

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО СПЕКАНИЯ

¹Горанский Г.Г., ²Поболь А.И.

¹ Научно-технологический парк БНТУ "Политехник"

² Физико-технический институт НАН Беларуси

e-mail: georggoran@rambler.ru

Учет структурных изменений порошкового тела и вытекающие из этого изменения механических свойств производились в рамках многошагового моделирования в соответствии с блок-схемой (рис. 1).

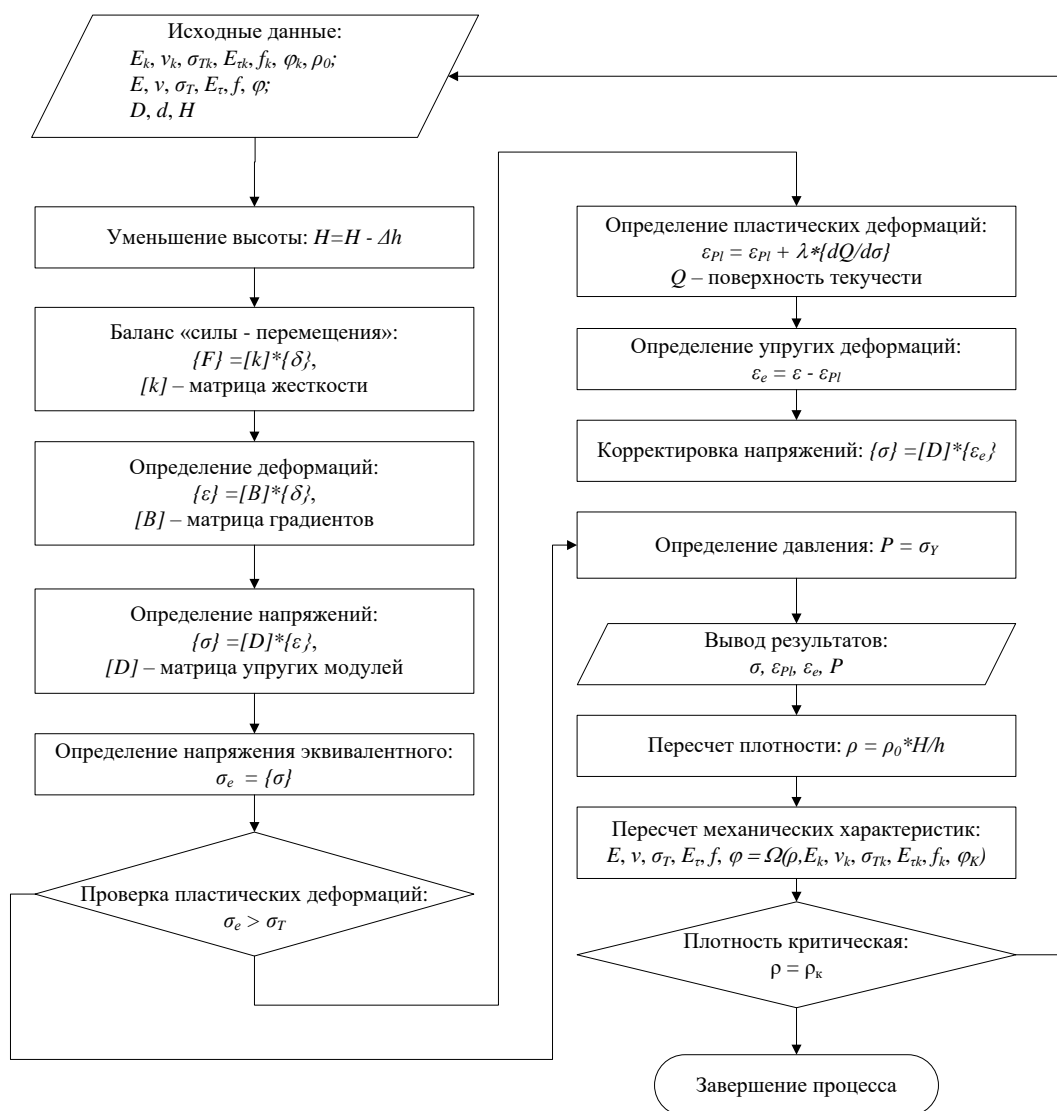


Рис. 1 Блок-схема адаптивного изменения механических свойств порошкового тела

Корректируемые свойства – модуль упругости E , предел текучести σ_T , коэффициент внутреннего трения f , удельное электрическое сопротивление γ . В качестве опорного параметра для корректировки механических свойств в зависимости от плотности выбрано относительное контактное сечение α_k , которое характеризует долю материала, оказывающего реальное сопротивление усилию прессования. Это безразмерная величина, численно равная

отношению суммарной проекции межчастичных контактов на плоскость, перпендикулярную направлению усилия прессования S_k , к номинальной площади прессовки S_n :

$$\alpha_k = S_k / S_n$$

Через характеристики пористости она определяется как

$$\alpha_k = \vartheta^2 \frac{\ln(\beta_0 \vartheta)}{\ln(\beta_0 \beta^\alpha)}$$

где β – относительный объем, β_0 – относительный начальный объем, ϑ – относительная плотность.

Показатель α зависит от формы образующей «приконтактной зоны» – области частицы, непосредственно прилегающей к контакту ее с другой частицей. Если поверхность в этом месте вогнутая, $\alpha > 1$, если выпуклая – $\alpha < 1$. Характер изменения α_k близок к параболической зависимости. Для управления кривизной этой зависимости относительное контактное сечение можно дополнить степенной функцией. Таким образом, для определения механических свойств сыпучего материала в зависимости от плотности, принимается выражение следующего вида:

