

# Радиальный магнитно-импульсный пресс совмещенной электродинамической и индукционной системы

АКАРАЧКИН С.А., АННЕНКОВ Ю.М., ИВАШУТЕНКО А.С., СИВКОВ А.А.

*Разработана математическая модель радиального магнитно-импульсного (РМИ) прессы, имеющего совмещенную электродинамическую и индукционную систему. На основе данных моделирования сконструирован и изготовлен РМИ-пресс для прессования керамических нанопорошков, способный работать в широком интервале длительности разряда генератора импульсных токов (ГИТ) и позволяющий проводить предварительную дегазацию нанопорошков перед прессованием. Изучено влияние параметров ГИТ и предварительной дегазации на плотность компактов из корундоциркониевых нанопорошков.*

**Ключевые слова:** радиальный магнитно-импульсный пресс, горячая дегазация, математическая модель, нанокерамика

В Томском политехническом университете разрабатывается технология производства нанокерамики, основанная на высокоэнергетических воздействиях, таких как магнитно-импульсное (МИ) прессование и активированное спекание. Необходимость перехода при производстве нанокерамики от статических способов «компактирования» к динамическим обусловлена высокой поверхностной энергией нанопорошков, что приводит к развитию нежелательных процессов: высокое межчастичное трение, значительная адсорбция примесных атомов и интенсивная агрегация частиц, способствующая снижению коэффициента диффузии при спекании.

В работах, рассмотренных в [1, 2], по осевому одно- и двухстороннему МИ-прессованию корундоциркониевых нанопорошков была достигнута относительная плотность компактов порядка 70% теоретического значения при прикладываемом давлении 1,4 ГПа. Однако в ряде областей промышленности и техники существует потребность в длинномерных керамических изделиях (трубы, заготовки для производства режущего инструмента и различные высоконагруженные детали машин и механизмов). Для их производства необходимо использовать радиальный способ прессования, позволяющий достичь по сравнению с осевой технологией более равномерного распределения плотности компакта по всему объёму.

В 60-е годы прошлого столетия впервые был проведен эксперимент по электродинамическому

*The mathematical model of a radial magnetic-pulse press constructed on the basis of a combined electrodynamic and induction system is developed. The data obtained from simulations carried out on the model were used to construct and manufacture a radial magnetic-pulse press for pressing ceramic nanopowders, which is able to operate in a wide range of durations of discharge impulses produced by the pulse current generator, and which makes it possible to degasify nanopowders prior to press them. The influence of the pulse current generator's parameters and preliminary degassing on the density of pressed corundum-zirconium nanopowders is studied.*

**Key words:** radial magnetic-pulse press, hot degassing, mathematical model, nanoceramics

прессованию порошка в трубе, сжимаемой импульсным магнитным полем собственного тока, схема Z-пинча. Позже также был реализован вариант электродинамического прессования «на раздachu». Широкое применение нашло радиальное индукционное сжатие металлических оболочек, известное как Q-пинч.

Схемы Z- и Q-пинчей различаются направлением тока в обжимаемом проводнике. Если ток протекает вдоль оси Z цилиндрического проводника и взаимодействует с собственным магнитным полем, изменяя траекторию движения электронов с прямолинейной на винтообразную, то это схема Z-пинча. В случае приложения к цилиндрическому проводнику внешнего продольного магнитного поля в проводнике индуцируется азимутальный ток, в результате взаимодействия которого с внешним магнитным полем происходит стягивание потока электронов к оси — это схема Q-пинча.

Радиальное магнитно-импульсное (РМИ) прессование использовалось для формирования длинномерных трубчатых заготовок из обычных микронных порошков металлов и керметов. В последние годы такое прессование применяется и для получения компактов из нанопорошков.

В Институте электрофизики УрО РАН (г. Екатеринбург) группой исследователей под руководством В.В. Иванова разработана конструкция РМИ-прессы, основанная на схеме Z-пинча, при которой осуществляется электродинамическое сжатие проводящей оболочки, наполненной нанопо-

рошком [3]. С его помощью была успешно проведена работа по РМИ-прессованию тонкостенных труб из нанопорошка состава  $ZrO_2 + 9,8 \text{ мол. \% } Y_2O_3$  до относительной плотности (42–51)%. Этой же группой авторов разработан РМИ-пресс по схеме Q-пинча, использующий индукционное сжатие оболочки полем внешнего многовиткового индуктора [4].

В статье [5] рассмотрено применение радиального магнитно-импульсного прессования нанопорошка состава  $(Al + 1,3 \text{ вес. \% } Mg)_2 O_3$  с предварительной механоактивацией (увеличенной насыпной плотностью) и вакуумированием. Прессование осуществлялось за счёт радиального сжатия проводящей оболочки импульсным магнитным полем в двух режимах: Z-сжатием с полупериодом импульса тока  $T_{1/2} \gg 15 \text{ мкс}$  и Q-сжатием с  $T_{1/2} \gg 90 \text{ мкс}$ . Амплитуда давления магнитного поля при этом составила примерно 0,24 ГПа. В результате были получены компакты с относительной плотностью  $\gamma_{\text{отн}}$  63% для Q-сжатия и 46% для Z-сжатия при теоретической плотности состава 3,66 г/см<sup>3</sup>. Относительная плотность  $\gamma_{\text{отн}}$  определялась следующим образом:

$$\gamma_{\text{отн}} = (\gamma_{\text{изм}} / \gamma_{\text{теор}}) 100\%,$$

где  $\gamma_{\text{изм}}$  и  $\gamma_{\text{теор}}$  – измеренная и теоретическая (рентгенографическая) плотность, г/см<sup>3</sup>.

