

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ И МОДЕЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ РАВНОМЕРНОПЛОТНОГО ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Э.С. Двилис, П. Чартпук, О.Л. Хасанов, В.М. Соколов, Б.А. Ешетов

Томский политехнический университет

E-mail: khasanov@tpu.ru

Приведено сравнительное модельное и аналитическое описание спирального варианта реализации разработанного и запатентованного в ТПУ коллекторного способа прессования порошковых материалов. Принцип коллекторного способа основан на автовывравнивании плотности по всему объёму прессовки разнонаправленным перемещением формообразующих поверхностей пресс-формы. В рамках этого принципа была предложена кинематическая схема уплотнения цилиндрических прессовок в коллекторной пресс-форме со спиральными ползунами, скрученными вокруг оси прессования под некоторым оптимальным углом. Предложен аналитический аппарат для первичной аналитической оценки эффективности схем прессования. Процесс уплотнения порошков различными способами моделировали методом конечных элементов. Результаты сравнительного моделирования показали, что статистический разброс локальных значений деформации в компактах, изготовленных коллекторным методом с ползунами спирального типа, снижается до 48 % по сравнению с обычным статическим уплотнением и на 5 % по сравнению с исходным вариантом коллекторного метода. Таким образом, коллекторный метод с ползунами спирального типа позволяет дополнительно уменьшить градиенты плотности и может быть использован для изготовления керамических изделий из нанопорошков, характеризующихся при их уплотнении в закрытых жёстких пресс-формах выраженными негативными эффектами пристенного трения.

### Ключевые слова:

Нанопорошки, сухое прессование, коллекторная пресс-форма, равномерное распределение плотности.

### Key words:

Nanopowder, dry compaction, collector die, uniform density distribution.

Разнообразие различных подходов и методов уплотнения керамических порошков, в том числе нанопорошков [1–4], обусловлено специфическими особенностями их поведения при уплотнении. Основным фактором, влияющим на качество компактов, получаемых любым из «сухих» (без применения пластификаторов) способов, является пристенное трение, степень негативного влияния которого возрастает с уменьшением размеров частиц порошка. Наиболее изученным к настоящему времени является метод сухого холодного одноосного одностороннего прессования порошковых материалов в закрытых жёстких пресс-формах. Уплотнение при реализации этого метода осуществляется путем передачи усилия прессования через активные формообразующие поверхности пуансонов, встречно перемещающихся относительно пассивной формообразующей поверхности матрицы. При этом из-за потерь усилия прессования на преодоление сил пристенного трения возникает существенный градиент плотности прессовки по её высоте.

Указанного недостатка лишён коллекторный метод прессования [5], обеспечивающий автовывравнивание плотности по всему объёму прессовки любой высоты. Отличительной особенностью коллекторного метода прессования порошков является то, что матрица пресс-формы состоит из двух разнонаправленных групп идентичных ползунов, каждая из которых в процессе прессования синхронно перемещается вместе с одним из пуансонов-плунжеров.

В настоящей работе рассмотрен усовершенствованный вариант коллекторного способа, при кото-

ром формообразующим ползунам придана форма спирали. Такое кинематическое решение обеспечивает дополнительную компоненту перемещения формообразующих поверхностей, не совпадающую с осью прессования, и, предположительно, позволяет повысить равномерность распределения плотности по объёму порошкового тела.

Однако любое конструктивное усовершенствование схем прессования и оптимизация геометрических размеров пресс-форм сопряжены с дорогостоящими натурными испытаниями. В этой связи актуальна разработка аналитического аппарата, который позволил бы проводить первичную оценку результатов того или иного конструктивного решения на конечные характеристики прессуемого в заданных условиях изделия.

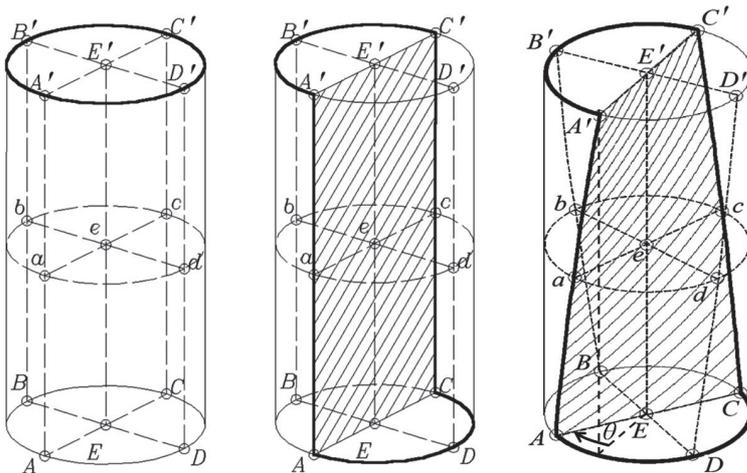
### Аналитическое сопоставление схем прессования

