

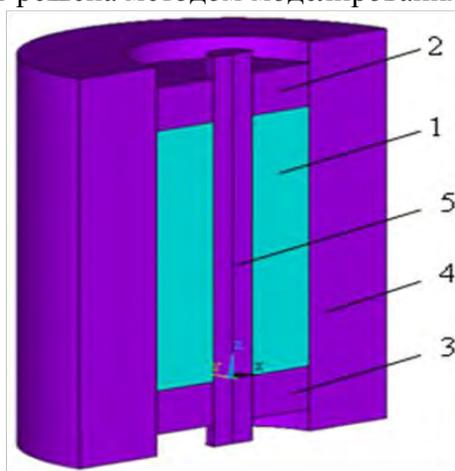
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОМПАКТИРУЕМОЙ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ

¹Горанаский Г.Г., к.т.н. ²Кункевич Д.П., ²Поболь А.И.

¹Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», Минск

²Белорусский национальный технический университет, Минск

Объект исследования в рамках представленной работы - порошковая композиция на основе твердых сплавов. Порошковый материал (рисунок 1) заполняет внутреннюю полость матрицы 4 и компактируется - сдавливается пуансонами 2 и 3. Стержень 5 обеспечивает формирование продольного цилиндрического отверстия. В процессе компактирования через композицию пропускается электрический ток, благодаря чему в ней наряду с механическими процессами происходят электротермические явления. В результате среда уплотняется и затем консолидируется. Задача заключается в разработке модели, позволяющей рассчитывать такие параметры, как плотность, пористость, параметры напряженно-деформированного состояния прессовки. Среди них особо важны упругие деформации: после снятия нагрузки и извлечения прессовки из матрицы релаксационные процессы и снятие остаточных напряжений могут привести к разрушению полученных изделий. Прогнозирование этих напряжений – важная технологическая задача - может быть решена методом моделирования.



1 – порошковая композиция, 2, 3 – пуансоны-электроды, 4 – матрица, 5 – стержень

Рис. 1. Структура модели

Эффективным средством решения подобных задач является метод конечных элементов. Основные вопросы при этом связаны с представлением компактируемого порошка – геометрической моделью и моделью материала. Специфической особенностью порошковых материалов является двойственность их физических свойств. С одной стороны – это сыпучая среда, с другой – монолитные частицы. Деформация порошка в целом обусловлена как уплотнением среды, так и деформациями отдельных частиц, упругими и пластическими. Испытывающие давление частицы на начальных стадиях компактирования взаимодействуют друг с другом упруго. Затем происходит перемещение частиц и, как следствие, уплотнение насыпки. Когда это уплотнение достигает определенной величины, происходят пластические деформации частиц.

Адекватным было бы представление сыпучей среды в виде совокупности моделей отдельных частиц. Геометрическая модель отдельной частицы может быть построена исходя из среднестатистических формы и размеров, свойства материала назначены со-

ответственно обычным свойствам материала частиц. Объем, матрицы заполняется этими «частичными» моделями, между ними задаются контактные взаимодействия.

Подобная модель очень трудоемка в построении и потребует большое количество вычислительных ресурсов для расчета. И если построение, в принципе, можно автоматизировать, то объем вычислений едва ли можно уменьшить. В общем, прибегать к столь высокой степени детализации можно при наличии высокопроизводительной вычислительной техники и веских оснований для ее использования.

Альтернативный вариант моделирования – гомогенная структура, механические свойства которой эквивалентны свойствам сыпучей среды. Другими словами, сыпучий материал, помещенный в матрицу, рассматривается как единый объект – **порошковое тело**[1].

С точки зрения геометрии задача проста. Трудности возникают с моделью материала. Дело в том, что по мере уплотнения сыпучей среды ее механические свойства изменяются: в начале процесса она податлива, а в конце становится подобной компактному материалу. Для универсальных систем инженерного анализа переопределение свойств материала в процессе расчета не является обычной практикой. Поэтому для решения поставленных задач необходима **специальная технология моделирования**.

В качестве основания для подобной технологии можно предложить адаптивное изменение механических свойств сыпучей среды в зависимости от достигнутой плотности. Блок-схема алгоритма такого изменения представлена на рисунке 2.

