставлено 12 вычислительных опытов по одноосному нагружению 216 сферических упругих частиц одного диаметра – 2 мм. Начальная регулярная укладка представляла собой кубическую решетку с размерами  $6 \times 6 \times 6$  частиц. Для формирования случайных упаковок в начальный момент времени частицам задавались произвольно ориентированные скорости – линейные  $V$  и угловые  $\omega$ . Среднее по всем опытам значение начальной суммарной кинетической энергии составило  $16,79 \pm 5,04 \cdot 10^{-6}$  Дж, относительная погрешность – 30%. Время расчета одного варианта в среднем составило 7,5 ч.

Для уложившихся под действием силы тяжести частиц параметры укладки отличались от начальных. В среднем в плоскостях, параллельных  $xOy$ , вдоль осей  $Ox$ ,  $Oy$  располагалось по 6–7 частиц, в плоскостях, параллельных  $xOz$ ,  $yOz$ , вдоль осей  $Ox$ ,  $Oy$  располагалось также по 6–7 частиц, вдоль оси  $Oz$  по 3–4 частицы. Относительная плотность после укладки –  $0,417 \pm 0,0097$ , относительная погрешность – 2,32%.

На рис. 5 показано изменение средних по

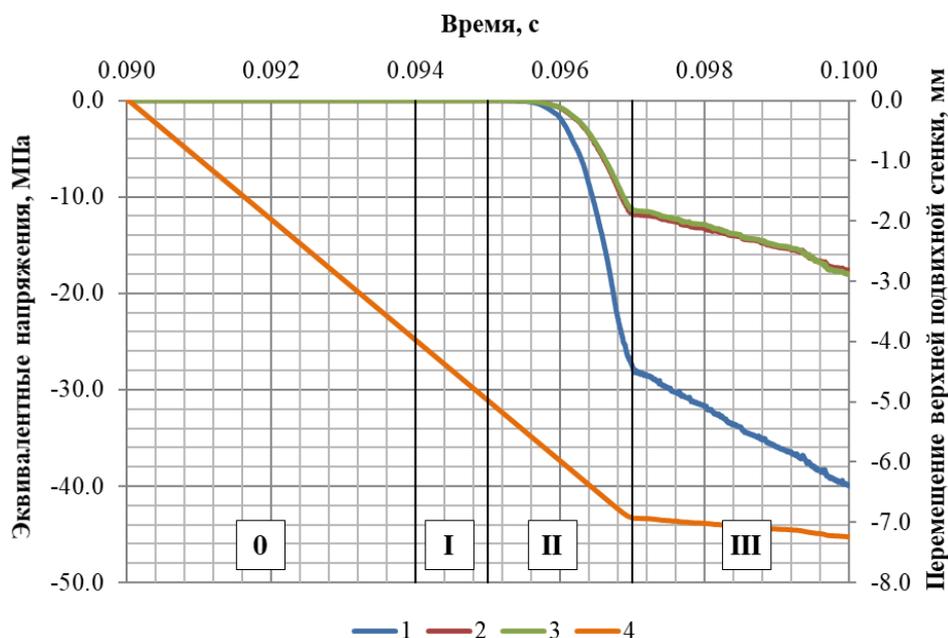


Рис. 5. Зависимость эквивалентных напряжений по осям и перемещения верхней подвижной стенки от времени: 1 –  $\bar{\sigma}_z$ ; 2 –  $\bar{\sigma}_x$ ; 3 –  $\bar{\sigma}_y$ ; 4 –  $\bar{z}$ ; 0 – стадия свободного перемещения верхней стенки; I – стадия установления контакта верхней стенки с частицами; II – стадия переукладки частиц; III – стадия упругого деформирования частиц

Таблица 1

Средние максимальные значения нормальных напряжений по осям  $Ox$ ,  $Oy$  и  $Oz$ , их погрешностей и относительных погрешностей

$\bar{\sigma}_z$ , МПа	$\Delta\sigma_z$ , МПа	$\delta\sigma_z$ , %	$\bar{\sigma}_x$ , МПа	$\Delta\sigma_x$ , МПа	$\delta\sigma_x$ , %	$\bar{\sigma}_y$ , МПа	$\Delta\sigma_y$ , МПа	$\delta\sigma_y$ , %
-40,0	$0,47 \cdot 10^5$	1,2	-17,6	1,3	7,4	-18,0	1,10	6,1

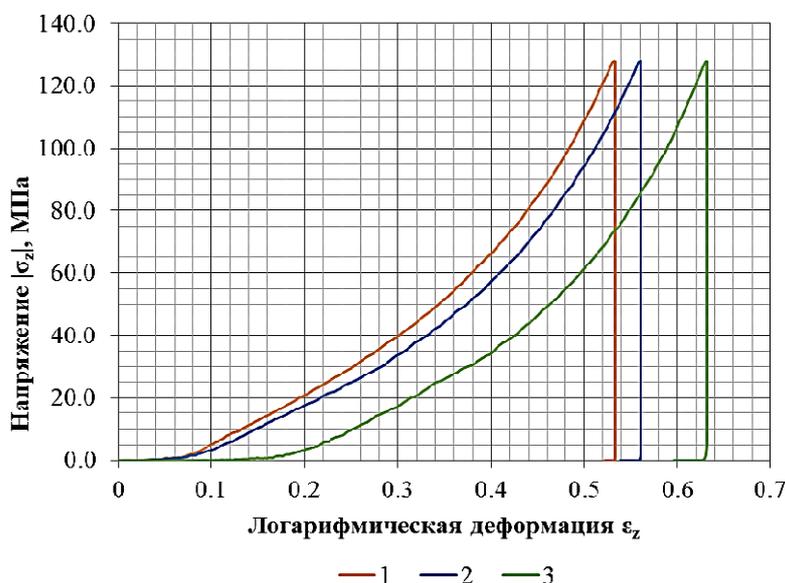


Рис. 6. Влияние условий трения на связь  $\sigma_z = f(\varepsilon_z)$ :  
1 – с трением; 2 – без внешнего трения; 3 – без трения