Схемы прессования цилиндрического тела, которое уплотняется обычным односторонним способом (а), коллекторным способом (б) и его спиральным вариантом (в), реализуемым с помощью пресс-формы, названной «коллекторная пресс-форма спирального типа», представлены на рис. 1.

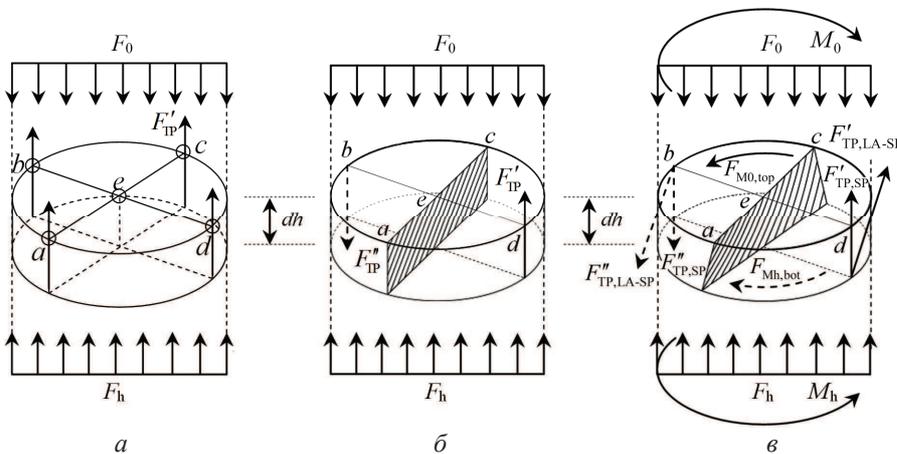
На рис. 2 представлена схема баланса сил, действующих на поверхности цилиндрической прессовки, уплотняемой различными способами прессования.

#### 1. Случай традиционного способа прессования

Из теории прессования порошковых материалов в закрытых жёстких пресс-формах известно [6], что за счёт пристенного трения перепады плотности по высоте прессовки в её центральной части



**Рис. 1.** Схемы уплотнения цилиндрического порошкового тела: а) способом статического одноосного одностороннего прессования; б) коллекторным способом; в) спиральным вариантом его реализации (жирными линиями обозначены границы подвижного сочленения формообразующих поверхностей)



**Рис. 2.** Баланс сил в тонком слое цилиндрической прессовки: а) схема одноосного прессования; б) схема прямого коллекторного прессования; в) схема спирального коллекторного прессования

(рис. 1, а) вдоль оси  $[EeE']$  всегда меньше, чем у стенок (вдоль линии  $[AaA']$ ), а величина средней плотности вдоль любой её вертикали одинакова в любой момент прессования [7].

В 1895 г. Х.А. Янсен, анализируя баланс сил в бесконечно малом выделенном элементе порошкового тела, получил простое уравнение для определения давления на дне цилиндрического бункера с сыпучим материалом [8, 9]. Позднее Г.И. Покровский использовал данный подход для вывода уравнения в приемлемой для описания процессов, проходящих при уплотнении порошков, форме [10–15]. При переходе к величинам давления, которые в цилиндрических прессовках постоянного гидравлического сечения пропорциональны величинам действующих усилий, уравнение для потери давления прессования за счёт пристенного трения можно представить в следующей форме.

$$P_h = P_0 \cdot \exp\left(-2 \cdot \xi \cdot f \cdot \frac{h}{R}\right), \quad (1)$$

где  $P_h$  – давление на высоте  $h$  от прессующего пуансона;  $P_0$  – давление прессования непосредственно у прессующего пуансона;  $\xi$  – коэффициент бокового давления (коэффициент гидростатичности порошкового тела);  $f$  – коэффициент пристенного трения;  $R$  – гидравлический радиус прессовки. В общей форме для прессовок любого постоянного по высоте сечения без переходов по высоте с площадью боковой поверхности  $S_6$  и гидравлической площадью  $S_0$ :

$$P_h = P_0 \cdot \exp\left(-\xi \cdot f \cdot \frac{S_6}{S_0}\right). \quad (2)$$

