

06

Одноосное компактирование нанопорошков на магнитно-импульсном прессе

© А.А. Боков,¹ Г.Ш. Болтачев,¹ Н.Б. Волков,¹ С.В. Заяц,¹ А.М. Ильина,²
А.А. Ноздрин,¹ С.Н. Паранин,¹ Е.А. Олевский²

¹ Институт электрофизики УрО РАН,
620016 Екатеринбург, Россия

² Лаборатория электромагнитных методов производства новых материалов
Национального исследовательского ядерного университета „МИФИ“,
115409 Москва, Россия
e-mail: eolevsky@mail.sdsu.edu

(Поступило в Редакцию 22 июня 2012 г. В окончательной редакции 15 января 2013 г.)

Экспериментально и теоретически исследуется процесс одноосного магнитно-импульсного уплотнения наноразмерных порошков. Эксперименты поставлены с порошками на основе оксида алюминия. Теоретическая модель процесса включает согласованное решение уравнений, описывающих динамику импульсного магнитного поля, и динамику механической системы (подвижные части пресса и уплотняемый порошок). Поведение порошка описано в рамках феноменологической теории пластично-упрочняющегося пористого тела. Прямое сопоставление с экспериментальными данными позволило определить все необходимые входные параметры теоретических расчетов. В рамках построенной модели исследован широкий круг условий прессования, изучено влияние таких параметров, как масса уплотняемого порошка и масса разгоняемых частей пресса. Выявлены условия, при которых максимально эффективно используются инерционные свойства пресса, что должно приводить к получению прессовок с высокой плотностью.

Введение

Магнитно-импульсные методы компактирования порошковых материалов уже довольно долгое время являются предметом экспериментальных исследований. Процессы магнитно-импульсного прессования не предполагают прямого действия магнитным полем на порошковое тело, поскольку порошки, как правило, характеризуются низкими значениями электрической проводимости и магнитной восприимчивости. Вместо этого воздействие импульсного магнитного поля прикладывается к проводящим телам (цилиндрическая трубка, плоский ударник и т. д.), которые выступают в роли прессующего “молота”. Так, еще в 1964 г. Сандстром [1] предложил и реализовал электродинамическое прессование порошка в трубе, которая сжимается под действием импульсного магнитного поля собственного тока (так называемая схема z -пинча). Широкое применение нашло также радиальное индукционное сжатие металлических оболочек, известное как θ -пинч [2]. Большую перспективность продемонстрировали магнитно-импульсные методы для формования наноразмерных порошков [3]. Используя одноосное прессование, были получены компакты оксида алюминия с пористостью менее 30%, что существенно упрощает проблему сохранения наноструктуры на этапах последующего спекания.

Несмотря на длительную историю экспериментальных исследований, теоретическое описание процессов магнитно-импульсного прессования порошков, пожалуй, стартует с работы 2004 г. [4]. Многочисленные предшествующие исследования были направлены на описа-

ние отдельных составляющих данных процессов: воздействие на проводящие лайнеры с целью генерации сильных импульсных магнитных полей, например, работы [5–8]; механические свойства порошкового тела под нагрузкой, например, работы [9,10]. В работе [4] впервые предпринята попытка описать радиальное сжатие порошка с учетом динамических эффектов, которые возникают при ускорении цилиндрической оболочки внешним импульсным магнитным полем. Отмечен так называемый инерционный эффект, когда за счет использования инерционных свойств механической системы (оболочка + порошок) удается достичь давлений прессования, существенно превышающих силовое воздействие магнитного поля на оболочку. Отметим, что динамика электрического контура в [4] не рассматривалась (импульс магнитного поля задавался просто в виде затухающей синусоиды), а поведение порошка описывалось на основе адиабаты сжатия, которая соответствовала вообще-то другой геометрии нагружения (одноосному уплотнению).

Полуэмпирический подход использования экспериментальных адиабат сжатия нашел развитие в работе [11]. Здесь поведение порошка уже описывается на основе развитой феноменологической теории пластично упрочняющегося пористого тела [10]. В рамках данной теории проводится построение основного определяющего уравнения порошкового тела (закона упрочнения), которое позволяет строго описывать механические свойства порошка при различных геометриях внешнего нагружения. Теоретический анализ прессования проведен применительно к условиям квазистатического радиаль-

ного уплотнения, что приводит к заниженным значениям конечной плотности, достигаемым в эксперименте. Последнее объясняется неучетом инерционного эффекта при таком рассмотрении.

Учет динамических эффектов при радиальном прессовании в совокупности со строгим описанием механических свойств порошкового тела представлен в работах [12,13]. Согласованное решение как уравнений динамики механической деформируемой системы (оболочка + порошок), так и уравнений динамики электрического контура, генерирующего магнитное поле, позволило построить теоретическую модель прессования порошков по схемам z - и θ -пинчей, достаточную для надежного воспроизведения известных экспериментальных данных и, как следствие, для уверенного прогнозирования данных процессов.

Теоретическому описанию процессов одноосного прессования посвящены работы [14,15]. Однако, следует отметить, что в этих работах проанализирован нетипичный режим работы одноосного пресса: вначале происходит ускорение магнитным полем свободного ударника (неконтактирующего с порошком), а уже после этого происходит контакт с порошком и его прессование. В момент удара движущимся ударником по порошковой заготовке в последней возникает поверхность разрыва плотности и давления — ударная волна, и все уплотнение происходит на движущемся ударном фронте. Результаты работ [14,15] демонстрируют довольно низкую эффективность такой организации процесса одноосного уплотнения. Причина этого — в распадах ударного фронта на контактных границах (сверху и снизу порошка), которые приводят к выносу существенной части энергии удара за пределы компактируемой среды.

Настоящая работа посвящена построению теоретической модели одноосного компактирования в его стандартной реализации на магнитно-импульсном прессе, когда процессы ускорения ударника магнитным полем и прессование порошка не разнесены во времени. В начале процесса ударник находится в непосредственном контакте с порошковым телом. Это позволяет избежать довольно жестких условий ударного прессования и реализовать относительно „мягкое“ нагружение уплотняемого порошка.