Основные свойства, характеризующие модель материала, – это плотность, ρ , удельное электрическое сопротивление, R , коэффициент пропорциональности между нагрузкой и деформациями, Y , и предельное напряжение, после которого наступают необратимые деформации, σ . Последние два свойства – аналоги модуля упругости и предела текучести компактного материала. По крайней мере, именно в этих качествах они используются для численного моделирования процесса прессования: первый – для определения баланса «нагрузка - перемещения», второй – для выделения пластических деформаций. В исходном состоянии отмеченные выше характеристики материала принимают, так называемые, «насыпные» значения, в конечном состоянии – значения компактного материала.

В качестве определяющего параметра, инициирующего компактирование порошкового материала, в данной работе принято давление. К верхней и нижней поверхностям контакта порошка и пуансонов прикладывается давление, $P = P_0$, после чего выполняется расчет. Далее проверяются перемещения этих контактных поверхностей: если они не произошли – давление наращивается и данный этап повторяется снова. По мнению авторов, именно такой подход повышает степень адекватности модели.

Если приложенное давление сместило контактные поверхности, изменив тем самым высоту прессовки, происходит корректировка механических свойств порошка. Плотность изменяется обратно пропорционально высоте прессовки. Далее, в зависимости от плотности, меняются все остальные свойства.

Если плотность прессовки не достигла плотности компактного материала, давление увеличивается и цикл повторяется снова.

Начальное значение удельного электрического сопротивления, R_{cp} , было определено экспериментально. Далее оно корректировалось согласно методике [2]:

$$R = \frac{R_m}{n_k},$$

где R_m – сопротивление компактного материала, а n_k – коэффициент уплотнения.

$$n_k = K_x \left\{ 1 - \left[\frac{1}{\rho_x} \left(\frac{K_x - 1}{K_x} \right)^{2/3} \right]^{2/3} \right\},$$