Для оценки перепада относительной плотности по высоте прессовки воспользуемся выражением (2) и безразмерным уравнением прессования логарифмического вида [16], выражающим зависимость относительной плотности  $\rho$  порошкового тела от давления прессования.

$$\rho = b \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P_{кр}}\right) + 1. \quad (3)$$

где  $P_{кр}$  – критическое давление, при котором достигается теоретическая плотность порошкового тела;  $b$  – постоянный для данных условий прессования и данного порошкового материала коэффициент, отражающий интенсивность его уплотнения.

Из совместного рассмотрения (2) и (3) можно вывести выражение для перепада относительной плотности по высоте порошкового тела заданной геометрии.

$$\begin{aligned} \Delta\rho &= \rho_0 - \rho_h = b \cdot (\ln P_0 - \ln P_h) = \\ &= b \cdot \ln \frac{P_0}{P_h} = 2 \cdot b \cdot \xi \cdot f \cdot \frac{h}{R}. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, перепад относительной плотности по высоте прессовки постоянного сечения, компактируемой традиционным способом одноосного одностороннего прессования в закрытых жёстких пресс-формах, может быть минимизирован совместным уменьшением коэффициентов пристенного трения и бокового давления.

## 2. Случай прямого коллекторного прессования

Для коллекторной схемы прессования (рис. 1, б, рис. 2, б) уплотнение порошка и пристенное трение близки к нулю вдоль дуги  $[ABC]$ , а вдоль дуги  $[ADC]$  они максимальны. Обратная картина наблюдается в окрестности точек  $A'$  и  $C'$  (рис. 1, б): величины уплотнения и пристенного трения достигают максимальных значений вдоль дуги  $[A'B'C']$ , и отсутствуют вдоль дуги  $[A'D'C']$ . Таким образом, в любой точке порошкового тела, прилегающей к рассматриваемым линиям  $[A'A]$  и  $[C'C]$ , величины смещения, сил пристенного трения (с учётом знака) и степени уплотнения будут равны среднему значению между соответствующими величинами по разные стороны от линий сопряжения. Следовательно, степень уплотнения порошка в области, расположенной вдоль линии сопряжения частей пассивной формообразующей поверхности  $[A'A]$  и  $[C'C]$ , будет одинакова. Из теории прессования порошковых материалов в закрытых пресс-формах известно [7], что за счёт пристенного трения перепады плотности  $\Delta\rho$  по высоте прессовки в её центральной части вдоль оси  $[EeE']$  всегда меньше, чем у стенок (вдоль линии  $[AaA']$ ), а величина средней плотности  $\langle\rho\rangle$  вдоль любой её вертикали одинакова в любой момент прессования:

$$\Delta\rho_{[AaA']} \geq \Delta\rho_{[EeE']}, \quad (5)$$

$$\langle\rho\rangle_{[AaA']} = \langle\rho\rangle_{[EeE']} = \langle\rho\rangle_{[CcC']}. \quad (6)$$

В любой точке плоскости сечения порошкового тела (заштрихованная область  $[A'ACC']$ ), проходящей через симметричные центральной оси прессования линии сопряжения частей пассивной формообразующей поверхности  $[A'A]$  и  $[C'C]$  степень уплотнения, а следовательно, и плотность порошкового тела будет одинакова и равна среднему по объёму прессовки значению. В плоскостях сечений, равноудалённых от областей сопряжения частей пассивной формообразующей поверхности

(рис. 1, б), плоскость  $[BB'D'D]$ , распределение плотности должно подчиняться классическим представлениям с инверсией параметров в области оси симметрии прессовки  $[E'E]$ , вдоль которой плотность порошкового тела постоянна. То есть в местах противохода активной и части пассивной формообразующих поверхностей (точки  $B'$  и  $D$ ) будет происходить интенсивное уплотнение порошка, а в местах их неподвижного объединения (точки  $B$  и  $D'$ ) степень уплотнения будет минимальной.

