

9. С.М.Алдошин. Успехи химии.-1990.-59.-С.1144-1178.
10. W. Clegg, N.C. Norman, J.G. Lasch, W.S. Kwak. Acta Cryst., C43 (1987) 804-806.
11. Л.М. Свездлов, М.А. Ковнер, Е.П. Крайнов. Колебательные спектры многоатомных молекул, Москва, Наука (1970).
12. Л.Л.Гладков, Ю.Д.Хамчуков, И.Ю.Сычѳв, А.В.Любимов // Журн.прикл.спект.- 2012.- Т.79.-№1.-С.37-44.
13. Futami Y., Chin M.L.S., Ludon S., Takaynagu M., Nakata M. // Chem.Phys.Lett.2003.V.370.-p.460.

## РАЗРАБОТКА ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ПОРОВОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ МОДЕЛИ ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОВЕРХНОСТНОМУ СЛОЮ ЗАСЫПКИ

**Савич В.В., Шелухина А.И., Пронкевич С.А., Горохов В.М.**  
 ГНУ «Институт порошковой металлургии», Минск, Беларусь,  
*e-mail: savich@pminstitute.by*

Возможность получения пористых порошковых материалов (ППМ) с анизотропной структурой в направлении прессования, имеющих повышенную проницаемость за счет такой структуры при сохранении среднего размера пор ППМ является актуальной задачей научных исследований. Так, от величины и распределения пористости по объему ППМ зависит эффективность применения материала для фильтрации жидких и газовых сред, диспергирования газов в жидкостях, гашения звуковых колебаний, для врастания тканей в хирургических имплантатах и т.п.

Существует множество моделей, описывающих процесс прессования порошков. Выделяют дискретно-контактный и континуальный подходы к моделированию. Дискретно-контактные модели описывают с помощью теории пластичности несжимаемого сплошного тела поведение относительно простых геометрических моделей частиц порошков. Перенос рассчитанных деформаций отдельных частиц на макрообъем прессовки производят из представлений об идентичности условий деформации отдельных частиц и засыпки в целом, принципов статистической механики и др. Развитием дискретно-контактных представлений занимались М.Ю.Бальшин, Г.Н.Жданович, И.Д.Радомысльский, Л.Д.Гольман, А.М.Лаптев, Н.В. Андреева и др.

В работах [1, 2] рассматриваются представительные элементы структуры порошкового материала в виде контактно-стержневой системы, состоящей из цилиндров, контактирующих своими основаниями, в первом случае и совокупности тетраэдров, образующих жестко-пластический каркас, во втором случае, их напряженно-деформированное состояние, а затем интерполируют полученные выражения на макрообъем прессовки. Такие модели дают точные результаты расчетов, но длительны, трудоемки, а потому используются ограниченно.

Континуальные модели описывают зависимость средней плотности прессуемого объекта от давления прессования. При этом макроскопические характеристики реального несплошного тела получают в результате осреднения локальных характеристик материала. Большой вклад в развитие континуальных моделей порошковых материалов внесли А.К. Григорьев, Р. Дж. Грин, В.Л. Колмогоров, Х.А. Кун, В.Н. Анциферов, В.Е. Перельман, В.В. Скороход, М.Б. Штерн, С. Шима, А.М. Лаптев, В.З. Мидуков, К.К. Мертенс, В.М. Горохов, Е.А. Дорошкевич и другие.

В настоящее время предпочтение отдается численным методам решения, так как они дают возможность пошагово проследить деформацию материала. Чаще всего используют методы конечных элементов, которые отличаются универсальностью, наглядностью и

широкими возможностями, например [3-5]. Модели позволят определять параметры напряженно-деформированного состояния в объеме порошка и упругом элементе, плотность и ее распределение по изделию, а также величину разнотолщинности получаемого изделия.

Известные модели не рассматривают поверхностный слой, а описывают поведения порошка в объеме, т.к. имеют цель описать режимы, обеспечивающие равномерность в объеме прессовки (по толщине, по длине и т.п.), или заданное распределение плотности, размеров пор. Поэтому целью данной и последующих наших работ является построение модели процесса уплотнения частиц порошка несферической формы на поверхности порошковой засыпки при осевом воздействии на частицы пуансоном. Такое моделирование можно провести в программном комплексе ANSYS, реализующем метод конечных элементов. При этом следует учитывать свойства несферического порошка (модуль упругости, коэффициент Пуассона материала частицы, пористость частицы) и давление формования. Но сначала необходимо построить представительный элемент поровой структуры прессуемого порошка – в нашем случае несферического порошка титана марки ТПП-5 с размером частиц в диапазоне 0,63 – 1,0 мм.