Экспериментальная часть

Для исследования были использованы два порошка, маркированных как δ -АМ и α -АМ. Наноразмерный порошок δ -АМ получен методом электровзрыва алюминиевой проволоки в Институте электрофизики УрО РАН [16]. Начальная плотность порошка в пресс-форме $\rho_0 = 1.33 \text{ g/cm}^3$. Средний размер частиц, определенный по удельной поверхности, около 20 nm. Рентгенофазовый анализ порошка показывает наличие γ - и δ -фаз Al_2O_3 в пропорции примерно 1:4, что соответствует плотности частиц $\rho_{\text{max}} = 3.66 \text{ g/cm}^3$. Поро-

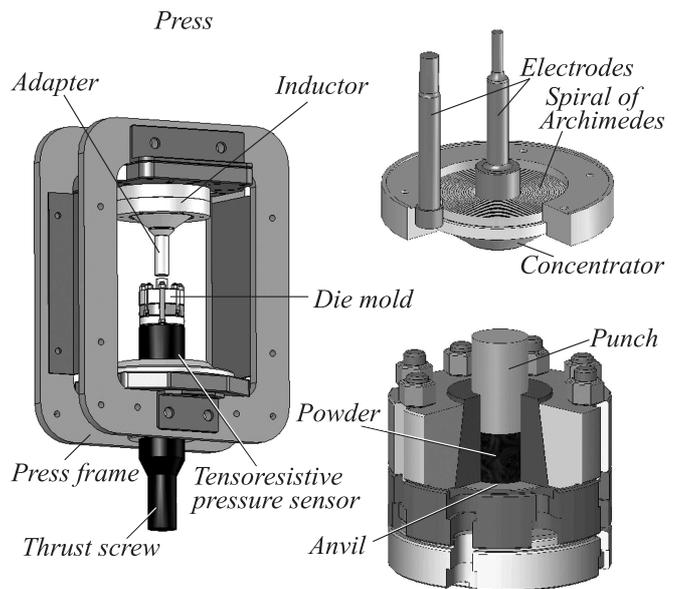


Рис. 1. Схематичное изображение экспериментальной установки — одноосного магнитно-импульсного пресса

шок α -АМ приобретен в компании Inframat Advanced Materials LLC (США). Данный порошок, согласно данным производителя, характеризуется площадью удельной поверхности $10 \text{ m}^2/\text{g}$ и средним размером частиц около 150 nm. Порошок содержит только одну стабильную α -фазу ($\rho_{\text{max}} = 3.986 \text{ g/cm}^3$), средний размер области когерентного рассеяния которой, определенный по уширению дифракционных линий, равен 56 nm. По совокупности данных можно сделать заключение о том, что частицы нанопорошка представляют собой плотные агломераты, состоящие из множества нанокристаллов. Начальная плотность порошка $\rho_0 = 1.85 \text{ g/cm}^3$.

Силовое воздействие на порошковое тело осуществлялось посредством разработанной ранее установки для одноосного магнитно-импульсного прессования [17–20], схематичное изображение которой представлено на рис. 1. Уплотнение порошков происходит в сквозном цилиндрическом канале диаметром $d_p = 15 \text{ mm}$. Для измерения адиабат сжатия пресс снабжен тензорезистивным датчиком давления, наклеенным на нижний пуансон. Плотность образца определяется после извлечения его из пресс-формы стандартными методами (гидростатическое взвешивание). Давление импульсного магнитного поля, генерируемого плоским индуктором (спираль Архимеда), передается через концентратор и переходник верхнему пуансону, перемещение которого приводит к уплотнению порошка. Использовались три различных концентратора: К1 — стальной, с медной 3-мм пластиной сверху, суммарной массой $m_c = 4.395 \text{ kg}$; К2 — алюминиевый (1.491 kg); К3 — алюминиевый, с медной пластиной (2.030 kg).

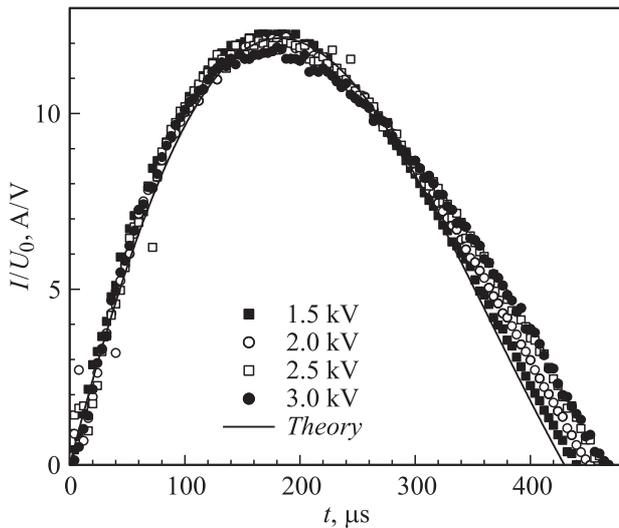


Рис. 2. Временные развертки силы тока I в контуре, отнормированной на значение зарядного напряжения U_0 , при неподвижном концентраторе К1. Точки — экспериментальные данные для различных значений зарядного напряжения. Линия — теоретический расчет по (3).

Динамика электрического контура описывается на основе одноконтурной LRC -схемы [6,8]:

$$\frac{d^2q}{dt^2}L + \frac{dq}{dt}\left(R + \frac{dL}{dx}\frac{dx}{dt}\right) + \frac{q}{c} = 0, \quad (1)$$

$$L(x) = L_i(x_0 + x) + \Delta L, \quad R = R_i + R_c,$$

где $q(t)$ — заряд на конденсаторной батарее, t — время, L — индуктивность, $c = 2227 \mu\text{F}$ — емкость конденсаторной батареи, $R_i = 0.014 \Omega$ — собственное сопротивление использованного индуктора, R_c — собственное сопротивление электрического контура. Зависимость эффективной индуктивности индуктора L_i от расстояния x между ним и концентратором измерялась в ходе предварительных экспериментов. Полученные экспериментальные данные на интервале расстояний x от 0 до 15 мм в соответствии с [7] аппроксимированы выражением

$$L_i(x) = L_0 + (L_\infty - L_0)[1 - \exp(-x/d)]. \quad (2)$$

Для концентратора К1 получено: $L_0 = 6.7 \mu\text{H}$, $d = 11.8 \text{ mm}$; для К2: $L_0 = 7.3 \mu\text{H}$, $d = 12.4 \text{ mm}$; для К3: $L_0 = 6.5 \mu\text{H}$, $d = 12.5 \text{ mm}$; параметр $L_\infty = 21.1 \mu\text{H}$. В целях защиты индуктора от механических повреждений между ним и концентратором располагалась текстолитовая пластина толщиной $x_0 = 1 \text{ mm}$. В уравнении (1) учтена также поправка ΔL , обусловленная нестационарностью процесса разряда конденсаторной батареи. Здесь необходимо отметить, что зависимости (2) были промерены в стационарном режиме: относительно небольшой по амплитуде переменный ток с частотой 1000 Hz.

Параметры ΔL и R_c определялись по временным разверткам тока $I = -(dq/dt)$ через индуктор, промеренным в экспериментах с неподвижным концентратором (рис. 2). Наилучшее описание экспериментальных разверток $I(t)$ достигается при значениях $\Delta L = 0.1 \mu\text{H}$ (для всех концентраторов) и $R_c = 0.014 \Omega$ (концентраторы К1 и К2), $R_c = 0.020 \Omega$ (К3). При этом, как показывает рис. 1, теория с достаточно высокой точностью воспроизводит стадию роста тока и область максимума. На стадии снижения тока экспериментальные данные отклоняются в сторону больших значений по времени. Это связано с неучитываемыми в теоретической модели аспектами: джоулевый нагрев проводников, что приводит, в частности, к увеличению скин-слоя и росту эффективной индуктивности, нестационарность процесса, диффузионные процессы и т.д.