Рассмотрим соотношение сил, действующих в элементарном слое высотой  $dh$  порошкового тела, противоположные боковые поверхности которого формируются встречно движущимися частями пассивной формообразующей поверхности пресс-формы, (рис. 2, б).

$$F_0 = P \cdot S_0. \quad (7)$$

Реакция силы, действующая на нижнее основание слоя,

$$F_h = (P - dP) \cdot S_0, \quad (8)$$

$dP$  – потери давления прессования на высоте  $dh$ .

Сила пристенного трения, развитая на части пассивной формообразующей поверхности, движущейся совместно с верхней частью активной формообразующей поверхности

$$F'_{тр} = F_{бок} f' = P \cdot \xi \cdot S'_{бок} \cdot f' = P \cdot \xi \cdot f' \cdot \Pi' \cdot dh. \quad (9)$$

где  $F_{бок}$  – сила бокового давления;  $S'_{бок}$  – площадь соответствующей части пассивной формообразующей поверхности;  $f'$  – коэффициент пристенного трения, развитого на поверхности  $S'_{бок}$ .

Сила пристенного трения, развитая на части пассивной формообразующей поверхности, движущейся совместно с нижней частью активной формообразующей поверхности

$$\begin{aligned} F''_{тр} &= F_{бок} f'' = P \cdot \xi \cdot S''_{бок} \cdot f'' = \\ &= P \cdot \xi \cdot f'' \cdot \Pi'' \cdot dh. \end{aligned} \quad (10)$$

В состоянии статического равновесия сил  $F_0 = F_h + F'_{тр} - F''_{тр}$ ,

$$\begin{aligned} P \cdot S_0 &= (P - dP) \cdot S_0 + \\ &+ P \cdot \xi \cdot f' \cdot \Pi' \cdot dh - P \cdot \xi \cdot f'' \cdot \Pi'' \cdot dh. \end{aligned} \quad (11)$$

Интегрируя, получим:

$$\ln\left(\frac{P_h}{P_0}\right) = -(\Pi' \cdot f' - \Pi'' \cdot f'') \cdot \xi \cdot \frac{h}{S_0}. \quad (12)$$

Тогда величина перепада плотности прессовки по её высоте, найденная аналогично (4):

$$\Delta\rho = b \cdot (\Pi' \cdot f' - \Pi'' \cdot f'') \cdot \xi \cdot \frac{h}{S_0}. \quad (13)$$

Сравнение полученных выражений (6) и (13) показывает, что при коллекторном прессовании распределение вертикальных давлений и средней в горизонтальном сечении плотности по высоте порошкового тела, кроме коэффициента бокового давления и геометрических параметров прессовки,

зависит от соотношения величин сил трения, развитых на разнонаправленных частях пассивной формообразующей поверхности. Перепад давления прессования по высоте прессовки отсутствует при равенстве встречно движущихся частей общего гидравлического периметра ( $P' = P''$ ) и при одинаковых условиях пристенного трения на этих поверхностях ( $f' = f''$ ).

При практической реализации описанной схемы прямого коллекторного прессования следует учитывать, что перепад плотности по объёму прессовки будет зависеть от количества линий подвижного сопряжения разнонаправленных частей пассивных формообразующих поверхностей, то есть от количества плоскостей [А'АСС']. Поскольку это количество напрямую связано с количеством формообразующих элементов, то оно ограничивается сложностью изготовления и эксплуатации коллекторной пресс-формы.

Практика заказов коллекторных пресс-форм на машиностроительных предприятиях показала, что 12 – максимально допустимое (без существенного удорожания и с приемлемой сложностью эксплуатации) количество таких элементов. При этом в перпендикулярных оси прессования сечениях реальных прессовок, полученных в такой пресс-форме, угловое чередование периферийных зон с максимальной и минимальной плотностью будет наблюдаться через каждые 30 градусов. Дальнейшее повышение равномерности распределения плотности по всему объёму порошкового тела возможно путём увеличения не количества, а общей площади плоскостей [А'АСС']. Именно этот вариант усовершенствования коллекторного способа прессования представляется перспективным и подлежащим дальнейшему анализу.

При конструктивной реализации коллекторной схемы прессования возникают дополнительные поверхности трения, которые приводит к потерям усилия прессования на его преодоление. Внешние поверхности формообразующих элементов испытывают терние о поверхность единой обоймы, которая удерживает их от неосевых перемещений. Величина таких потерь зависит от коэффициента бокового давления, коэффициента трения материала пресс-формы (сталь по стали), а также отношения высоты прессовки к её гидравлическому радиусу. Для учёта влияния указанных потерь усилия прессования на плотность прессовки воспользуемся выражением (3) и после его преобразований с учётом потерь на преодоление дополнительных сил трения получим:

$$\rho = b \cdot \ln \left( \frac{P_0}{P_{кр}} \right) + \ln \left( 1 - 2 \cdot \xi \cdot f_s \cdot \frac{h}{R} \right) + 1, \quad (13)$$

где  $f_s$  – коэффициент взаимного трения элементов пресс-формы.