нескольким опытам величины перемещения верхней подвижной стенки  $\bar{z}$  и нормальных напряжений по осям  $\bar{\sigma}_z$ ,  $\bar{\sigma}_x$  и  $\bar{\sigma}_y$ , в зависимости от времени.

Необходимо отметить, что относительные погрешности нормальных напряжений достигали своих максимальных значений (до 176 %) на стадии I (установление контакта верхней стенки с частицами), что обусловлено случайным расположением частиц и малой величиной возникающих при этом усилий. На стадии II происходила переукладка частиц, сопровождающаяся уменьшением их подвижности. Характерный излом графиков (рис. 6) отражает переход к стадии III, который сопровождается изменением характера деформирования элементарного представительного объема, ведущим механизмом деформации становится упругая деформация частиц и каркаса, ими образованного. Влияние начальной укладки снижается, о чем можно судить по снижению относительных погрешностей, которые принимают на этой стадии минимальные значения, не превышающие 8 % (табл. 1).

Наблюдаемое кратное отличие по величине коэффициентов вариации  $\delta\sigma_z < \delta\sigma_x \approx \delta\sigma_y$ , по-видимому, связано с аналогичным разли-

чием в количестве частиц вдоль оси  $Oz$  и вдоль осей  $Ox$ ,  $Oy$  и может быть устранено путем увеличения общего числа частиц в элементарном представительном объеме при сохранении его размеров.

На основании полученных оценок статистических характеристик результатов компьютерного моделирования для последующих вычислительных экспериментов принято:

1) количество частиц 640, при сохранении размеров представительного объема;

2) для построения зависимостей  $\sigma_z = f(\varepsilon_z)$ , при изменении параметров модели (модель материала, условия трения) вычислительные эксперименты проводить без повторов в точках.

### 3. Оценка влияния условий трения на напряженно-деформированное состояние элементарного представительного объема

На рис. 6 представлено влияние условий трения на связь  $\sigma_z = f(\varepsilon_z)$  при компьютерном моделировании процесса одноосного нагружения представительного объема.

В табл. 2 приведена оценка (6) однородности напряженного состояния при различ-

Относительная разница нормальных напряжений на противоположных гранях элементарного представительного объема

Условия трения	$\overline{\delta_x}$			$\overline{\delta_y}$			$\overline{\delta_z}$		
	Н	В	Р	Н	В	Р	Н	В	Р
С трением	0,082	0,034	0,041	0,131	0,119	0,108	0,317	0,305	0,327
Без внешнего трения	0,038	0,001	0,001	0,035	0,001	0,001	0,019	0,000	0,003
Без трения	0,024	0,002	0,002	0,034	0,003	0,003	0,053	0,000	0,004

Примечание. Этапы цикла «нагрузка – разгрузка» обозначены буквами: Н – нагрузка; В – выдержка при максимальном усилии; Р – разгрузка.

ных условиях трения, которая проводилась по нормальным напряжениям, вычисленным в соответствии с (1), при этом полагалось очевидным, что при наличии внутреннего и внешнего трения напряженное состояние не однородно.

Из данных табл. 2 видно, что внешнее трение вносит значительный вклад в неоднородность напряженного состояния, особенно в направлении деформирования представительного объема. При этом вклад в максимальную величину деформации (см. рис. 6) значительно меньше вклада внутреннего трения. Это обстоятельство хорошо известно из практики производства изделий из углеродистых материалов [5].

Таким образом, представленная компьютерная модель представительного объема позволяет получать напряженное состояние, близкое к однородному, и исключить влияние внешнего трения на связь  $\sigma_z = f(\epsilon_z)$  в условиях одноосного нагружения, что важно при определении «чистых» механических свойств порошковых материалов на этапе уплотнения.

**4. Сопоставление результатов компьютерного моделирования с результатами натурального эксперимента**

Результаты компьютерного моделирования и натуральных экспериментов на графитовых порошках иллюстрируют графики на рис. 7. Для медных порошков аналогичные графики приведены на рис. 8. Ключевые характеристики цикла одноосного «нагрузка – разгрузка» для обоих материалов приведены в табл. 3.

В целом, необходимо отметить качественное совпадение результатов компьютерного моделирования и натуральных экспериментов.

Наибольший интерес представляет значительная разница в величине максимальной  $\epsilon_z^{max}$  и остаточной  $\epsilon_p$  логарифмической деформации, а также упругого последствия (см. табл. 3). Анализ причин проведем отдельно для каждого материала.