Аналитическое решение линейного дифференциального уравнения (1) при неподвижном концентраторе не представляет проблем и дает для тока ($I = -dq/dt$) в режиме слабой диссипации (при $R < 2\sqrt{L/c}$)

$$I(t) = \frac{U_0}{wL} e^{-\beta t} \sin(wt),$$

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{c}{L}} \exp\left(-\frac{\beta}{w} \text{atan}(w/\beta)\right) U_0, \quad (3)$$

где $w = \sqrt{(Lc)^{-1} - \beta^2}$, $\beta = R/(2L)$. Сила F_u , с которой магнитное поле индуктора воздействует на концентратор, определяется выражением

$$F_u = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dx}. \quad (4)$$

В эксперименте значение силы определялось посредством тензорезистивного датчика, расположенного на переходнике под прессуемым порошком. Промеренная экспериментально зависимость $F_u(U_0)$ вплоть до величины зарядного напряжения в 3 kV согласуется с теоретическим расчетом по уравнениям (3) и (4).

Математическая модель процесса прессования

Согласованное решение задачи о магнитно-импульсном прессовании порошка предполагает одновременное решение уравнений, описывающих динамику электрического контура (1) и динамику ускоряемой механической системы (концентратор + переходник + поршень). Последнее записывается в виде

$$M_u \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{2} \frac{dL}{dx} I^2 - p_n(\theta) S_p - p_{t,1} S_{t,1} - p_{t,2} S_{t,2}, \quad (5)$$

где $M_u = m_c + \Delta m$ — масса разгоняемой системы (ударника), $\Delta m = 1.296 \text{ kg}$ — суммарная масса переходника и поршня, p_n — нормальные напряжения на границе „поршень–порошок“, определяемые достигнутым значением пористости порошка (θ), $S_p = \pi d_p^2/4$ — площадь

прессовки; $p_{t,1}$ и $p_{t,2}$ — касательные напряжения на боковой поверхности поршня ($S_{t,1}$) и переходника ($S_{t,2}$)

$$S_{t,1} = \pi d_p (h_{pu,0} + x), \quad S_{t,2} = \pi d_a h_a, \quad (6)$$

где $h_{pu,0} = 15 \text{ mm}$ — начальная глубина погружения поршня в матрицу, $h_a = 25 \text{ mm}$ — высота защемленной части переходника, $d_a = 36 \text{ mm}$ — его диаметр. Начальные условия к системе дифференциальных уравнений (1), (5)

$$q(0) = cU_0, \quad I(0) = 0, \quad x(0) = 0, \quad \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = 0, \quad (7)$$

где U_0 — зарядное напряжение конденсаторной батареи. Последние два члена справа в уравнении (5) описывают силы трения, неизбежно появляющиеся на контактной границе „поршень–матрица“ и на границе между верхним переходником и системой дегазации (не изображена на рис. 1). Принимая, что в области бокового ограничения поршень и переходник испытывают одностороннее сжатие, можем записать [21]:

$$p_{t,1} = \mu_1 p_n \frac{v_1}{1 - v_1}, \quad p_{t,2} = \mu_2 p_n \frac{S_p}{S_a} \frac{v_2}{1 - v_2}, \quad (8)$$

где $\mu_{1,2}$ — коэффициенты трения для поршня (индекс 1) и переходника (индекс 2), $v_{1,2} = 0.3$ — коэффициенты Пуассона тех же материалов, $S_a = \pi d_a^2/4$ — площадь поперечного сечения переходника. Пористость порошка и его макроскопическая плотность ρ определяются смещениями верхнего (x) и нижнего (x_s) пуансонов:

$$\rho = \rho_{\max}(1 - \theta), \quad \theta = 1 - \frac{1 - \theta_0}{1 - (x - x_s)/h_0}, \quad h_0 = \frac{m_p}{\rho_0 S_p}, \quad (9)$$

где θ_0 — начальная пористость, h_0 — начальная высота засыпки, m_p — масса порошка. Смещение нижнего пуансона обусловлено недостаточной жесткостью пресса, упругие свойства которого удовлетворительно описываются линейным законом $p_n S_p = K_s x_s$ с эффективным коэффициентом упругости $K_s = 150 \text{ kN/mm}$.

Следует отметить, что в рамках представленной выше модели мы пренебрегаем следующими факторами. Во-первых, диффузия магнитного поля в концентратор и индуктор: предполагается, что влияние этого фактора учтено за счет использования эмпирического соотношения (2) и введения поправки ΔL . Во-вторых, инерционные свойства порошка: его масса не превышает нескольких грамм, что пренебрежимо мало по сравнению с массой подвижных частей пресса. В-третьих, упругие деформации порошка, концентратора, переходника и поршня: оценки показывают, что при давлении на порошок в 1 ГПа суммарное упругое сжатие концентратора, переходника и поршня составляет около $200 \mu\text{m}$. В порошке же предполагается, что необратимая деформация сжатия существенно превышает обратимую (упругую) деформацию. В-четвертых, трение на контактной границе „порошок–матрица“, которое, в частности,

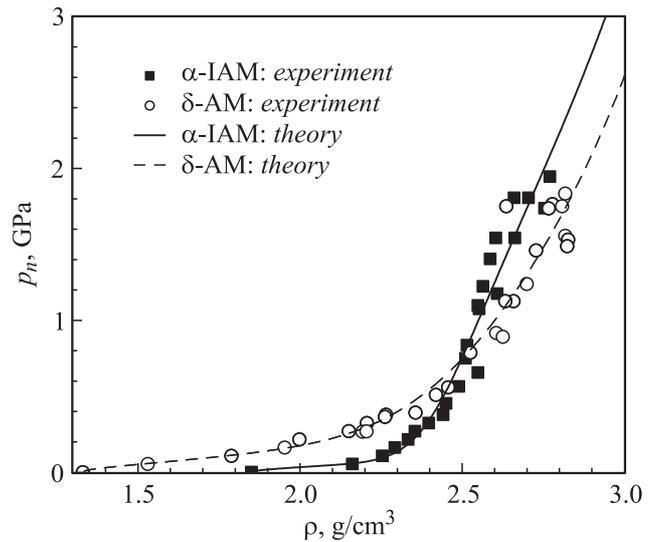


Рис. 3. Адиабаты сжатия исследованных порошков в переменных „плотность–осевое давление“. Точки — экспериментальные данные, линии — теория по уравнениям (10)–(12).

может приводить к неоднородному уплотнению компакта. Последний фактор становится существен, когда высота прессовки сопоставима или превышает ее горизонтальные размеры. В нашем же исследовании высота засыпки даже в начальном состоянии ($h_0 = 4\text{--}6 \text{ mm}$) существенно меньше ее диаметра ($d_p = 15 \text{ mm}$).