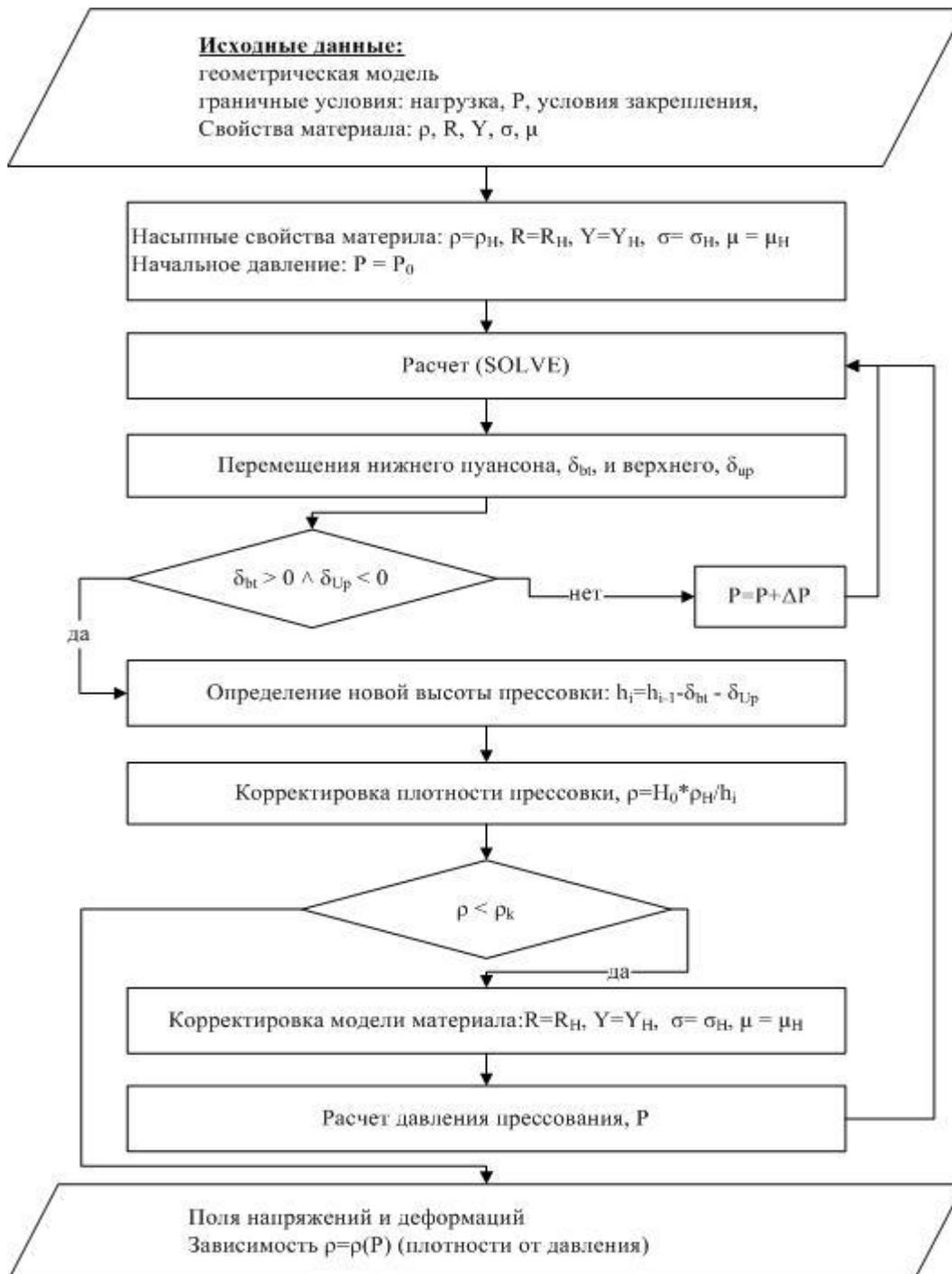


Рис. 2. Блок схема адаптивного изменения механических свойств порошкового тела

где $\rho_x = \frac{\rho_c}{\rho_m}$ - относительная плотность, равная отношению плотности сыпучей среды к плотности компактного материала, K_x - коррекционное число, определяемое средним количеством контактов каждой частицы с окружающими:

$$K_x = \frac{(0,804 - 1,07 \sin^2 \varphi)}{1 + \frac{d_1}{d_2} - \sqrt{\frac{d_1}{d_2} \left(\frac{d_1}{d_2} + 2 \right)}}$$

где d_1 и d_2 - диаметры частиц, а φ - угол трения.

Модуль упругости и коэффициент поперечной деформации в данной работе пересчитывались по методам, предложенным профессором Г.М. Ждановичем [1].

Модуль упругости порошкового тела определяется следующим образом:

$$\sigma = \sigma_K \mathcal{G}^m,$$

где \mathcal{G} - относительная плотность порошка, равная отношению текущей плотности, ρ , к плотности предельной, ρ_K , соответствующей завершению процесса компактирования:

$$\mathcal{G} = \frac{\rho}{\rho_K};$$

σ_K - предельное значение модуля упругости при $\mathcal{G} = 1$, m - показатель, также зависящий от относительной плотности, от коэффициентов поперечной деформации и бокового давления:

$$m = \frac{2 \ln \frac{1 - \varphi(\mathcal{G}_c) \sigma_K}{2 \varphi(\mathcal{G}_c) p_c}}{\ln \beta_0};$$

где $\varphi(\mathcal{G}_c)$ - функция, определяющая среднестатистический угол межчастичного взаимодействия в зависимости от относительной плотности среднегеометрической, β_0 - относительный объем, определяемый аналогично относительной плотности, p_c - величина давления, соответствующая среднегеометрической плотности \mathcal{G}_c .

Зависимости, приведенные выше, отличаются многоуровневой иерархией, полное раскрытие которой значительно усложняет восприятие материала. Поэтому вместо дальнейшей детализации формул приводится график зависимости модуля упругости от плотности (рисунок 3).