**1. Уплотнение порошка**

*Графит 86 мас. % + ФФС 14 мас. %*

Согласно результатам компьютерного моделирования и натурального эксперимента

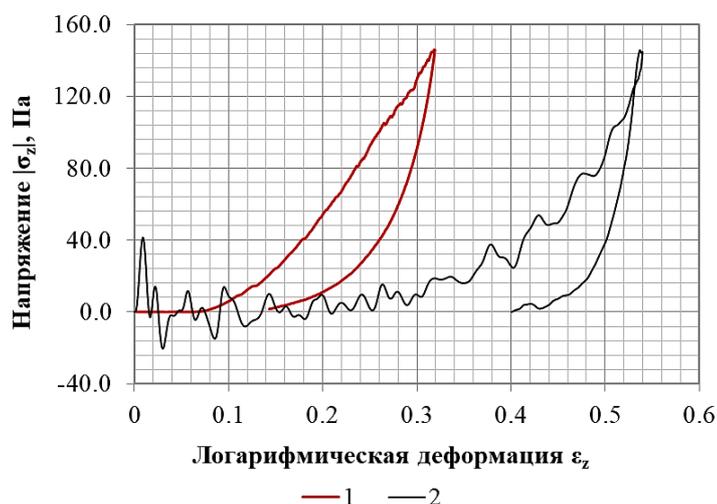


Рис. 7. Графики цикла «нагрузка – разгрузка» порошка на основе графита: 1 – компьютерное моделирование; 2 – эксперимент

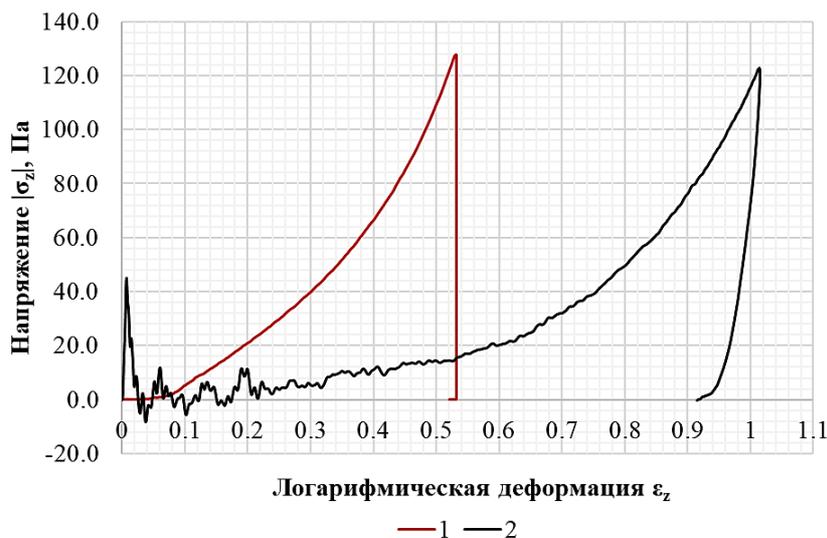


Рис. 8. Графики цикла «нагрузка – разгрузка» медного порошка: 1 – компьютерное моделирование; 2 – эксперимент

Таблица 3  
Ключевые параметры процесса одноосного сжатия порошка (модель и эксперимент)

	$\sigma_z^{\max}$ , Па	$\varepsilon_z^{\max}$	$\varepsilon_p$	$\varepsilon_{er}^*$	$\bar{\rho}_0$	$\bar{\rho}$
Графит 86 мас. % + ФФС 14 мас. %						
Компьютерное моделирование	1,46E + 08	0,319	0,143	0,76	0,509	0,588
Эксперимент	1,46E + 08	0,537	0,401	0,136	0,510	0,762
Относительная погрешность	-0,04 %**	-51 %	-95 %	+26 %	-0,2 %	-26 %
Медный порошок ПМС-1						
Компьютерное моделирование	1,27E + 08	0,533	0,521	0,012	0,496	0,835
Эксперимент	1,23E + 08	1,021	0,943	0,078	0,232	0,596
Относительная погрешность	+3,2 %	-63 %	-58 %	-146 %	+73 %	+33 %

Примечания: \* величина упругого последствия; \*\* знак «-» перед относительной погрешностью означает, что значение параметра в натурном эксперименте выше чем при компьютерном моделировании, знак «+», если наоборот.

(см. табл. 3) у модельных порошков полностью совпала относительная плотность перед циклом «нагрузка – разгрузка». Отличие по величине упругого последствия при разгрузке невелико (в эксперименте – меньше). Значительная разница наблюдается в величинах максимальной и остаточной деформации и в относительной плотности образцов после нагружения (в эксперименте – больше).

Совпадение начальной относительной плотности предположительно объясняется геометрическим фактором: осколочная форма частиц порошка на основе графита (см. рис. 3а) представляет собой выпуклый многогранник, а частицы в компьютерной модели, строго

говоря, являются не сферическими, а гранеными поверхностями, что сближает их по форме с реальным порошком.

Отличия в величине остаточной деформации, с учетом (8), соответствуют отличию в относительной плотности после нагружения. Принимая во внимание, что величина упругого последствия при компьютерном моделировании несколько больше, чем в эксперименте, можно предположить, что в натурном эксперименте при уплотнении порошка графита реализуются механизмы необратимой деформации, не учтенные в компьютерном моделировании. Действительно, в компьютерной модели фактически единственным ме-

ханизмом необратимой деформации является переукладка частиц и связанное с этим межчастичное трение, при этом после снятия нагрузки частицы упруго восстанавливают свою форму, внутренние напряжения снижаются до околонулевых значений (рис. 9б).