Поведение наноразмерного порошка описывается в рамках теории пластично упрочняющегося пористого тела [10], согласно которой применительно к геометрии одноосного уплотнения имеем [11]

$$p_n(\theta, \theta_0) = \left(\Psi + \frac{2}{3} \phi \right)^{1/2} (1 - \theta)^{1/2} k(\Gamma_0), \quad (10)$$

где k — предел текучести материала (матрица пористого тела),

$$\Psi = \frac{2}{3} \frac{1 - \theta + \theta^2/2}{\theta} \phi(\theta), \quad \phi = (1 - \theta)^{5/3}, \quad (11)$$

$$\Gamma_0 = \int_{\theta}^{\theta_0} \sqrt{\Psi + \frac{2}{3} \phi} \frac{d\theta}{(1 - \theta)^{3/2}}.$$

Свободным параметром „уравнения состояния“ (10) является закон упрочнения, т.е. зависимость $k(\Gamma_0)$. Его определение было осуществлено по экспериментальным адиабатам сжатия исследуемых порошков. Экспериментальные данные в координатах $p_n(\rho)$, представленные на рис. 3, были переведены в инвариантные переменные $k(\Gamma_0)$, согласно соотношениям (11) и (10), и затем аппроксимированы соотношением

$$k(\Gamma_0) = k_1 \Gamma_0^{1/2} + \frac{k_2 \Gamma_0^{n+1}}{k_3 + \Gamma_0^n}, \quad (12)$$

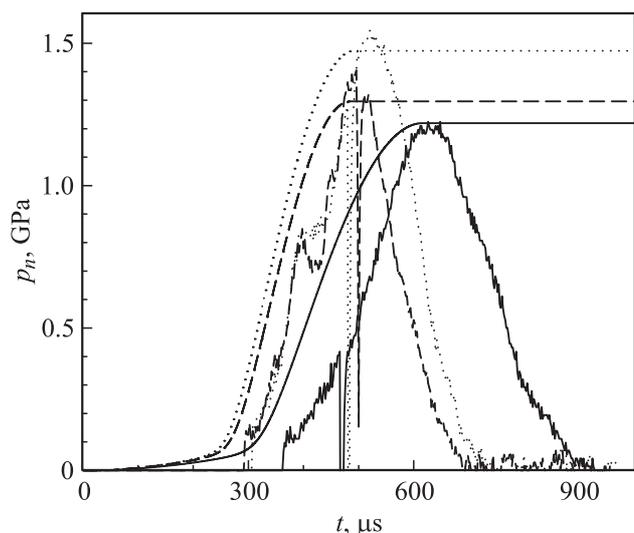


Рис. 4. Временные развертки давления для порошка α -IAM при зарядном напряжении $U_0 = 2.0$ kV для разных концентраторов: сплошные линии — K1, штриховые — K2, пунктирные — K3. Ломаные (пульсирующие) кривые — экспериментальные данные, гладкие кривые, выходящие на постоянное значение, — теоретический расчет при $\mu = 0.15$. Масса засыпки $m_p = 2.25$ g.

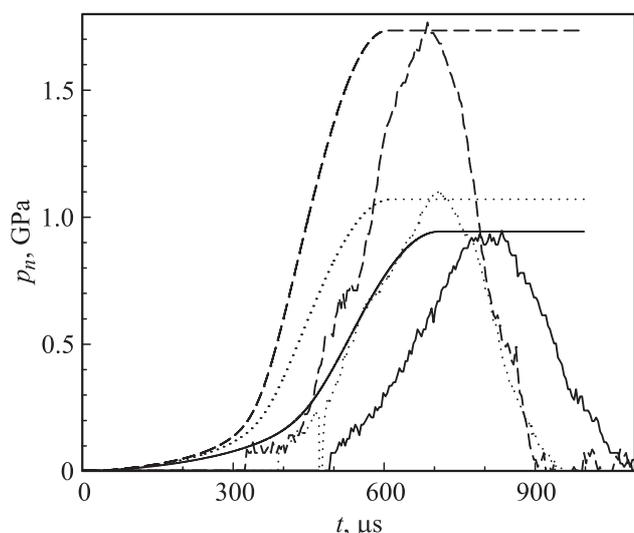


Рис. 5. Временные развертки давления для порошка δ -AM при использовании концентратора K1: сплошные линии — $U_0 = 2.0$ kV, $m_p = 1.5$ g; штриховые — $U_0 = 2.5$ kV, $m_p = 1.5$ g; пунктирные — $U_0 = 2.0$ kV, $m_p = 1.0$ g. Ломаные (пульсирующие) кривые — экспериментальные данные, гладкие кривые — теоретический расчет при $\mu = 0.23$.

с коэффициентами: $k_1 = 0.25$ GPa, $k_2 = 5.026$ GPa, $k_3 = 0.00023$, $n = 7$ для порошка α -IAM; $k_1 = 0.464$ GPa, $k_2 = 1.698$ GPa, $k_3 = 0.1$, $n = 5.5$ для порошка δ -AM.

Коэффициенты трения μ_1 и μ_2 полагались равными $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ и выполняли роль свободного параметра теоретической модели. Данный параметр был определен

из условия наилучшего описания экспериментальных данных о силовом воздействии на уплотняемый порошок. Временные развертки давления p_n для исследуемых порошков представлены на рис. 4 и 5. Наилучшее соответствие между теоретическими и экспериментальными кривыми $p_n(t)$ достигается при значении $\mu = 0.15$ для порошка α -IAM и 0.23 для порошка δ -AM. Различное значение данного параметра для различных порошков мы связываем с незначительным просачиванием пресуемого порошка в пространство между поршнем и матрицей, и, как следствие, с влиянием типа порошка на эффективное значение коэффициента трения. Отметим, что в рамках развитой теоретической модели мы не описываем стадию разгрузки порошка, т.е. спадающие ветви зависимостей $p_n(t)$ на рис. 4 и 5, поэтому теоретические кривые выходят к концу процесса на постоянное (максимальное) значение. Сдвиг экспериментальных кривых примерно на $100 \mu\text{s}$ в сторону больших значений времен связан с конечной скоростью распространения импульса давления по экспериментальной установке, что не учитывается в теоретическом расчете.

Влияние масс порошка и ударника на конечную плотность компакта

Построенная в предыдущем разделе теоретическая модель позволяет провести всесторонний анализ изучаемого процесса. В данном разделе мы исследуем влияние таких параметров, как масса ударника и масса порошка. Выбор данных параметров обусловлен тем, что их варьирование возможно на используемом нами оборудовании.

Некоторое улучшение прессования порошка при уменьшении его массы демонстрирует рис. 5. Об „улучшении“ свидетельствуют более высокие давления p_n , достигаемые в ходе процесса, что соответствует меньшим значениям конечной пористости компакта θ_{end} . Так для условий, соответствующих рис. 5, при массе порошка $m_p = 1.5$ g пористость θ_{end} составила 29.5%, а при массе $m_p = 1.0$ g — 28.3%. Более подробный анализ влияния массы порошка позволяет провести рис. 6, который демонстрирует конечную пористость прессовки θ_{end} в зависимости от величины m_p . Расчеты показывают, что максимальное уплотнение для всех концентраторов достигается в области довольно малых значений $m_p \approx 0.1$ – 0.4 g. Можно отметить, что снижение конечной пористости прессовки с уменьшением массы пресуемого порошка хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными для концентратора K1.