Для начала определим допущения, которые примем при построении представительного элемента и дальнейшего моделирования.

Как известно, процесс прессования состоит из нескольких этапов:

- 1) уплотнение засыпки за счет относительного перемещения частиц и уменьшения объема пор;
- 2) уплотнение засыпки за счет переупаковки и пластической деформацией частиц порошка;
- 3) уплотнение засыпки за счет объемной пластической деформации частиц.

Переупаковку частиц моделировать сложно, поэтому при построении модели мы делаем следующие допущения:

- 1) при приложении давления не происходит перемещение частиц (третий этап уплотнения порошкового тела);
- 2) среда обладает свойством макроскопической однородности.

Представительный элемент модели прессования порошкового тела представляет собой совокупность частиц, укладка которых образует регулярные структуры, вследствие чего макрообъем засыпки приобретает свойство макроскопической однородности. При одноосном сжатии представительного элемента происходит течение материала частиц в свободное пространство и увеличение площади контактной поверхности.

Определим форму частиц разрабатываемого представительного элемента.

Микрофотография несферических частиц порошка титана ТПП-5 фракции 0,63 – 1,0 мм, выполненная на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Тескан» (Чехия), представлена на рис. 1. В качестве частицы представительного элемента поровой структуры выбираем частицу с наиболее правильной формой. Выполним с помощью программы AutoCad 2013 расчет площади обводки реальной частицы и ее описанной окружности (рис. 2 а). Обводка частиц выполнялась инструментом «Полилиния». Аналогичные действия проведем для предполагаемой частицы представительного элемента и ее описанной окружности (рис. 2б). Фактор формы реальной и представительной частиц:

$$FF = \frac{S_1}{S_0}$$

где  $S_1$  – площадь реальной или представительной частицы;

$S_0$  – площадь соответствующей описанной окружности.

Результаты расчетов указанных площадей и факторов формы реальной и представительной частиц приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Площади и факторы формы реальной и представительной частиц.

Вид частицы	$S_1, \text{мм}^2$	$S_0, \text{мм}^2$	FF
Реальная	0,612	0,833	0,734
Представительная	0,621	0,848	0,732

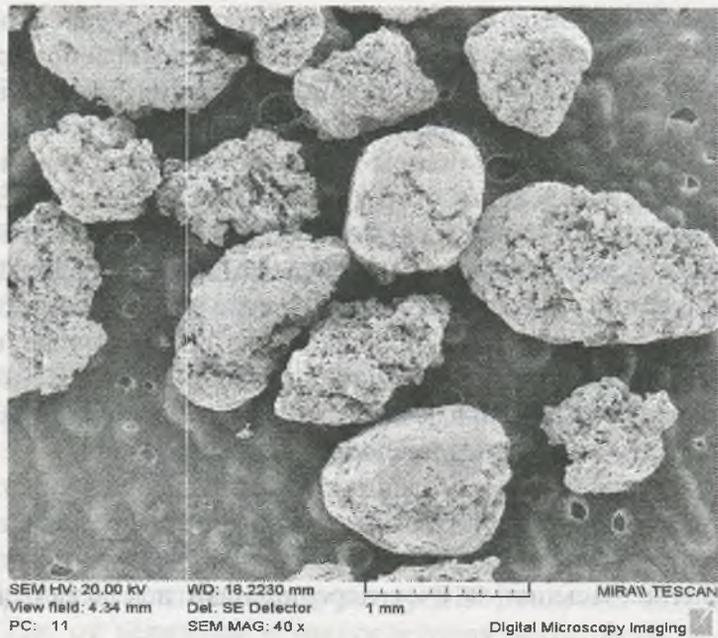


Рисунок 1 – Микрофотография частиц порошка титана ТПП-5.

Как видно, площади реальной и представительной частиц, а также их факторы формы приблизительно равны, поэтому принимаем такую форму частицы представительного элемента.