Частицы же искусственного графита могут, кроме того, пластически деформироваться (в пределах 0,2 % [23]) и разрушаться. Наличие связующего в порошковой композиции увеличивает способность композиции к необратимому деформированию, по механизму вязко-пластического течения. На рис. 9а, в серым цветом показаны зоны в частицах, где эквивалентные напряжения по Мизесу превышают 100 МПа, предел прочности на сжатие для искусственных графитов по данным [20]. Это подтверждает возможность разрушения частиц графита в натурном эксперименте.

Отдельный вклад в механику процесса уплотнения вносит газовая фаза, ее влияние распространяется в основном на величину упругого последействия. Часть газов успевает покинуть объем порошка в процессе уплотнения, через зазоры в оснастке, а часть оказывается запертой в закрытых порах и испытывает сжатие. Кинетика процесса дегазации и мак-

симальное давление в порах сильно зависит от скорости уплотнения порошковой композиции [24].

Полученные в компьютерной модели и в эксперименте значения упругого последействия сопоставимы с величинами, известными в практике изготовления изделий из порошковых и гранулированных материалов на основе графита [5].

## 2. Уплотнение порошка электролитической меди ПМС-1

Согласно результатам компьютерного моделирования и натурального эксперимента (см. табл. 3) значительная разница наблюдается в величинах начальной относительной плотности (в эксперименте – меньше), в величине относительной плотности после цикла «нагрузка – разгрузка» (в эксперименте – меньше), а также максимальной, остаточной деформации образцов и упругом последействии (в эксперименте – больше).

Значительное отличие в величине начальной относительной плотности объясняется геометрическим фактором: дендритная форма частиц порошка электролитической меди (см. рис. 3б) существенно отличается от сферической формы частиц при компьютерном моделировании.

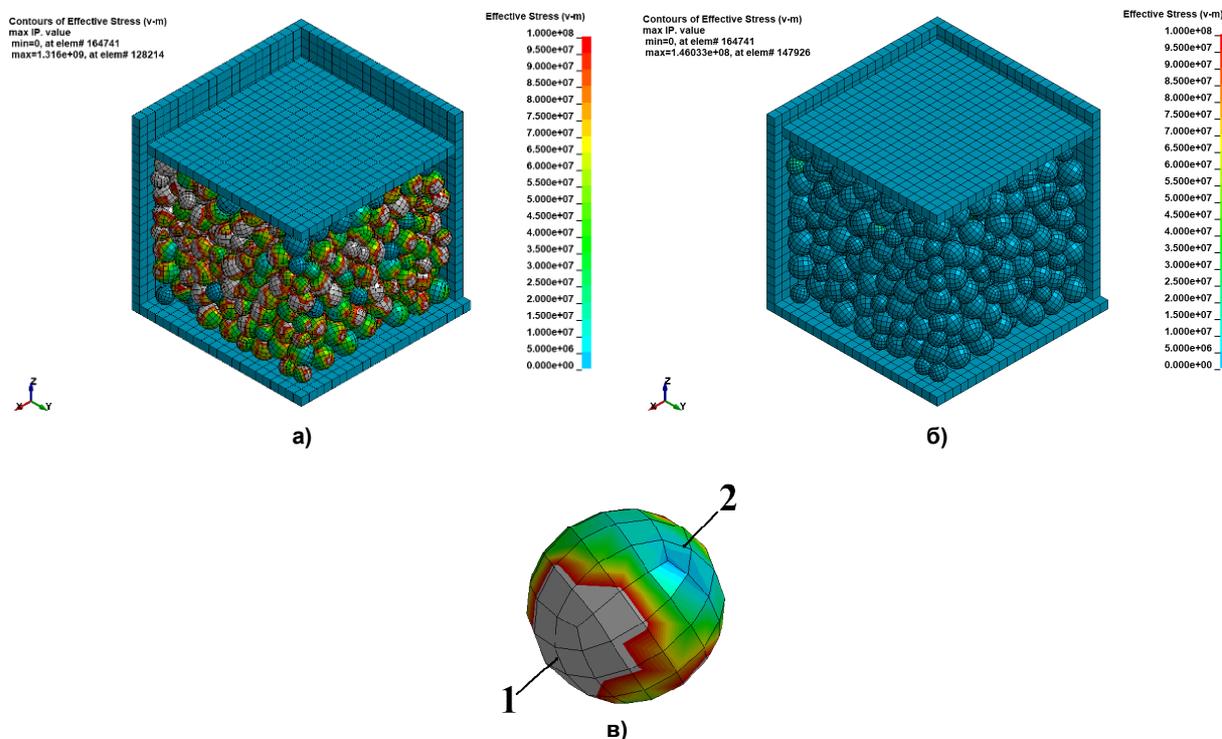


Рис. 9. Компьютерное моделирование. Графит. Эквивалентные напряжения по Мизесу в частицах, МПа: а – при максимальной нагрузке; б – после разгрузки; в – в отдельной частице под нагрузкой: 1 – зона серого цвета, эквивалентные напряжения больше 100 МПа; 2 – цветная зона, эквивалентные напряжения 100 МПа включительно