С другой стороны, прессование столь малых количеств порошка само по себе имеет невысокую практическую значимость и может рассматриваться лишь в качестве претендента, например, на послыное изготовление более массивных образцов. Однако при этом существенную значимость приобретает КПД данного процесса, т.е. эффективность использования исходной

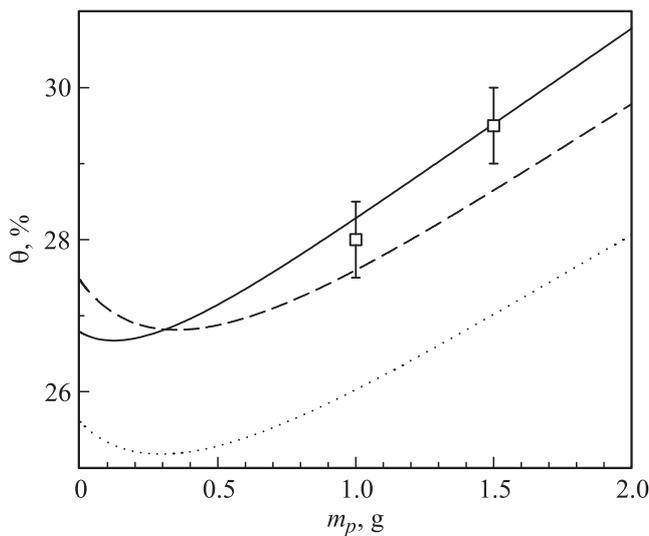


Рис. 6. Конечная пористость прессовки в зависимости от массы порошка. Сплошные линии — концентратор К1, штриховые — К2, пунктирные — К3; точки — экспериментальные данные для концентратора К1. Порошок δ -АМ, зарядное напряжение $U_0 = 2.0$ kV.

энергии емкостного накопителя. Полный КПД прессования η_p можно представить в виде

$$\eta_p = \eta_e \eta_u, \quad \eta_e = \frac{1}{E_0} \int_{x_0}^{x_k} F_u dx, \quad \eta_u = -\frac{m_p}{\eta_e E_0} \int_{\rho_0}^{\rho_{end}} \frac{p_n}{\rho^2} d\rho, \quad (13)$$

где η_e — коэффициент преобразования энергии электрического контура ($E_0 = cU_0^2/2$) в кинетическую энергию ударника (КПД разгона), а η_u — коэффициент преобразования энергии ударника в работу по уплотнению порошка (КПД ударника). Расчеты показывают, что, несмотря на „улучшение“ прессования с уменьшением массы порошка в плане достижения несколько меньших значений конечной пористости, эффективность процесса при этом быстро снижается. Происходит это в основном из-за уменьшения КПД ударника η_u . Так, для концентратора К1 при зарядном напряжении $U_0 = 2.0$ kV и массе порошка $m_p = 1.5$ g КПД ударника составляет $\eta_u = 29.5\%$, а при уменьшении массы m_p до 0.5 g этот КПД снижается до 12.2%. При этом диссипативные потери, связанные с наличием касательных напряжений трения $p_{t,1}$ и $p_{t,2}$ в уравнении (5), меняются незначительно, а снижение КПД обусловлено увеличением упругой деформации установки: расчетные смещения нижнего пуансона составляют 1.1 mm ($m_p = 1.5$ g) и 1.4 mm ($m_p = 0.5$ g). В пределе $m_p \rightarrow 0$ КПД процесса монотонно снижается вплоть до нуля, т.е. вся работа, совершаемая поршнем, идет на упругое деформирование установки. Процесс прессования в этом пределе утрачивает свою динамичность, приближаясь к квазистатическому режиму, что приводит, как показывает рис. 6, даже к некоторому повышению конечной пористости.

Влияние массы ударника отчасти демонстрирует рис. 4, который показывает улучшение прессования порошка α -АМ при использовании более легких концентраторов К2 и К3 по сравнению с относительно тяжелым концентратором К1. Так, для условий, соответствующих рис. 4, при использовании концентратора К1 пористость θ_{end} составила 34.9%, а с концентратором К3 — 33.6%. В отличие от разобранный выше случая влияния массы порошка повышение конечной плотности при переходе к более легким ударникам соответствует повышению эффективности процесса.

На рис. 7 представлены КПД разгона η_e и КПД ударника η_u в зависимости от зарядного напряжения емкостного накопителя. В области малых значений U_0 КПД разгона $\eta_e \sim U_0^2$ [14]. В области высоких значений U_0 в пренебрежении противодавлением порошка $\eta_e \sim U_0^{-1}$ [14]. Однако, как показывает рис. 7, в наших условиях этот режим не реализуется. Зато при напряжениях U_0 выше 1 kV начинает быстро убывать КПД ударника η_u , что обусловлено, как и в случае уменьшения массы порошка, упругими характеристиками пресса. Полный КПД установки представлен на рис.8, откуда видно, что даже в максимуме полный КПД процесса составит 2–3%. Последнее говорит о довольно невысокой эффективности использования энергии накопителя.

Более подробный теоретический анализ влияния массы ударника на конечную пористость прессовки представлен на рис. 9. Рисунок показывает, что максимальное уплотнение достигается при $M_u \simeq 0.7$ kg (для $m_p = 1.5$ g и $U_0 = 2.0$ kV). Конечная пористость компакта при этом составила бы 23%. Одновременно, максимального значения достигает КПД прессования — $\eta_p \simeq 3.6\%$. Расчеты

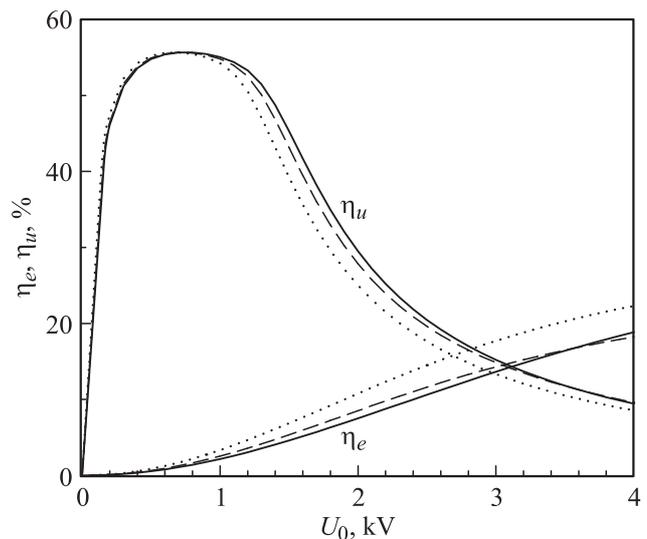


Рис. 7. Коэффициент преобразования энергии электрического контура в кинетическую энергию ударника (η_e) и энергии ударника в работу по уплотнению порошка (η_u) в зависимости от зарядного напряжения конденсаторной батареи. Сплошные линии — концентратор К1, штриховые — К2, пунктирные — К3. Порошок δ -АМ, масса засыпки $m_p = 1.5$ g.