Теперь определим общую пористость засыпки в состоянии утряски, которую принимаем за начальное состояние засыпки при прессовании:

$$P_o = \left(1 - \frac{\rho_{\text{утр}}}{\rho_{\text{комп}}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{1400}{4500}\right) \cdot 100\% = 68,8\%,$$

где  $\rho_{\text{утр}}$  – плотность утряскинесферического порошка титана ТПП-5;  
 $\rho_{\text{комп}}$  – плотность компактного титана.

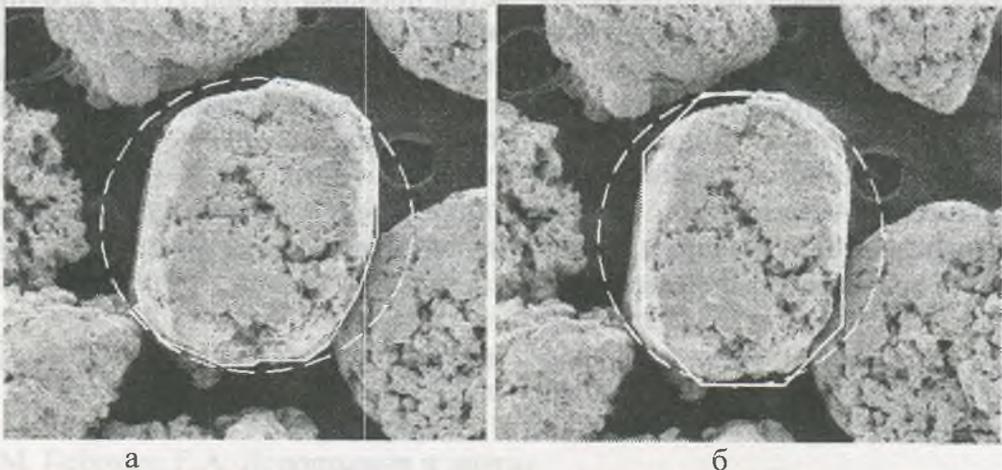


Рисунок 2 – Выбор геометрии частицы представительного элемента:  
 а – обводка и описанная окружность для реальной частицы;  
 б – частица представительного элемента и ее описанная окружность

Для построения представительного элемента поровой структуры, который отражал бы изменение пористости засыпки при приложении давления на втором и третьем этапе прессования, определим межчастичную пористость  $P_{\text{межч}}$  засыпки несферического порошка титана ТПП-5. Для этого нужно установить величину пористости частиц  $P_{\text{ч}}$  (открытую и закрытую). Для этой цели были выполнены шлифы частиц порошка титана ТПП-5, залитых эпоксидным компаундом. Исследование структуры частиц проводили на микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert» (Австрия) при увеличении  $\times 100$ . Фотографии шлифов частиц порошка приведены на рис. 3.

Для определения пористости частиц  $P_{\text{ч}}$  с помощью программы типа анализатора изображений ImageTool выполним следующие действия. Произведем обводку контура частиц в стандартной программе Paint и переведем полученный результат в монохромное изображение. Затем добавим на рисунок фон, отличный от цвета металла частиц (белый) и пор (черный) и сохраним изображение в формате \*.bmp. Полученные входные данные для анализатора изображений типа ImageTool показаны на рис. 4.

Программа анализатор изображений типа ImageTool была написана на языке программирования Ruby. Принцип ее действия заключается в подсчете количества пикселей одного цвета. Для более реальной оценки пористости частиц было обработано три фотографии частиц и определена средняя пористость частицы. Результаты работы приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Измерение пористости представительных частиц.

Образец, №	Черных пикселей	Всего пикселей	Пористость частицы $P_{\text{ч}}$ , %
1	6162	22403	23,5
2	5023	15175	29,1
3	7558	17550	38,1
Среднее	-	-	30,2

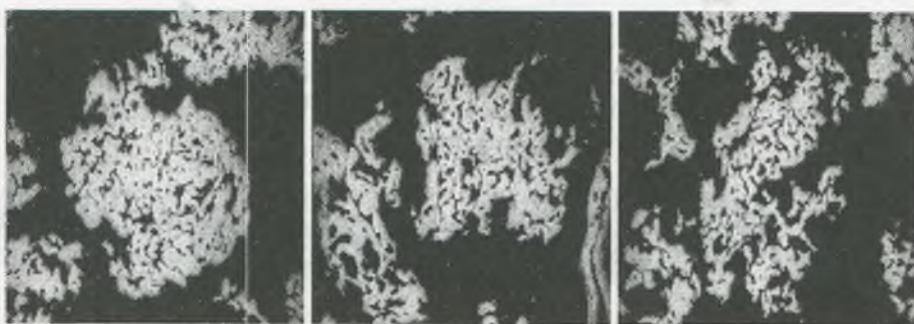


Рисунок 3 – Фотографии микрошлифов частиц порошка ТПП-5.