Данное различие в начальных условиях привело к тому, что в натурном эксперименте часть полученной образцом деформации (0,760 с учетом выражения (8)) пошло на достижение величины начальной относительной плотности компьютерного моделирования  $\overline{\rho}_0^{\text{KM}}$ , на это была затрачена часть кинетической энергии падающих частей башенного копра. К моменту времени, когда относительная плотность образца в натурном эксперименте достигла значения  $\overline{\rho}_0^{\text{KM}}$ , скорость пуансона снизилась до 1,562 м/с и продолжила уменьшаться (рис. 10а). Площади фигур  $S_{OABC}$  и  $S_{DEF}$  на рис. 10б, соответствуют перемещению подвижной стенки (пуансона) в компьютерном моделировании и в натурном эксперименте соответственно. Легко заметить, что  $S_{OABC} > S_{DEF}$ , а следовательно, с учетом выражения (2)  $\Delta H_{\text{KM}} > \Delta H_{\text{э}}$ . Необходимо также отметить, что начальная высота представительного объема меньше, чем высота насыпки порошка в натурном эксперименте, что в сочетании с условием  $\Delta H_{\text{KM}} > \Delta H_{\text{э}}$  приводит к меньшим значениям добавочной деформации в натурном эксперименте. Действительно, добавочная деформация, полученная образцом в эксперименте, с учетом свойства аддитивности логарифмических деформаций, составила всего 0,183. Тогда как в компьютерном моделировании эта величина составила 0,521 (см. табл. 3). Из сказанного следует, что при равных максимальных усилиях деформирова-

ния работа деформации в натурном эксперименте, затраченная на уплотнение порошка, меньше работы деформации в компьютерной модели.

Таким образом, зафиксированная разница по величине деформации и по относительной плотности после цикла «нагрузка – разгрузка», принимая во внимание выражение (8), объясняется разницей в условиях нагружения в компьютерной модели и эксперименте.

Отдельно необходимо отметить значительную разницу по величине упругого последствия (см. табл. 3). Как и в случае с порошками на основе графита, в компьютерной модели не учитывалось влияние газовой фазы, при этом в отличие от порошков на основе графита частицы медного порошка в значительной степени склонны к пластическому деформированию. На рис. 11а видно, что при максимальной нагрузке эквивалентные напряжения по Мизесу в частицах превосходят предел текучести меди 80 МПа. Цветовые зоны на частицах аналогичны изображенным на рис. 9в: серые – напряжения выше 80 МПа; цветные – до 80 МПа включительно. Развивающаяся при этом пластическая деформация затрудняет процесс упругого восстановления формы частиц после снятия нагрузки, что сопровождается значительными остаточными напряжениями в объеме образца после разгрузки (рис. 11б), величина которых может достигать предела текучести.

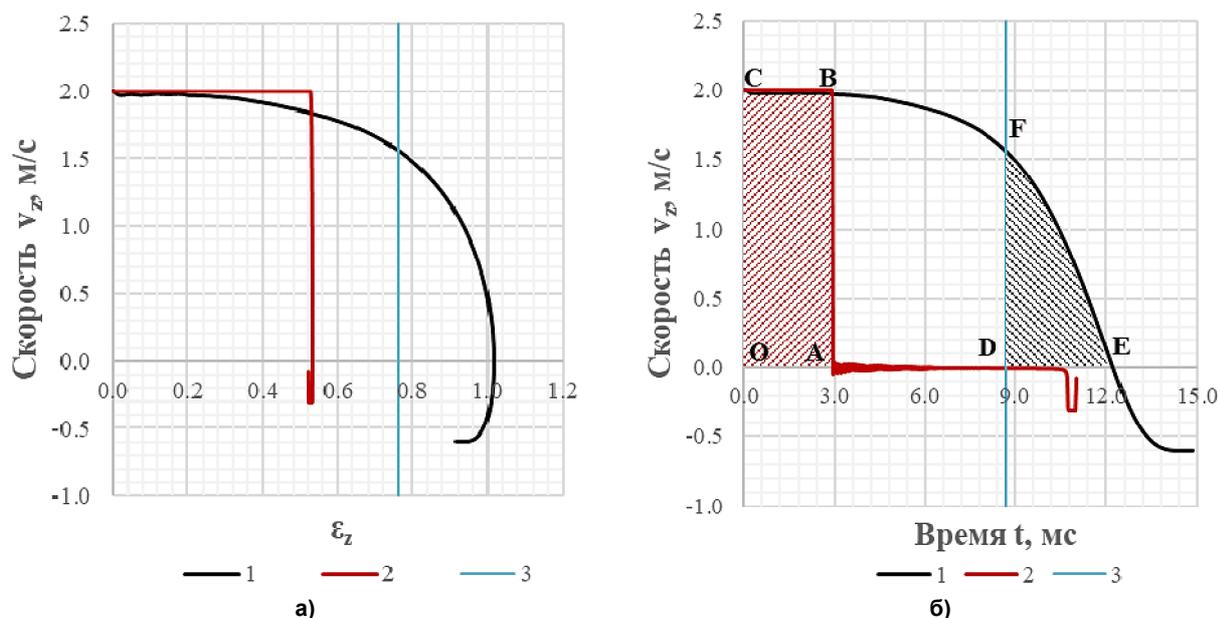


Рис. 10. Графики изменения скорости подвижной стенки (пуансона) в цикле «нагрузка – разгрузка» для медного порошка: а – зависимость  $v_z = f(\epsilon_z)$ ; б – зависимость  $v_z = f(t)$ . 1 – эксперимент; 2 – компьютерное моделирование; 3 – линия уровня  $\epsilon_z = 0,760$  (эксперимент)