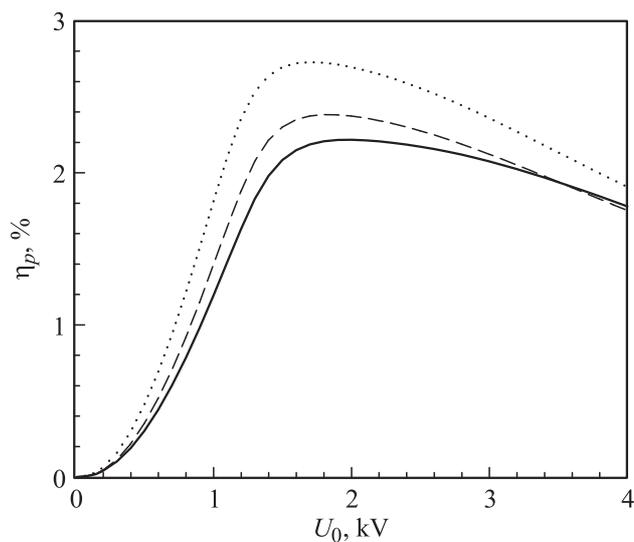


Рис. 8. Полный КПД установки, $\eta_p = \eta_e \eta_u$ в зависимости от зарядного напряжения конденсаторной батареи. Обозначение линий и параметры расчета те же, что и на рис. 7.

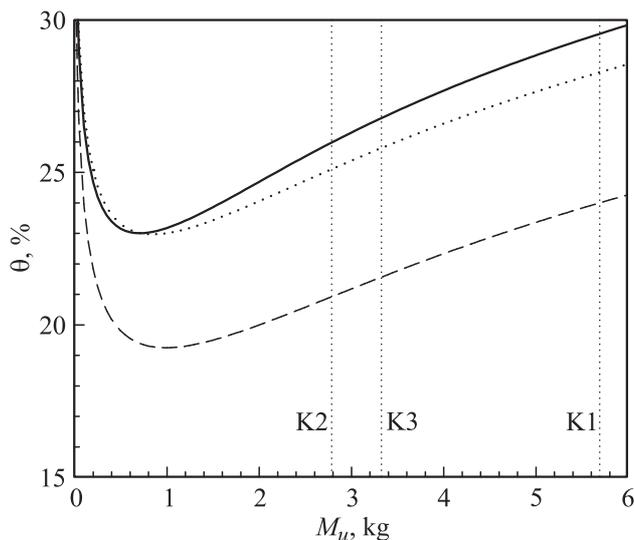


Рис. 9. Конечная пористость прессовки в зависимости от массы ударника. Сплошная линия — $m_p = 1.5 \text{ g}$, $U_0 = 2.0 \text{ kV}$, штриховая — $m_p = 1.5 \text{ g}$, $U_0 = 2.5 \text{ kV}$, пунктирная — $m_p = 1.0 \text{ g}$, $U_0 = 2.0 \text{ kV}$. Параметры электрического контура (сопротивление и индуктивность) соответствуют концентратору К1, порошок δ -АМ. Вертикальными пунктирными линиями отмечены значения массы, соответствующие концентраторам К1, К2 и К3.

на рис. 9 соответствуют параметрам контура с концентратором К1. Поскольку влияние ударника обусловлено не только его инерционными свойствами, а также изменением таких параметров, как эффективная индуктивность и сопротивление контура, прямое сопоставление приведенных расчетов с экспериментальными данными для концентраторов К2 и К3 некорректно. Поэтому на рисунке лишь обозначены значения масс ударника, со-

ответствующие используемым концентраторам. Тем не менее, общая тенденция — улучшение прессования при снижении массы ударника — качественно соответствует представленным выше экспериментальным данным.

Повышение конечной плотности в пределе $M_u \rightarrow 0$, так же как и в пределе малой массы порошка $m_p \rightarrow 0$ (рис. 6), связано с переходом к квазистатическому режиму прессования. Однако в анализируемом пределе $M_u \rightarrow 0$ (при конечных значениях массы порошка) смещение ударника существенно больше, чем в пределе $m_p \rightarrow 0$. Это приводит к заметному ослаблению „магнитной“ силы, определяемой уравнениями (2) и (4), и как следствие к более ощутимому ухудшению прессования. Так, для концентратора К1 при зарядном напряжении $U_0 = 2.0 \text{ kV}$ в пределе $m_p \rightarrow 0$ конечная пористость прессовки составляет $\theta \simeq 27\%$, а гипотетический предел $M_u \rightarrow 0$ дает $\theta \simeq 33\%$.

Возможные способы значительного повышения эффективности одноосного прессования

Анализ, представленный в предыдущем разделе, показывает, что за счет варьирования таких параметров, как масса порошка и масса концентратора, довольно трудно достичь заметного улучшения процесса прессования, т.е. повысить конечную плотность прессовки. В данном разделе мы исследуем возможные пути более значительного повышения результативности процесса компактирования, которые, однако, требуют существенной модификации используемого оборудования, и поэтому не могут быть нами реализованы экспериментально в настоящий момент.

В первую очередь, проанализируем эффективность варьирования периода собственных колебаний электрического контура, генерирующего импульсное магнитное поле. Используемая нами экспериментальная установка в начальный момент характеризуется полупериодом колебаний в LRC -контуре $T_{0,\text{exp}} = \pi \sqrt{cL(0)} = 383 \mu\text{s}$. Проанализируем одновременное увеличение емкости c и начальной индуктивности $L(0)$ (не искажая зависимость $L_i(z)$, (2)), что приведет, соответственно, к возрастанию величины T_0 . При этом отношение $c/L(0)$ будем удерживать на заданном уровне, чтобы амплитуда тока (см. 3), оставалась практически неизменной. В реальной установке это соответствовало бы подключению дополнительного соленоида последовательно с рабочим индуктором и соответствующему увеличению конденсаторной батареи. Результаты такого моделирования представлены на рис. 10, 11. Рис. 10 показывает, что вначале увеличение периода T_0 приводит к резкому повышению давления прессования, которое достигает максимальных значений, когда величина $T_0/2$ (четверть периода) становится примерно равна протяженности процесса прессования. Так, при $T_0 = 3T_{0,\text{exp}}$ имеем $T_0/2 = 612 \mu\text{s}$, а процесс прессования заканчивается к моменту $t_{\text{end}} = 760 \mu\text{s}$.