$$M_\vartheta = \alpha_k(\vartheta)^c M$$

где M – значение свойства материала в компактном состоянии, M_ϑ – значение того же свойства того же материала, но в сыпучем состоянии при относительной плотности ϑ , c – показатель степени, регулирующий кривизну кривой прессуемости.

С учетом относительного контактного сечения может быть рассчитаны напряжения в приконтактных зонах:

$$\sigma_k = \frac{\lambda(\vartheta)\sigma_{II}}{1 - B\lambda(\vartheta)\alpha_k}$$

где $\lambda(\vartheta)$ и B – коэффициенты (агрегированные), учитывающие компоненты напряжений, обусловленные действием комбинированной контактной нагрузки, а также дополнительные напряжения:

$$\lambda(\vartheta) = 1 + \operatorname{arctg} \frac{(1 + \alpha)\ln(\beta)}{\ln(\beta_0 \vartheta)}, \quad B = 1 - \frac{f_k}{f_0}$$

После этого определяется давление прессования:

$$p = (1 + f_i \operatorname{tg} \varphi) \sigma_k \alpha_k$$

где f_i – коэффициент внутреннего межчастичного трения, φ – угол нормального взаимодействия частиц.

Таким образом может быть получено основное уравнение прессования, связывающее давление и плотность среды.

Удельное электрическое сопротивление R_{cp} корректируется как

$$R = \frac{R_m}{n_k}, \quad n_k = K_x \left\{ 1 - \left[\frac{1}{\rho_x} \left(\frac{K_x - 1}{K_x} \right)^{2/3} \right]^{2/3} \right\}, \quad K_x = \frac{(0,804 - 1,07 \sin^2 \varphi)}{1 + \frac{d_1}{d_2} - \sqrt{\frac{d_1}{d_2} \left(\frac{d_1}{d_2} + 2 \right)}}$$

где R_m – сопротивление компактного материала, n_k – коэффициент уплотнения, K_x – коррекционное число, определяемое средним количеством контактов каждой частицы с окружающими, d_1 и d_2 – диаметры частиц, φ – угол трения.