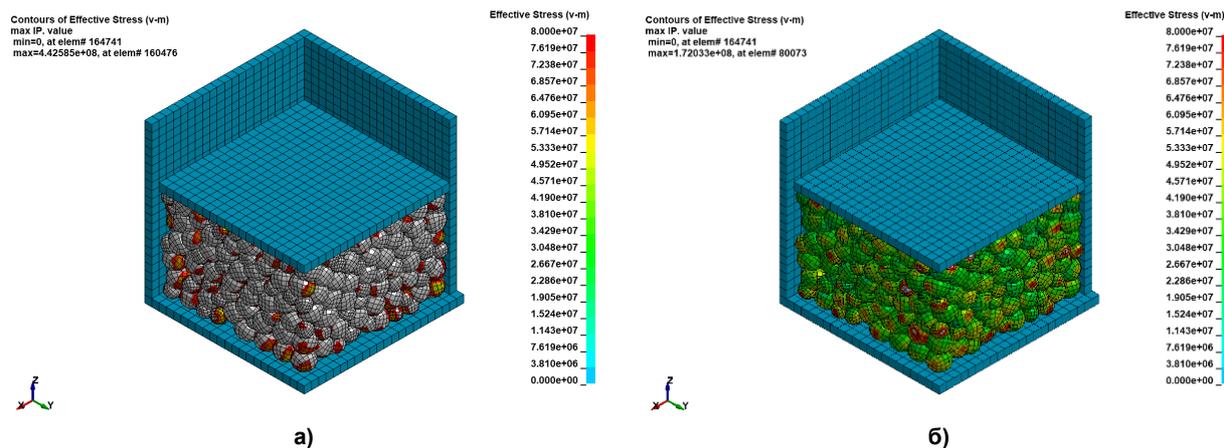


Рис. 11. Компьютерное моделирование. Медь. Эквивалентные напряжения по Мизесу в частицах, МПа: а – при максимальной нагрузке; б – после разгрузки

В целом выбранная для компьютерного моделирования упруго-пластическая модель материала в сочетании с микромеханикой движения неупорядоченных частиц удовлетворительно описывает механизмы деформирования медных порошковых материалов.

## Выводы

1. Построенная модель представительного объема демонстрирует высокую повторяемость результатов при случайных изменениях в начальной укладке частиц. В связи с этим для построения зависимостей  $\sigma_z = f(\varepsilon_z)$  допустимо при проведении вычислительных экспериментов ограничиться одной реализацией для каждого набора параметров модели (модель материала, условия трения).

2. Влияние внешнего и внутреннего трения на зависимость  $\sigma_z = f(\varepsilon_z)$  в модели демонстрирует качественное совпадение с известными из литературы данными. Построенная модель позволяет получать однородное деформированное состояние представительного объема путем исключения внешнего трения.

3. Модель демонстрирует качественное совпадение с экспериментальными данными. Количественные расхождения хорошо объясняются принятыми при моделировании допущениями и упрощениями, а также отличием в начальных условиях.

Построенная модель представительного объема может быть использована при исследовании механического поведения порошковых материалов на начальных этапах уплотнения.

## Литература

1. Берент, В.Я. *Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта* / В.Я. Берент. – М.: Интекст, 2005. – 408 с.
2. Мышкин, Н.К. *Электрические контакты* / Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович. – Долгопрудный: Издат. дом «Интеллект», 2008. – 560 с.
3. Гершман, И.С. *Разработка износостойких материалов с помощью методов неравновесной термодинамики на примере скользящих электрических контактов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01, 05.02.04* / Гершман Иосиф Сергеевич; ФГУП «ВНИИЖТ». – М., 2006. – 234 с.
4. *Powder processing methodology for fabrication of Copper / Graphite composite materials with enhanced thermal properties* / A. Morvan, J.-L. Grosseau-Poussard, N. Caillault et al. // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2019. – Vol. 124, статья № 105474. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105474
5. Фиалков, А.С. *Процессы и аппараты производства порошковых углиграфитовых материалов* / А.С. Фиалков. – М.: Аспект Пресс, 2008 – 687 с.
6. *Новые высокопрочные углеродные материалы для традиционных технологий* / В.И. Костиков, В.М. Самойлов, Н.Ю. Бейлина, Б.Г. Остронов // *Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева)*. – 2004. – Т. XLVIII, № 5. – С. 64–75.
7. Selig, S.G. *A review of finite element simulations of metal powder die compaction* / S.G. Selig, D.A. Doman // *Journal of Machinery Manufacturing and Automation*. – 2014. – Vol. 3 (2). – P. 32–40.