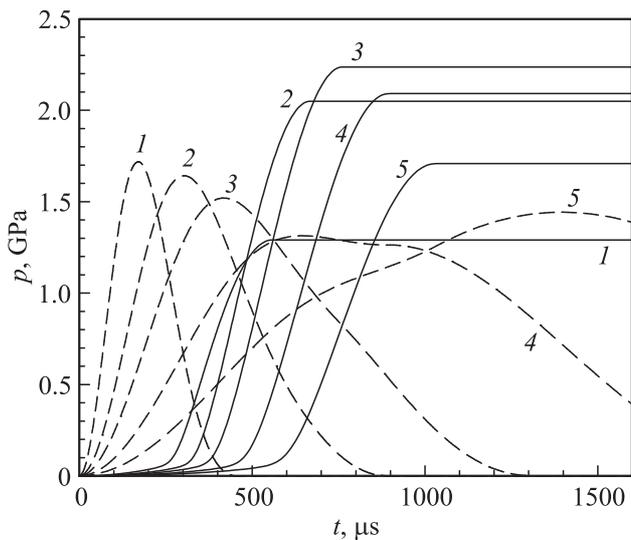


Рис. 10. „Магнитное давление“, отнормированное на диаметр прессовки (штриховые линии), и давление, действующее на уплотняемый порошок (сплошные линии) в зависимости от времени. Линии, T_0 : 1 — $T_{0, \text{exp}}$, 2 — $2T_{0, \text{exp}}$, 3 — $3T_{0, \text{exp}}$, 4 — $5T_{0, \text{exp}}$, 5 — $8T_{0, \text{exp}}$. Зарядное напряжение $U_0 = 2.0 \text{ kV}$, концентратор — К1, порошок — α -IAM, его масса $m_p = 1.5 \text{ g}$.

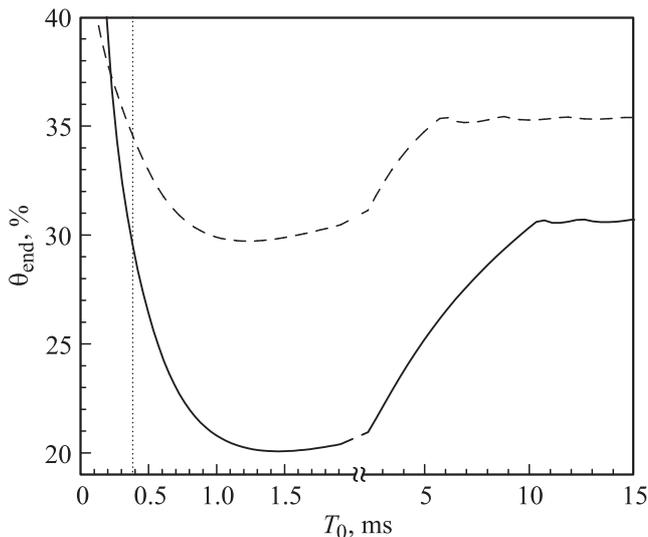


Рис. 11. Конечная пористость прессовки в зависимости от полупериода собственных колебаний контура $T_0 = \pi \sqrt{cL(0)}$. Сплошная линия — порошок δ -AM, штриховая линия — α -IAM. Зарядное напряжение $U_0 = 2.0 \text{ kV}$, концентратор — К1, масса порошка $m_p = 1.5 \text{ g}$. Вертикальная пунктирная линия отмечает значение $T_{0, \text{exp}} = 383 \mu\text{s}$, характерное для экспериментальной установки.

При этом давление прессования достигает значения $p_n = 2.24 \text{ GPa}$, что существенно превышает „квазистатический уровень“ (порядка 1.5 GPa), в качестве которого можно рассматривать давление магнитного поля на концентратор, отнормированное на площадь прессовки (штриховые линии на рис. 10). Этот ощутимый выигрыш

по давлению достигается за счет наиболее эффективного использования инерционных свойств ударника. Важно отметить, что магнитное давление на концентратор и, соответственно, на индуктор при этом не увеличивается, а, наоборот, уменьшается, что должно способствовать сохранности оборудования. Увеличение давления на прессуемое изделие соответствует достижению меньших значений пористости (рис. 11). Например, для условий, соответствующих рис. 11, переход к оптимальному значению T_0 дает уменьшение конечной пористости на 4.9% для порошка α -IAM и на 9.4% для порошка δ -AM. Дальнейшее увеличение T_0 приводит к рассогласованию описанных „резонансных“ условий прессования: время прессования становится меньше времени нарастания внешнего „магнитного“ давления. Конечная плотность прессовки при этом повышается и выходит в области больших значений T_0 на некоторый „квазистатический“ уровень.

Интересная модификация магнитно-импульсного пресса недавно была предложена и реализована экспериментально в Томске [22]. Используются два ударника, которые двигаются навстречу друг другу и уплотняют находящуюся между ними порошковую заготовку. Соответствующие индукторы соединены последовательно. Несомненный интерес представляет анализ данной схемы прессования в рамках сформулированной выше теоретической модели. Будем полагать, что индукторы и ударники попарно идентичны, и каждый индуктор характеризуется зависимостью $L_i(z)$, согласно (2), с параметрами для концентратора К1. Тогда эффективные индуктивность и сопротивление контура даются соотношениями

$$L(x) = 2L_i(z_0 + x) + \Delta L, \quad R = 2R_i + R_c, \quad (14)$$

а пористость прессовки связана со смещением x каждого из ударников выражением

$$\theta = 1 - \frac{1 - \theta_0}{1 - 2x/h_0}. \quad (15)$$

Сопоставление односторонней и двухсторонней схем прессования на примере порошка α -IAM представлено на рис. 12. Увеличение суммарной индуктивности в двухсторонней схеме приводит к уменьшению амплитуды тока в контуре и, как следствие, к уменьшению „магнитной“ силы, действующей на каждый из ударников. Тем не менее, силовое воздействие на порошок не уменьшается, а, как видно по рис. 12, увеличивается, что приводит к уменьшению конечной пористости компакта с 34.8% (одностороннее прессование) до 29.6% (двухстороннее прессование). Это происходит в основном, благодаря исключению из процесса эффективной упругости установки. Теперь весь импульс, дошедший до порошка, идет на его прессование, а не тратится на упругое деформирование нижележащих частей пресса. Положительным фактором является также увеличение периода собственных колебаний контура, обусловленное

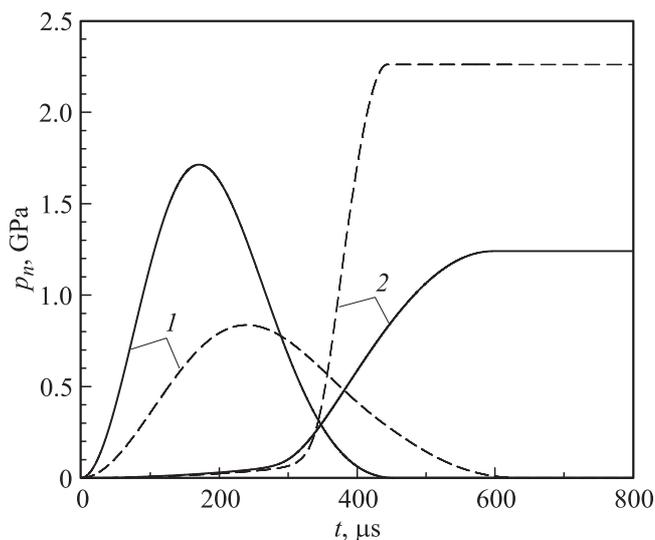


Рис. 12. „Магнитное давление“, отнормированное на диаметр прессовки (линии 1), и давление, воздействующее на уплотняемый порошок (линии 2) в зависимости от времени. Сплошные линии — одностороннее прессование, штриховые линии — двухстороннее прессование. Зарядное напряжение $U_0 = 2.0$ kV, концентратор — К1, порошок — α -IAM, его масса $m_p = 2$ g.