Внутреннее трение обусловлено контактным взаимодействием частиц и определяется соотношением его составляющих – касательной F , и нормальной P :

$$f_i = \frac{F_{ki}}{P_{ki}}, \quad f_i = f_0(1 - B\lambda(\vartheta)\alpha_k)$$

Тепло Джоуля-Ленца, выделяющееся в каждом отдельном элементе при протекании через дисперсную среду электрического тока, определяется формулой:

$$Q_e^J = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\rho] \cdot \{J_{ti}\} \cdot \{J_{ti}\}$$

где n - количество точек интегрирования, $\{J_{ti}\}$ - плотность тока в точках интегрирования, $[\rho]$ - матрица сопротивлений.

Теплообмен на поверхности отдельного элемента описывается выражением:

$$\{Q_e^c\} = \int_S T_B h_f \{N\} ds$$

где T_B - окружающая температура, $\{N\}$ - «функция формы» элемента, интерполирующая обобщенные перемещения узлов элемента на его внутренние области, h_f - коэффициент поверхностного теплообмена, зависящий от температуры порошка (таблица 1).

Таблица 1 – Коэффициент теплообмена порошка на границе с пуансон- электродом при разных температурах

Температура, К	300	500	700	900	1100	1300	1500
Коэффициент h_f , Дж/(м ² с)	929	1193	1397	1597	1791	1982	2176

Тестовый объект моделирования – цилиндрическая втулка (рис. 2 а), формируемая двусторонним сжатием в матрице с центральным стержнем (рис. б, в). Модель параметрическая – высота H , внешний и внутренний диаметры D и d , а также число слоев прессовки (рис. г) задаются на начальной стадии моделирования.

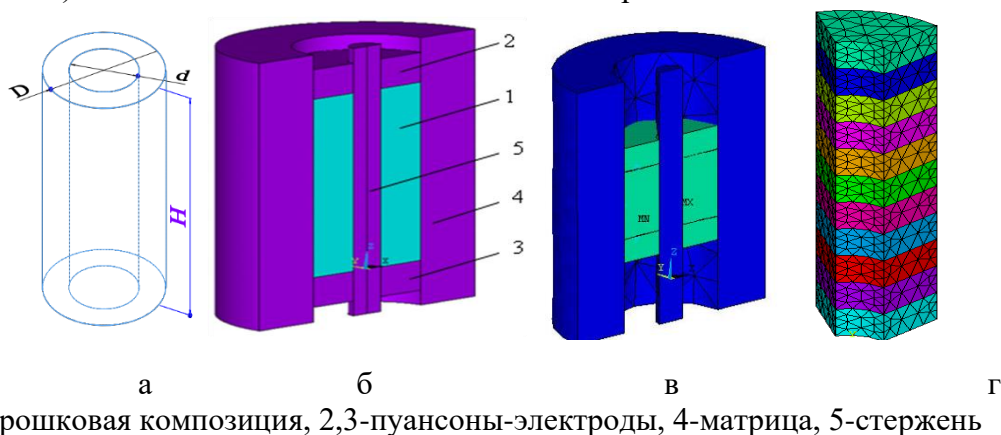


Рис. 2. Тестовый объект (а), структура модели в исходном (б) и терминальном (в) состояниях, многослойная модель дисперсного тела (г)

Моделируемый процесс квазистатический, временной фактор в рамках вычислений не учитывался. Значение имеет плавность перехода из начального состояния в конечное: это плавность изменения свойств и упрощение вычисления баланса нагрузок и перемещений – чем меньше разница между состояниями, тем проще найти баланс при переходе из одного состояния в другое.

Для снижения вычислительных ресурсов при построении модели предпринят ряд упрощений (рис.3). Вместо полноразмерного цилиндра в расчетах используется только сектор и только верхняя половина (рис. 3а). Для узлов на боковых плоскостях сектора определено условие «симметричность» (рис. 3б). Таким образом обеспечивается целостность модели. Матрица и центральный стержень представлены поверхностными (из элементов типа «shell») моделями стенок (рис. 3в). Для узлов этих моделей ограничены все степени свободы, что делает их полностью недеформируемыми. Пуансоны, как таковые, в модели отсутствуют. Вместо них – соответствующие граничные условия (рис. 3г). Узлам верхней грани сообщается перемещение, либо к ним прикладывается давление. К ним также прикладывается электрический потенциал. Для «нижних» узлов определено граничное условие «симметричность». Их электрический потенциал полагается равным «0». Для модели возможно использование элементов типа Solid227 (тетраэдр) и Solid226 (гексаэдр).