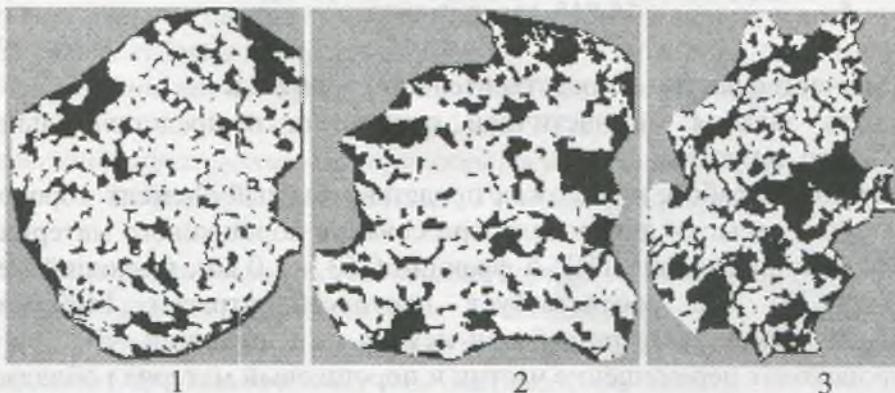


Рисунок 4 – Исходные данные для анализатора изображений типа ImageTool:  
1 – 3 – номер образца.

Теперь определим межчастичную пористость  $P_{\text{межч}}$  представительного элемента:

$$P_{\text{межч}} = P_D - P_z = 68,8 - 30,2 = 38,6 \%$$

Таким образом, представительный элемент должен состоять из частиц, показанных на рис. 2 б, и иметь межчастичную пористость  $P_{\text{межч}}$  около 38,6 %. Пример такой структуры показан на рис. 5.

Учитывая, что нас интересуют эффекты при прессовании на поверхности засыпки и затем - прессовки, то при создании представительного элемента мы ограничили количество слоев частиц тремя, так как этого достаточно для достижения поставленной цели. Ранее нами было показано, что поверхностные эффекты при прессовании порошкового тела стальным пуансоном и пуансоном, плакированным эластичной облицовкой, проявляются на глубину до 0,8–1,0 диаметра частиц [6].

Увеличение же количества частиц в представительном элементе приведет к неоправданному увеличению машинного времени при моделировании. Частицы разработанного представительного элемента имеют длину 1 мм и ширину 0,7 мм, т.е. относятся к фракции 0,63 – 1,0 мм.

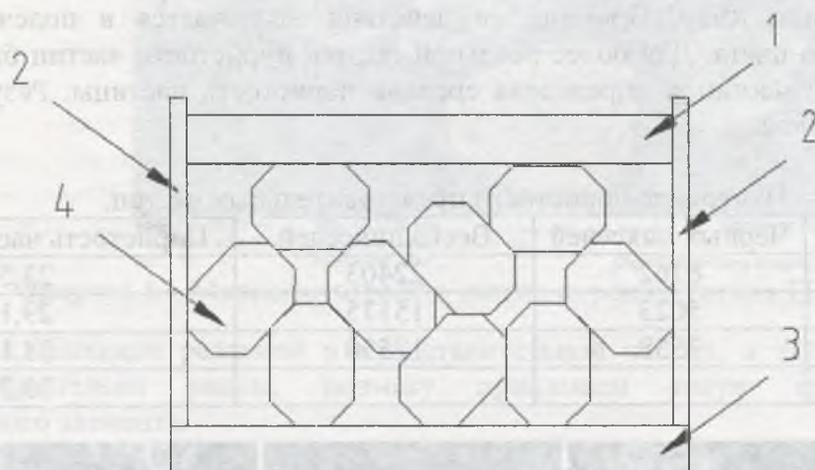


Рисунок 5 – Представительный элемент поровой структуры:  
1 – верхний пуансон; 2 – матрица; 3 – нижний пуансон;  
4 – частицы прессуемого порошка.