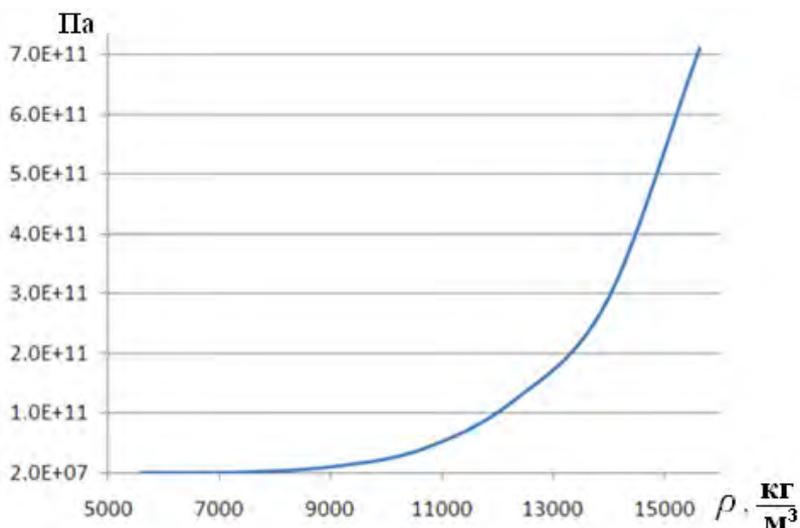


Рис. 3. Зависимость сопротивляемости порошкового тела прессованию от его плотности
Коэффициент поперечной деформации:

$$\mu = \frac{\xi}{\varphi_{u0} + \xi},$$

где ξ - коэффициент бокового давления, φ_{u0} - величина отношения коэффициента бокового давления несвязанного порошкового тела к аналогичному коэффициенту тела, обладающего свойством связанности, которое при помощи механического силового контактного взаимодействия частиц порошка зацеплением и сцеплением способно обеспечить отсутствие бокового давления на стенки матрицы.

Коэффициент бокового давления, ξ , определяется в зависимости от среднестатистического угла нормального взаимодействия частиц, φ , и коэффициента межчастичного трения, f_i :

$$\xi = \frac{\operatorname{tg} \varphi - f_i}{1 + f_i \operatorname{tg} \varphi}.$$

Коэффициент межчастичного трения представляет собой коэффициент пропорциональности между нормальными, P_k , и тангенциальными, F_k , силами на площадках контакта между частицами:

$$F_k = f_i P_k.$$

По мере уплотнения порошка условия контакта изменяются, что отражается на значениях коэффициента:

$$f_i = f_0 (1 - B \lambda(\vartheta) \alpha_k).$$

где f_0 – начальное значение коэффициента, α_k – безразмерная величина относительного контактного сечения, равная отношению суммарной проекции контактов частиц в некотором слое к номинальному сечению этого слоя, B и $\lambda(\vartheta)$ – показатели, характеризующие прессуемый порошок, первый из которых, B , можно принять постоянным, а второй, $\lambda(\vartheta)$, изменяется в зависимости от объемных параметров тела. Начальное значение коэффициента, f_0 , может быть определено по углу естественного откоса порошковой насыпки.

В качестве базового средства для выполнения расчетов была выбрана система конечно-элементного анализа ANSYS. Расчетные модели, как и процесс выполнения расчетов описываются при помощи языка APDL (ANSYS Parametric Design Language). При помощи данного средства была реализована блок-схема, приведенная на рисунке 2.

Верификация расчетной модели выполнялась по кривой прессуемости – одной из основных характеристик сыпучего материала, – выражающей зависимость плотности порошкового тела от оказываемого на него давления. Изображается эта кривая, как

правило, не в абсолютных единицах – давлении [МПа] и плотности $[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}]$, а в относительных – $\frac{P}{P_k}$ и $\frac{\rho}{\rho_k}$ соответственно, где индексом k обозначено значение свойства

компактного материала. График кривой, построенной по результатам вычислительного эксперимента, приведен на рисунке 4а.

На рисунках 4б и 4в показаны кинетики давления прессования и температуры соответственно. «Ломаность» графиков обусловлена несовершенством механизма наращивания давления прессования. В реальных условиях плотность порошкового тела меняется непрерывно. Также непрерывно изменяются механические свойства и прикладываемое давление. Численное же моделирование выполняется дискретно. После каждого изменения механических свойств материала нагрузку также необходимо изменять, чтобы она соответствовала обновленной жесткости. Так в рамках представленной работы давление прессования определялось следующим образом:

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

Вопросы, связанные с расчетом отдельных шагов, выбор типа элементов, принципы моделирования электротермических процессов и др. были отработаны ранее и прошли практическую апробацию [3].