8. Orban, Y.A. Study of methods for simulating multiphase construction materials / Y.A. Orban, D.L. Manea, C. Aciu // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – Vol. 22. – P. 256–261. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.03.039
9. Болтачев, Г.Ш. Моделирование процесса компактирования нанопорошков в рамках гранулярной динамики / Г.Ш. Болтачев, Н.Б. Волков // *Журнал технической физики*. – 2011. – Т. 81, № 7. – С. 18–29.
10. Mayer, A.E. Plastic deformation at dynamic compaction of aluminum nanopowder: Molecular dynamics simulations and mechanical model / Alexander E. Mayer, Andrej A. Ebel, Mohammad K.A. Al-Sandoqachi // *International Journal of Plasticity*, 2020. – Vol. 124. – P. 22–41. DOI: 10.1016/j.ijplas.2019.08.005
11. Munjiza, A.A. The combined finite-discrete element method / A.A. Munjiza. – UK, London: John Wiley & Sons Ltd, 2004. – 350 p. DOI: 10.1002/0470020180
12. Procopio, A.T. On the compaction of granular media using a multi-particle finite element model. Tesis of papers PhD / A.T. Procopio. – Drexel, USA: Drexel University, 2006. – 172 p.
13. CFD-DEM simulations of densification of tetrahedron particles under air impact / Dazhao Gou, Xizhong An, Bo Zhao, Runyu Yang // *Powder Technology*, 2020. – Vol. 361. – P. 220–225. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.08.085
14. Лантнев, А.М. Расчет силовых характеристик процесса уплотнения сферических порошков / А.М. Лантнев, С.В. Подлесный // *Порошковая металлургия*. – 1985. – № 12. – С. 11–17.
15. Цеменко, В.Н. Деформирование порошковых сред / В.Н. Цеменко. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 104 с.
16. Березин, И.М. Определение условий пластического течения некокомпактных материалов / И.М. Березин, А.Г. Залазинский // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 8-1. – С. 19–20.
17. Максименко, Л.А. Моделирование деформационного упрочнения пористых и порошковых материалов в процессах прессования / Л.А. Максименко // *Порошковая металлургия*. – 2014. – № 11–12. – С. 3–14.
18. Моделирование процессов компактирования титановых композитов из порошкообразного сырья / Д.И. Крючков, А.Г. Залазинский, И.М. Березин, О.В. Романова // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2015. – № 1. – С. 48–60.
19. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред: в 2 ч. / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, 1987.
20. Самойлов, В.М. Получение тонкодисперсных углеродных наполнителей и разработка технологии производства тонкозернистых графитов на их основе: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.11 / Самойлов Владимир Маркович; ФГУП «НИИГРАФИТ». – М., 2006. – 371 с.
21. Полухин, П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справ. / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983 – 352 с.
22. Дегтярев, И.С. Диссипация мощности и кинематические соотношения на поверхности разрыва скоростей в сжимаемом жестко-пластическом материале / И.С. Дегтярев, В.Л. Колмогоров // *Журнал прикладной механики и теоретической физики*. – 1972. – № 5. – С. 167–173.
23. Чернявский, А.О. Прочность графитовых материалов и конструкций при малоцикловом нагружении: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.06 / А.О. Чернявский; ЮУрГУ. – Челябинск, 1997. – 27 с.
24. Проблемы дегазации порошковой насыпки при прессовании в пресс-формах с жесткими стенками / В.А. Иванов, Б.А. Яров, А.В. Лепихов, К.Г. Мовчан // *Наука ЮУрГУ. Секции технических наук: материалы 66-й науч. конф. / отв. за вып. С.Д. Ваулин*. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2014. – С. 824–831.

**Иванов Василий Александрович**, старший преподаватель кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; ivanovva@susu.ru.

Поступила в редакцию 23 июля 2021 г.

## MICROMECHANICAL MODEL OF REPRESENTATIVE VOLUME OF POWDERS MATERIAL

V.A. Ivanov, [ivanovva@susu.ru](mailto:ivanovva@susu.ru)

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper presents the results of computer simulation and experiments in early stage densification of powder materials representative volume under one-axis compression and the results of powders one side pressing experiments. Representative volume model is 640 spherical particles two different diameter (2 mm – 427 pcs; 1.4 mm – 213 pcs) that are thrown by gravity into cubic box with rigid walls. Moving upper wall applies pressure to initial particle packaging. Computer simulations of representative volume were released by using a parallel package LS-DYNA. Experiments were carried out on an droptower impact systems Instron CEAST 9350 in a one-sided pressing mold with an inner diameter of 10 mm. For the experiment, we used powders based on GII-A TU 1916-109-071-2009 graphite, particles less than 315 microns, with the addition of SFP-011A phenol-formaldehyde resin and PMS-1 GOST 4960–2009 copper powder, particles less than 80 microns. Loadind velocity in computer simulation and experiments was 2 m/s. Developed computer model was demonstrated the high stability results for a random change of initial particle packaging. It makes possibility of modeling different loading schemes of representative volume with only one initial particle packaging. The influence internal and external friction on densification of representative volume was showed a qualitative agreement with the early known data. The model allows realizing a uniform stress state by exclude external friction. The computer model has a good qualitative agreement with the experimental data, and quantitative discrepancies are explained by pleasant assumptions and differences in the initial conditions. Presented micromechanical model of representative volume of powders material can be used in research mechanical behavior powders in early stage densification.

*Keywords:* powder materials, representative volume, multiparticle finite element method, LS-DYNA, densification, compression.