В наиболее неблагоприятных условиях прессования порошковых материалов с коэффициентом гидростатичности, равным единице, приведённая высота  $h/R$  порошкового изделия будет ограниче-

на величиной  $1/(2f_s)$ , при которой усилие прессования будет полностью уравновешено дополнительной силой трения формообразующих элементов матрицы о сопряжённые с ними поверхности удерживающих элементов. Несмотря на то, что для таких порошковых материалов применение коллекторного способа прессования не имеет практического смысла (перепады плотности в них полностью отсутствуют), указанное обстоятельство следует учитывать при проектировании коллекторных пресс-форм для компактирования порошков с меньшими коэффициентами гидростатичности. Минимизация сил трения формообразующих элементов достигается применением смазочных материалов на неформообразующих поверхностях либо иными технологическими приёмами, например подведением ультразвуковых колебаний [17].

### 3. Случай спирального варианта коллекторного прессования

Исходя из ограничений на количество формообразующих элементов, сформулированных в предыдущем разделе, увеличение площади [А'АСС'] (при неизменных высоте и диаметре порошкового тела) возможно только путём придания этим поверхностям некоторой кривизны, например, путём их равномерного по высоте скручивания вокруг оси прессования (рис. 1, в; рис. 2, в). В таком спиральном варианте коллекторной схемы взаимное перемещение формообразующих поверхностей остаётся таким же, как при прямом коллекторном прессовании, однако линии подвижного сопряжения разнонаправленных частей пассивной формообразующей поверхности [А'аА] и [С'сС] закручены по образующей поверхности цилиндра на некоторый угол  $\theta$ .

При использовании такой схемы, кроме уже отмеченных выше дополнительных потерь усилия прессования на преодоление трения между формообразующими и удерживающими элементами коллекторной пресс-формы, следует ожидать возникновения сил трения между скользящими друг по другу формообразующими элементами. Величина этой силы трения будет зависеть от коэффициента трения  $f_s$ , угла скручивания  $\theta$ , приведённой высоты прессовки  $h/R$  и при определённых условиях может полностью компенсировать усилие прессования, делая процесс уплотнения порошка невозможным. Выражение зависимости предельного коэффициента трения от угла скручивания можно вывести из отношения высоты прессовки к длине дуги скручивания.

$$f_s \leq \frac{h}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{\theta}{360}}. \quad (14)$$

Однако расчёты по этому выражению показывают, что такая ситуация на стальных пресс-формах с коэффициентом трения 0,15 при уплотнении порошкового тела с приведённой высотой  $h/R=4$  может возникнуть при углах скручивания значи-

тельно больше 360 градусов (четыре полных оборота по высоте), а потери усилия прессования при углах скручивания до 90° не превысят 6 %.

Представленный в предыдущих разделах аппарат описания перепада плотности по высоте компактов нельзя применить для оценки перепада плотности в ортогональных направлениях. Однако в первом приближении правомерно предположить, что уменьшение перепада плотности по объёму порошкового тела, полученному в спиральном варианте коллекторного способа прессования, по сравнению с прямым коллекторным прессованием будет пропорционально коэффициенту увеличения площади поверхности [A'ACC'] при её скручивании на заданный угол с образованием двойного прямого геликоида. Площадь этого геликоида зависит от угла скручивания, гидравлического радиуса и высоты порошкового тела. В результате преобразований и переноса результатов на полный объём прессовки получено следующее выражение для искомого объёмного коэффициента увеличения равномерности распределения плотности при использовании спирального варианта коллекторной схемы прессования.

$$q = \left( \frac{\sqrt{R^2 + t^2}}{2t} + \frac{t}{2R} \cdot \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + t^2}}{t} - 1 \right) \cdot 2\pi, \quad (15)$$

где  $t = \frac{h}{\pi \cdot \frac{\theta}{180}}$ .