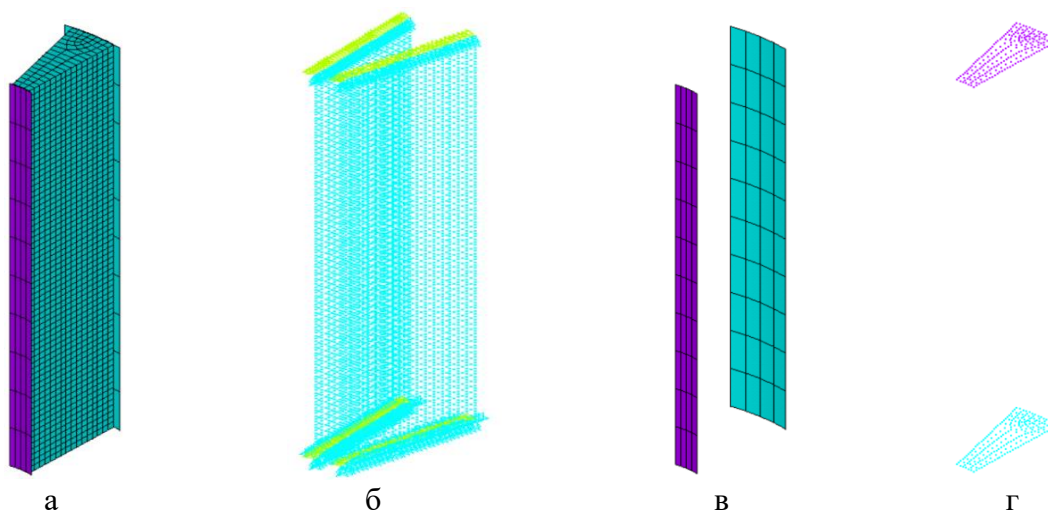


Рис. 3 .Конечно-элементная модель и граничные условия

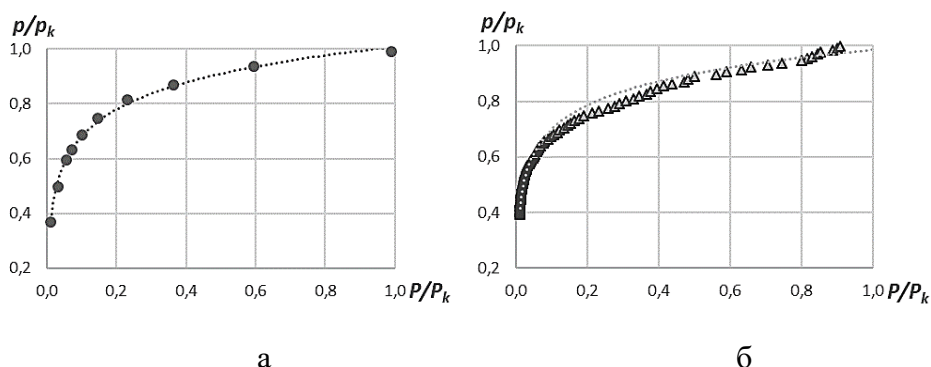


Рис. 4. Кривая прессуемости: а - экспериментальная, б - по результатам вычислений

Комплексную оценку адекватности модели предоставляет кривая прессуемости. Зависимость для расчетной модели близка к экспериментальной (рис. 4), что свидетельствует, что аналитическая модель уплотнения дисперсного материала претендует на сходимость с результатами реального процесса электроконтактного спекания.