Площадь одной частицы  $S_1$  составляет  $0,621 \text{ мм}^2$ , площадь полости матрицы  $S_m$  –  $14,945 \text{ мм}^2$ . Межчастичная пористость  $P_{\text{межч}}^{\text{пз}}$  предложенного представительного элемента:

$$P_{\text{межч}}^{\text{пз}} = \frac{S_1 \cdot n}{S_m} \cdot 100\% = \frac{0,621 \cdot 9}{14,945} \cdot 100\% = 37,4 \%$$

где  $n$  – количество частиц в представительном элементе.

Погрешность задания межчастичной пористость в представительном элементе составила 3,1 %, что допустимо.

Таким образом, в работе предложен представительный элемент поровой структуры поверхностного слоя засыпки для модели прессования порошкового материала, а именно несферического порошка титана ТПП-5 фракции 0,63 – 1,0 мм, имеющий межчастичную пористость 37,4 %, что соответствует плотности утряски  $1400 \text{ кг/м}^3$ . Данный представительный элемент был разработан исходя из допущений, что при приложении давления не происходит перемещение частиц и порошковый материал обладает свойством макроскопической однородности.

В дальнейшем планируется провести моделирование процесса уплотнения частиц порошка несферической формы на поверхности порошкового материала при осевом воздействии на частицы пуансоном (стальным и плакированным эластичной облицовкой)

в программном комплексе ANSYS, реализующем метод конечных элементов. Модель будет учитывать свойства несферического порошка (модуль упругости, коэффициент Пуассона материала частицы, пористость частицы) и режимы формования (давление). Сравнение с ранее полученными экспериментальными данными будет производиться по характеристикам: пористость, величина пор.

### Список литературы

- 1 Радченко, В.П. Контактно-стержневая модель пластического деформирования порошковых материалов [Текст]/ В.П. Радченко, П.И. Краснощеков, А.Ф. Федотов // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 2004, выпуск 26. – 2004, с. 102 – 107.
- 2 Залазинский, А.Г. Модель пластически сжимаемого материала и ее применение к исследованию процесса прессования пористой заготовки [Текст]/ А.Г. Залазинский, А.П. Поляков // Прикладная механика и техническая физика/ Сибирское отделение РАН, Институт теоретической и прикладной механики СО РАН. - 2002. - №3. - с.140-151.
- 3 Даниленко, А.В. Эластостатическое прессование тонкостенных стаканов из порошковых материалов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05, 05.16.06/ Даниленко Антон Викторович. - Санкт-Петербург, 2001 – 129 с.
- 4 Нгуен, Т.Т. Технология радиального эластостатического прессования биметаллических трубчатых изделий [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.09/ НгуенТоанТханг. - Санкт-Петербург, 2010 – 209 с.
- 5 Смолий, Г. И. Эластостатическое прессование тонкостенных втулок из порошковых материалов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05/ Смолий Геннадий Иванович. - Санкт-Петербург, 2000 - 178.
- 6 Савич, В.В. Влияние твердости формирующего инструмента на приповерхностную пористость образца, полученного прессованием и спеканием губчатого порошка титана [Текст] / В.В. Савич, А.И. Шелухина // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка: материалы 8-ого Международного симпозиума (Минск, 10 – 12 апреля 2013 г.) - с. 320 - 325.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОНИЦАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ильющенко А.Ф.<sup>1,2</sup>, Кусин Р.А.<sup>3</sup>, Лецко А.И.<sup>1</sup>, Черняк И.Н.<sup>1</sup>, Жегздринь Д.И.<sup>1</sup>,  
Илюкевич А.И.<sup>1</sup>, Голяков М.В.<sup>1</sup>, Кусин А.Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии»,  
Минск, Республика Беларусь, 293-98-58, 237-32-04, e-mail nil23niipm@tut.by

<sup>2</sup> Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии,  
Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup> Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь

*Представлены результаты исследований порошковых проницаемых материалов на основе гранулированных механически активированных наноразмерных и ультрадисперсных порошков на основе оксидной керамики - ильменита, оксида алюминия и диоксида кремния, предназначенных для стерилизации жидких и газообразных сред в микробиологических производствах.*

**Цель работы** – разработка эффективных проницаемых материалов на основе гранулированных механически активированных керамических наноразмерных и ультрадисперсных порошков.