Графическая зависимость процентной величины коэффициента  $q$  по объёму прессовки с отношением высоты к гидравлическому радиусу  $h/R=4$  от угла скручивания  $\theta$  представлена на рис. 3.

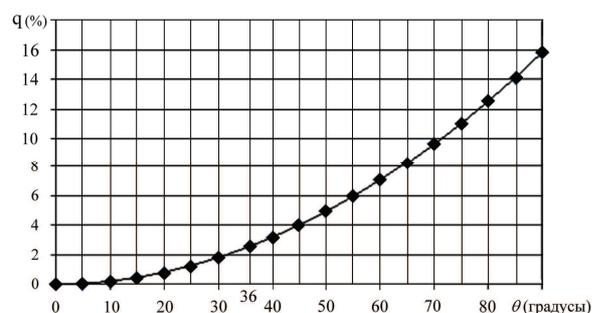


Рис. 3. Процент увеличения равномерности распределения плотности по объёму прессовки в зависимости от угла скручивания формообразующих элементов коллекторной пресс-формы спирального типа

Из представленной предварительной оценки видно, что значимое повышение равномерности распределения плотности прессовки в коллекторной схеме прессования за счёт искривления поверхности [A'ACC'] достигается при углах скручивания более 30 градусов. Проверка корректности этих выводов возможна только проведением натурных или модельных экспериментов, которые позволят учесть большее количество факторов влияния на рассматриваемый процесс. Натурные

эксперименты ограничены дороговизной изготовления множества коллекторных пресс-форм с различными углами скручивания формообразующих элементов. Более предпочтительным является компьютерное моделирование сравниваемых способов прессования.

**Моделирование**

Моделирование процесса деформирования уплотнения порошковых тел одинаковой геометрии односторонним статическим прессованием и рассматриваемыми коллекторными вариантами прессования (рис. 4) проводили с использованием метода конечных элементов. Начальные условия, режимы прессования и параметры трения на контактирующих поверхностях задавали одинаковыми для всех способов прессования. Исходя из выводов предыдущего раздела, для угла скручивания спирального варианта коллекторной схемы прессования была выбрана величина 36 градусов. Расчётное значение процентного повышения степени равномерности распределения плотности для этого угла по сравнению с прямым коллекторным прессованием составило 2,6 %.

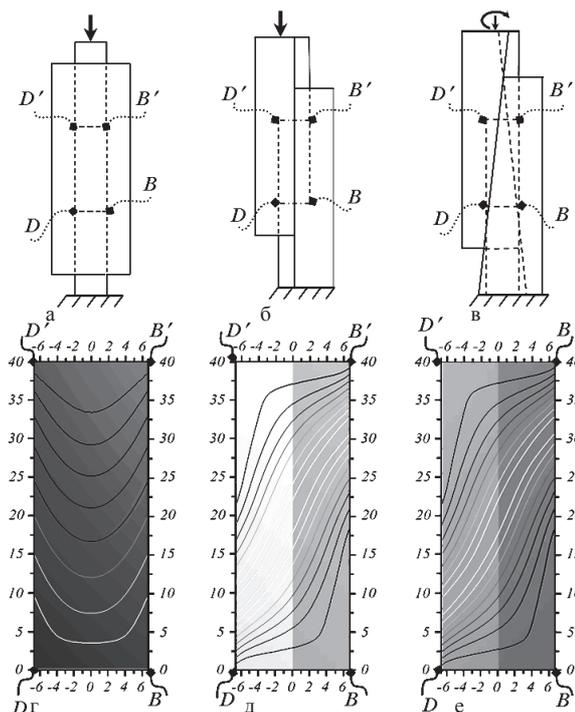


Рис. 4. Модели схем прессования с соответствующими этим схемам слоями деформации порошкового тела: традиционной одноосной схемы (а, г), прямой коллекторной (б, д) и спиральной коллекторной (в, е - выпрямленное сечение)

В случае традиционной схемы прессования (рис. 4, а, г) порошкового тела с большим значением приведённой высоты можно наблюдать резко неоднородное по высоте искривление слоев. Картина осесимметрична, то есть не зависит от положения плоскости сечения вдоль оси прессования. В случае прямого коллекторного прессования

(рис. 4, б, д) и коллекторного прессования спирального типа (рис. 4, в, е) видно, что деформация на поверхности  $[DBD'B']$  приобретает совершенно иной – более равномерный по высоте – характер, который при этом не является осесимметричным, и, таким образом, не позволяет оценить степень повышения равномерности на основе анализа одного сечения. Кроме того, на выбранном сечении  $[DBD'B']$  отличия картин распределения деформации слоёв порошкового тела между прямой и спиральной схемами коллекторного прессования минимальны.