### References

1. Berent V.Ya. *Materialy i svoystva elektricheskikh kontaktov v ustroystvakh zheleznodorozhnogo transporta* [Materials and properties electrical contacts in devices of railways transport]. Moscow, Intertext Publ., 2005. 408 p.
2. Myshkin N.K., Kontshiz V.V., Braunovich M. *Elektricheskie kontakty* [Electircal contacts]. Dolgoprudniy, Publ. house “Intellect”, 2008. 560 p.
3. Gershman I.S. *Razrabotka iznosostoykikh materialov s pomoshch'yu metodov neravnovesnoy termodinamiki na primere skol'zyashchikh elektricheskikh kontaktov: dis. d-ra tekhn. nauk* [Development of wear-resistant materials using methods of nonequilibrium thermodynamics on the example of sliding electrical contacts. Doct. sci. diss.]. Moscow, FGUP “VNIIZHT”, 2006. 234 p.
4. Morvan A., Grosseau-Poussard J.-L., Caillaud N., Delange F., Roure S., Lepretre P., Silvain J.-F. Powder processing methodology for fabrication of Copper / Graphite composite materials with enhanced thermal properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 124, paper no. 105474, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105474
5. Fialkov A.S. *Protsessy i apparaty proizvodstva poroshkovykh uglegrafitovykh materialov* [Processes and apparatus for the production of powdered carbon-graphite materials]. Moscow, Aspekt Press Publ., 2008. 687 p.
6. Kostikov V.I., Samoylov V.M., Beylina N.Yu., Ostronov B.G. [New high-strength carbon materials for traditional technologies]. *Russian Journal of General Chemistry*, 2004, vol. XLVIII, no. 5, pp. 64–75. (in Russ.)
7. Selig S.G., Doman D.A. A review of finite element simulations of metal powder die compaction. *Journal of Machinery Manufacturing and Automation*, 2014, vol. 3 (2), pp. 32–40.
8. Orban Y.A., Manea D.L., Aciu C. Study of methods for simulating multiphase construction materials. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 22, pp. 256–261. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.03.039

9. Boltachev G.Sh., Volkov N.B. [Modeling the process of compaction of nanopowders in the framework of granular dynamics]. *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 81, no. 7, pp. 18–29. (in Russ.)
10. Mayer A.E., Ebel A.A., Al-Sandoqachi M.K.A. Plastic deformation at dynamic compaction of aluminum nanopowder: Molecular dynamics simulations and mechanical model. *International Journal of Plasticity*, 2020, vol. 124, pp. 22–41. DOI: 10.1016/j.ijplas.2019.08.005
11. Munjiza A.A. *The combined finite-discrete element method*. UK, London, John Wiley & Sons Ltd, 2004. 350 p. DOI: 10.1016/j.ijplas.2019.08.005
12. Procopio A.T. *On the compaction of granular media using a multi-particle finite element model. Tesis of papers PhD*. USA, Drexel, Drexel University, 2006. 172 p.
13. Gou D., An X. Zhao B. Yang R. CFD-DEM simulations of densification of tetrahedron particles under air impact. *Powder Technology*, 2020, vol. 361, pp. 220–225. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.08.085
14. Laptev A.M., Podlesniy S.V. [Calculation of the force characteristics of the compaction process of spherical powders]. *Poroshkovaya metallurgiya*, 1985, no. 12, pp. 11–17. (in Russ.)
15. Tsemenko V.N. *Deformirovaniye poroshkovykh sred* [Deformation of powder media]. St. Petersburg, SPbGTU Publ., 2001. 104 p.
16. Berezin I.M., Zalazinskiy A.G. [Determination of plastic flow conditions for non-compact materials]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2013, no. 8-1, pp. 19–20. (in Russ.)
17. Maksimenko L.A. [Modeling the strain hardening of porous and powder materials during pressing]. *Poroshkovaya metallurgiya*, 2014, no. 11–12, pp. 3–14. (in Russ.)
18. Kryuchkov D.I., Zalazinskiy A.G., Berezin I.M., Romanova O.V. [Modeling the processes of compaction of titanium composites from powdered raw materials]. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2015, no. 1, pp. 48–60. (in Russ.)
19. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. In 2 parts. Moscow, Nauka Publ., 1987.
20. Samoylov V.M. *Polucheniye tonkodispersnykh uglerodnykh napolniteley i razrabotka tekhnologii proizvodstva tonkozernistykh grafitov na ikh osnove: dis. d-ra tekhn. nauk* [Preparation of finely dispersed carbon fillers and development of technology for the production of fine-grained graphite based on them. Doct. sci. diss.]. Moscow, FGUP “NIIGRAFIT”, 2006. 371 p.
21. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. *Soprotivleniye plasticheskoy deformatsii metallov i spлавov: spravochnik* [Resistance to plastic deformation of metals and alloys: a reference book]. Second edition. Moscow, Metallurhiya, 1983. 352 p.
22. Dyagterev I.S., Kolmogorov V.L. [Power dissipation and kinematic relations on the surface of discontinuity of velocities in a compressible hard-plastic material]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1972, no. 5, pp. 167–173. (in Russ.)
23. Chernyavskiy A.O. *Prochnost' grafitovykh materialov i konstruktsiy pri malotsiklovom nagruzhении: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk* [Strength of graphite materials and structures under low-cycle loading. Abstract of doct. diss.]. Chelyabinsk, SUSU Publ., 1997. 27 p.
24. Ivanov V.A. Yarov B.A., Lepikhov A.V., Movchan K.G. [Degassing problems of powder filling during pressing in molds with rigid walls]. *Nauka SUSU. Sektsii tekhnicheskikh nauk: materialy 66 nauch. konf.* Chelyabinsk, SUSU Publ., 2014, pp. 824–831. (in Russ.)

Received 23 July 2021

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Иванов, В.А. Микромеханическая модель представительного объема порошковых материалов / В.А. Иванов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 67–81. DOI: 10.14529/met210308

#### FOR CITATION

Ivanov V.A. Micromechanical Model of Representative Volume of Powders Material. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 67–81. (in Russ.) DOI: 10.14529/met210308