увеличением его индуктивности. Это смещает режим работы установки в сторону „резонансных“ условий прессования, проанализированных выше. Отметим также, что двухсторонний режим характеризуется существенно более высоким КПД, чем односторонний. Так, при зарядном напряжении $U_0 = 2.0$ kV для порошка α -IAM в двухстороннем режиме имеем $\eta_p = 3.7\%$, тогда как в одностороннем — 1.5% . Увеличение полного КПД, в основном обусловлено повышением КПД ударника, η_u . Если при одностороннем прессовании $\eta_u \rightarrow 0$ как в области высоких зарядных напряжений, так и в пределе малых величин U_0 (рис. 7), то при двухстороннем прессовании значение η_u слабо зависит от зарядного напряжения и составляет примерно 69% .

Заключение

Построена математическая модель одноосного магнитно-импульсного прессования порошков. Модель включает согласованное решение уравнений, описывающих динамику импульсного магнитного поля, и динамику механической системы (подвижные части пресса и уплотняемый порошок), и учитывает такие факторы, как диссипативные потери на контактных границах трения, упругие свойства установки, инерционные свойства подвижных частей пресса. Поведение уплотняемого порошка описывается в рамках теории пластично упрочняющегося пористого тела. Прямое сопоставление показало, что построенная теоретическая модель позволяет надежно воспроизводить результаты натуральных экспериментов.

Теоретически изучено влияние таких параметров, как масса уплотняемого порошка и масса разгоняемых частей пресса (ударника), на конечную плотность компакта и эффективность процесса магнитно-импульсного прессования. Показано, что уменьшение массы порошка (m_p) позволяет несколько повысить конечную плотность прессовки, однако эффективность процесса при этом резко снижается: полный КПД пресса стремится к нулю в пределе $m_p \rightarrow 0$. Более перспективным представляется уменьшение массы ударника. Расчеты показали, что наибольшей эффективностью обладал бы пресс с массой ударника M_u порядка 1 kg. Это позволило бы уменьшить конечную пористость на $5-6\%$ и повысило бы КПД установки примерно в 2 раза по сравнению с используемым стальным ударником массой $M_u \approx 5.7$ kg. Довольно высокие требования к прочностным характеристикам ударника препятствуют столь ощутимому уменьшению его массы. Экспериментально данные теоретические предсказания подтверждаются при использовании более легких алюминиевых ударников массами около 3 kg.

Проанализированы возможные способы существенного повышения конечной плотности компакта при заданном значении зарядного напряжения емкостного накопителя. Первый способ состоит в варьировании периода собственных колебаний электрического контура. Когда время увеличения тока в контуре становится равно (приблизленно) времени реализации процесса прессования (время до остановки ударника), наблюдается своеобразный резонанс — сила воздействия ударника на порошок может существенно превосходить амплитуду силы магнитного поля на ударник. Данный эффект достигается за счет максимально эффективного использования инерционных свойств ударника. Второй способ состоит в использовании двух симметрично расположенных ударников, которые разгоняются двумя последовательно соединенными индукторами [22]. Данная схема позволяет более, чем в 2 раза, повысить КПД процесса. Достигается это, как показал проведенный анализ, за счет исключения из динамики процесса упругих свойств установки. Отметим, однако, что последний способ требует существенной модернизации оборудования.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 12-08-00976), Уральского отделения РАН (проект фундаментальных исследований № 12-У-2-1029) и Министерства образования и науки Российской Федерации (грант 11.G34.31.0051).

Список литературы

- [1] Sandstrom D.J. // Metal Progr. 1964. Vol. 86. N 3. P. 215–221.
- [2] Муронов В.А. Магнитно-импульсное прессование порошков. Рига: Зинатне, 1980. 194 с.
- [3] Ivanov V.V., Paranin S.N., Vikhrev A.N., Boehme R., Schumacher G. // Proc. of Conf. FOURTH EURO CERAMICS. Italy. 1995. Vol. 2. P. 169–176.

- [4] Добров С.В., Иванов В.В. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 4. С. 35–41.
- [5] Алиханов С.Г., Будкер Г.И., Кичигин Г.Н., Комин А.В. // ПМТФ. 1966. № 4. С. 38–41.
- [6] Новгородцев А.Б., Шнейерсон Г.А. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1970. № 2. С. 154–161.
- [7] Андреев А.В., Бондалетов В.Н. // Электричество. 1973. № 10. С. 36–41.
- [8] Иванов В.В. // Электричество. 1998. № 1. С. 37–40.
- [9] Скороход В.В. Реологические основы теории спекания. Киев: Наукова думка, 1972. 152 с.
- [10] Штерн М.Б., Сердюк Г.Г., Максименко Л.А., Трухан Ю.В., Шуляков Ю.М. Феноменологические теории прессования порошков. Киев: Наукова думка, 1982. 140 с.
- [11] Болтачев Г.Ш., Волков Н.Б., Добров С.В., Иванов В.В., Ноздрин А.А., Паранин С.Н. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 10. С. 58–67.
- [12] Болтачев Г.Ш., Волков Н.Б., Иванов В.В., Паранин С.Н. // ПМТФ. 2008. № 2. С. 211–215.
- [13] Boltachev G.Sh., Nagayev K.A., Paraniin S.N., Spirin A.V., Volkov N.B. Magnetic Pulsed Compaction of Nanosized Powders. NY: Nova Science Publishers, Inc., 2010.
- [14] Boltachev G.Sh., Volkov N.B., Ivanov V.V., Kaygorodov A.S. // Acta Mechanica. 2009. Vol. 204. N 1–2. P. 37–50.
- [15] Boltachev G.Sh., Kaygorodov A.S., Volkov N.B. // Acta Mechanica. 2009. Vol. 207. N 3–4. P. 223–234.
- [16] Koton Yu.A. // J. Nanopart. Res. 2003. Vol. 5. N 5–6. P. 539–550.
- [17] Иванов В.В., Ноздрин А.А. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 13. С. 76–80.
- [18] Ноздрин А.А., Иванов В.В., Вихрев А.Н. // Приборы и техника эксперимента. 1997. № 2. С. 126–130.
- [19] Ноздрин А.А. // Перспективные материалы. 2007. № 6. С. 79–85.
- [20] Иванов В.В., Ноздрин А.А., Паранин С.Н. Установка магнитно-импульсного прессования наноразмерных порошков // Патент РФ № 2422245 от 27 июня 2011, бюл. № 18.
- [21] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 248 с.
- [22] Иващутенко А.С. Корундово-циркониевая нанокерамика, полученная с использованием высокоинтенсивных потоков энергии. Томск: ТПУ, 2010.