В качестве примера, иллюстрирующего эту особенность, можно представить аналогичные картины распределения деформации слоёв в ортогональных сечениях  $[ACA'C']$  (рис. 5). Для корректного количественного сопоставления схем прессования необходимо рассмотрение объёмного распределения слоёв деформации порошковых тел с вычислением интегральной характеристики разброса количественных значений локальной деформации по всему объёму прессуемого изделия (рис. 6).

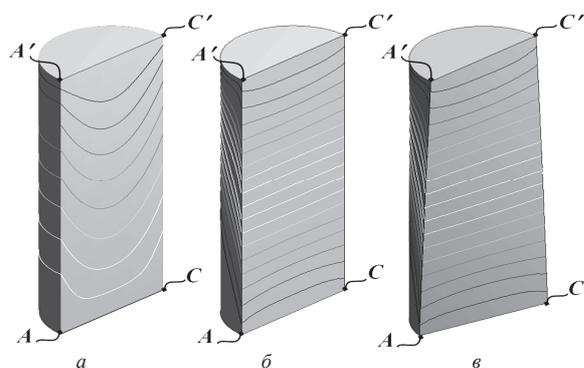


Рис. 5. Модели деформации слоёв порошкового тела в сечении  $[ACA'C']$  для: а) традиционного прессования; б) коллекторного прессования; в) коллекторного прессования спирального типа

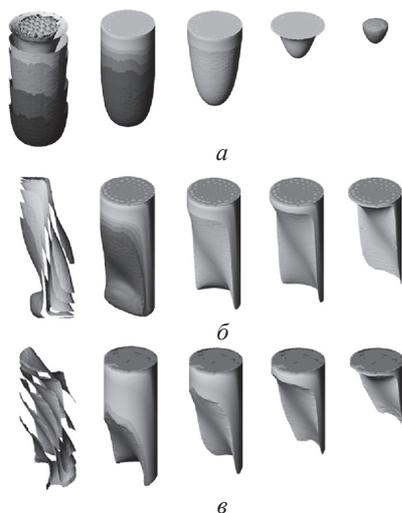


Рис. 6. Трёхмерные изолинии (изоповерхности) деформаций слоёв порошкового тела, уплотняемого по: а) традиционной; б) прямой; в) спиральной схемам коллекторного прессования

В качестве единого сопоставляемого результата моделей допустимо принять величину статистической дисперсии значений локальных деформаций в объёме порошкового тела, которые отражают степень локального уплотнения. На рис. 7 представлен количественный результат сравнительного моделирования рассматриваемых процессов прессования. Из рисунка видно, что прессование с применением спирального варианта коллекторной схемы при прочих равных условиях позволяет на 48 % повысить равномерность распределения степени уплотнения по сравнению с односторонним прессованием и на 5 % по сравнению с прямым коллекторным методом прессования. Последнее превысило результат предварительной аналитической оценки (2,6 %), что объясняется более корректным учётом взаимного влияния локальных областей деформации при использовании метода конечных элементов, а также возможностью задания при таком моделировании реологических свойств деформируемого материала, аналитический учёт объёмного влияния которых на конечный результат уплотнения не представляется возможным.

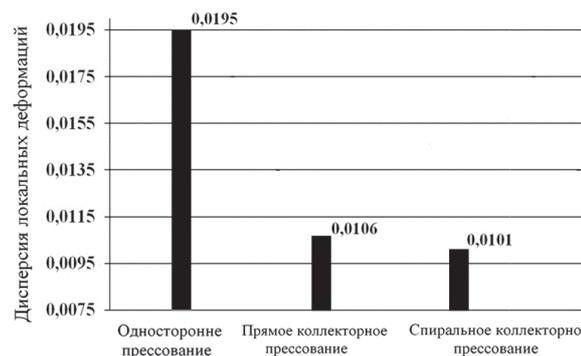


Рис. 7. Дисперсия величины локальных деформаций порошкового тела, уплотняемого различными схемами прессования

### Выводы

Коллекторная пресс-форма спирального типа позволяет достигнуть дополнительного повышения равномерности распределения плотности по объёму порошкового тела, однако для максимальной реализации этой возможности требуется выбор угла скручивания, оптимальная величина которого будет зависеть как от приведённой высоты прессуемого изделия, так и от реологических характеристик порошкового материала. Следует заметить, что в отличие от прямого коллекторного прессования, способом коллекторного прессования спирального типа можно изготовить только те изделия, внешняя поверхность которых имеет цилиндрическую форму или форму винтовой поверхности с постоянным по высоте углом скручивания. При этом соотношения поперечных размеров изделия и его габариты принципиальных ограничений не имеют.