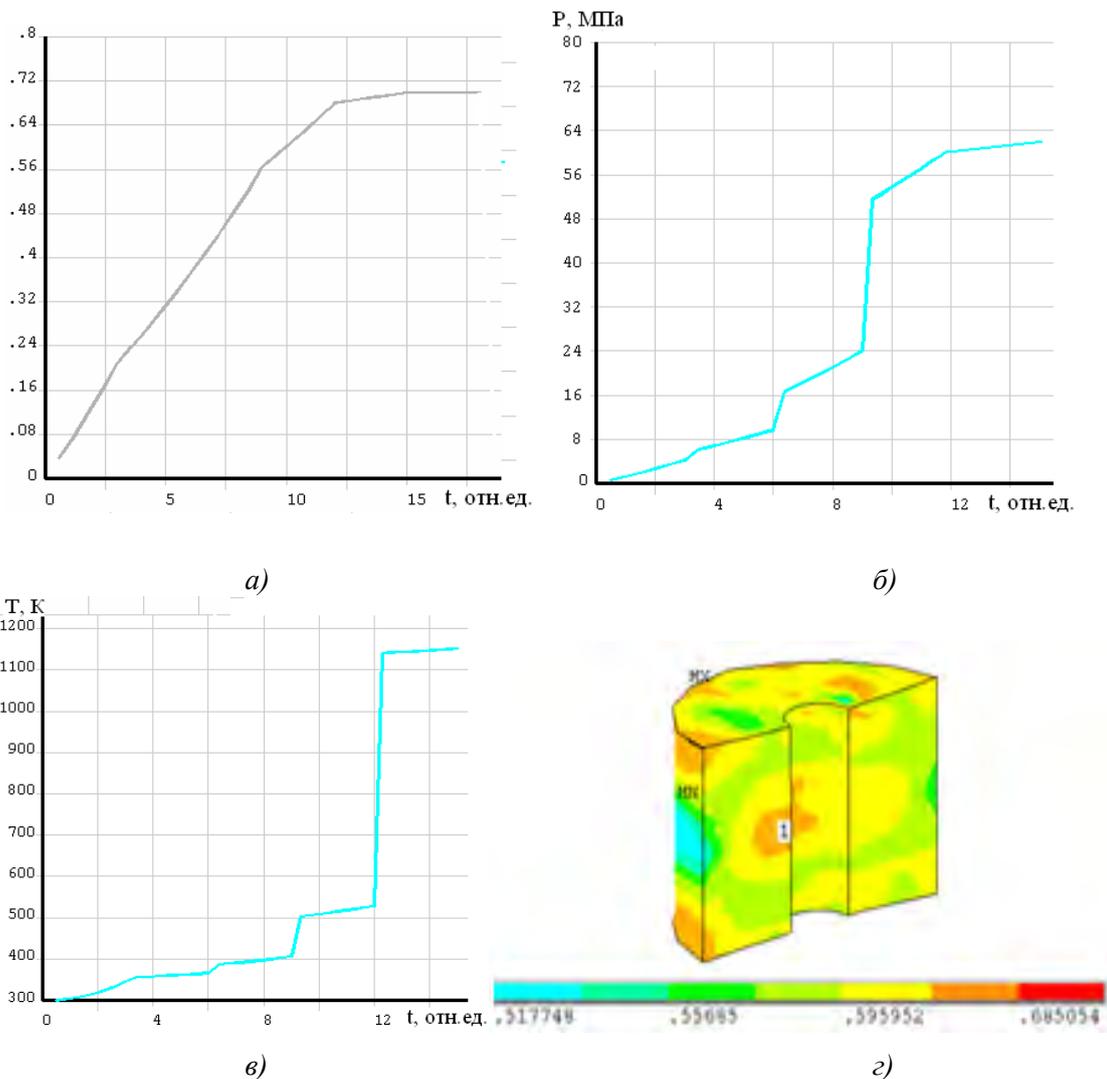


Рис. 4. Результаты численного моделирования

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданович, Г.М. *Механика порошковых материалов*/ Г.М. Жданович. – Минск: БНТУ, 2013. – 420с.
2. Стоянов, А.А. *Исследование электропроводности пористых материалов* / А.А.Стоянов // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. – 2012. – № 4. – С.164 – 169.
3. Жорник В.И. *Импульсное электроконтактное спекание твердосплавных порошковых композиций* // Жорник В.И., Горанский Г.Г., Полуян А.И., Кункевич Д.П., Поболь А.И. // *Актуальные вопросы машиноведения. Сборник научных трудов. Выпуск 3*. Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2014, с. 365-370

E-mail: georggoran@rambler.ru
kunkevich@bntu.by
alex.pobol@gmail.com

Поступила в редакцию 09.10.2016