Результаты проведённой аналитической и модельной оценки равномерности распределения степени уплотнения по высоте и объёму порошковых тел, прессуемых различными способами, позволяют использовать изложенный подход для оптимизации кинематических схем перемещения формообразующих элементов пресс-форм коллекторного типа.

Предложенный аналитический аппарат позволяет провести первичную оптимизацию геометрических размеров коллекторных пресс-форм и режимов прессования для достижения требуемых характеристик изделия без дорогостоящих натурных оптимизационных исследований.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (государственное задание «Наука»; госконтракт № 14.518.11.7017).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glass S.J., Ewsuk K.G. Ceramic Powder Compaction // MRS Bulletin. – 1997. – V. 22. – P. 24–28.
2. Lannutti J.J. Characterisation and control of compact microstructure // MRS Bulletin. – 1997. – V. 22. – P. 38–44.
3. Groza J.R. Sintering of Nanocrystalline Powders // Inter journal Powder Metall. – 1999. – V. 35. – P. 59.
4. Kear B.H., Colaizzi J., Mayo W.E., Liao S.C. On the processing of nanocrystalline and nanocomposites ceramics // Scripta Mater. – 2001. – V. 44. – P. 2065–2068.
5. Способ прессования порошковых материалов (варианты) и устройство для его осуществления: пат. 2225280 Рос. Федерация; заявл. 14.12.01; опубл. 10.03.04.
6. Shtern M.B., Serdyuk G.G., Maksimenko L.A., Truhan Yu.V., Shulyakov Yu.M. Phenomenological Theories of Compacting Powders. – Kiev: Naukova Dumka Publishers, 1982. – 254 p.
7. Popilsky R.Ya., Pivinsky Yu.E. Compacting Powder Ceramic Masses. – Moscow: Metallurgiya Publishers, 1983. – 1127 p.
8. Janssen H.A. Tests on Grain Pressure Silos // Z. Vereinschr. Dtsch. Ing. – 1895. – 39 (35). – P. 1045–1049.
9. Nedderman R.M. Statics and Kinematics of Granular Materials. – N.Y.: Cambridge University Press, 1992. – 372 p.
10. Покровский Г.И. Исследования по физике грунтов. М.; Л.: Изд-во Института ВОДГЕО Гл. ред. строительной литературы, 1937. – 136 с.
11. Li Y., Liu H., Rockabrand A. Wall friction and lubrication during compaction of coal logs // Powder Technology. – 1996. – V. 87. – P. 259–267.
12. Briscoe B.J., Rough S.L. The effects of wall friction on the ejection of pressed ceramic parts // Powder Technology. – 1998. – V. 99. – P. 228–233.
13. Briscoe B.J., Rough S.L. The effect of wall friction in powder compaction, Colloids and surfaces A // Physicochemical and Engineering Aspects. – 1998. – V. 137. – P. 103–116.
14. Tien Y.M., Wu P.L., Chu C.A., Chuang W.S., Wu L.H. The friction-free compressibility curve of bentonite block // Physics and Chemistry of the Earth. – 2007. – V. 32. – P. 809–819.
15. Tien Y.M., Wu P.L., Huang W.H., Kuo M.F., Chu C.A. Wall friction measurement and compaction characteristics of bentonite powders // Powder metallurgy. – 2007. – V. 173. – P. 140–151.
16. Хасанов О.Л., Двилис Э.С., Соколов В.М. Построение кривых уплотнения керамических порошков на основе однопараметрического уравнения прессования // Огнеупоры и техническая керамика. – 2001. – № 1. – С. 40–44.
17. Хасанов О.Л., Похолоков Ю.П., Соколов В.М., Двилис Э.С. Ультразвуковое компактирование циркониевой керамики из ультрадисперсных порошков // Стекло и керамика. – 1995. – № 7. – С. 15–18.

*Поступила 12.02.2013 г.*