Более плавное нарастание амплитуды давления магнитного поля при Q-сжатии позволило получить компакты с лучшими показателями относительной плотности. В случае Z-сжатия при коротких временах разряда генератора импульсных токов (ГИТ) велика вероятность развития ударно-волнового режима уплотнения порошковой среды, что ведет к образованию трещин в компакте. У каждого из рассмотренных способов РМИ-прессования есть особенности. При использовании Q-сжатия проблематично изготовить длиномерный многовитковый индуктор, способный выдержать большие динамические нагрузки. В случае Z-сжатия предъявляется жёсткое требование к собственной индуктивности ГИТ током (1–2) МА.

Актуальной задачей является разработка РМИ-пресса новой конструкции с максимальным КПД преобразования энергии электрического поля ёмкостного накопителя в работу по деформации проводящей оболочки, способного работать при длительности импульса ГИТ до 500 мс и развиваемом давлении прессования не менее 1 ГПа. В соответствии с этой задачей авторами был создан РМИ-пресс оригинальной конструкции, упрощённая модель которого представлена на рис. 1.

В конструкции пресса используется совмещённая схема сжатия проводящей оболочки Q- и

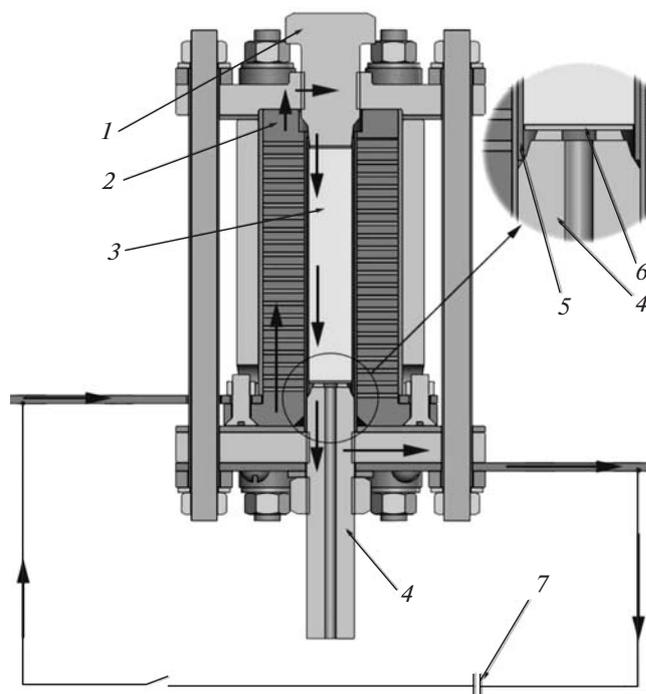


Рис. 1. Функциональная схема РМИ пресса: 1 – затяжной болт; 2 – индуктор; 3 – нанопорошок; 4 – полая ось; 5 – проводящая оболочка; 6 – металлический диск; 7 – батарея конденсаторов (ГИТ); стрелками показан путь протекания тока

Z-пинчей. Для надёжной фиксации витков медного индуктора (Q-пинч) применялись тороидальные вставки из стеклотекстолита с дополнительной промазкой компаундом УП-5-162-3 (Т). Корпус РМИ-пресса выполнен из стеклопластика, для чего проводилась намотка стеклоткани с послойной пропиткой тем же компаундом, что был применён для установки межвитковой изоляции. Таким образом, удалось создать монолитную конструкцию индуктора, способную выдерживать большие динамические нагрузки и значительно упростить систему электрической изоляции. Схема Z-пинча реализована включением проводящей оболочки последовательно индуктору в цепь ГИТ.

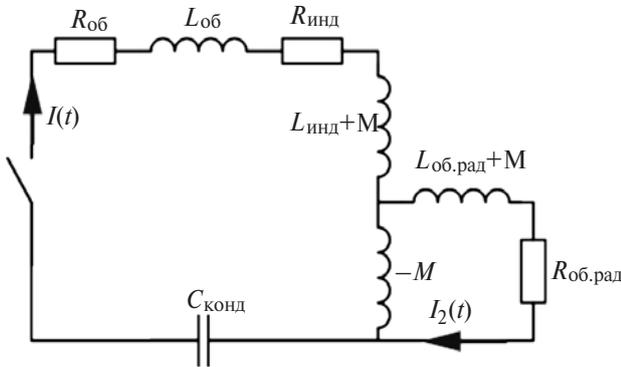
Совмещение схем Q- и Z-пинчей позволяет максимально использовать энергию электрического поля, запасённую в ёмкостном накопителе ГИТ, в работе по деформации – проводящей оболочки. Приведённая схема РМИ-пресса нечувствительна к значению собственной индуктивности ГИТ, теоретически способна работать в широком диапазоне длительности разряда от 100 мкс до 500 мс.

Нагрев оболочки при одновременном вакуумировании порошка, заключённого в ней, осуществляется пропусканием переменного тока частотой 50 Гц. Ток в этом случае протекает по следующим элементам конструкции пресса (рис. 1): нижняя ось 4, оболочка 5, прижимной болт 1. Расчётная температура нагрева нанопорошка 200 °С. Дегаза-

ция объёма оболочки осуществляется через полюю ось 4.

Перспективной является идея создания РМИ-пресса для горячего прессования. На пути реализации такой идеи стоит масса нерешённых вопросов. Нагрев нанопорошка при радиальной конструкции такого пресса вызовет разогрев индуктора. Поэтому возникает необходимость в замене материала индуктора (меди) на более жаропрочный, например нержавеющей сталь, что, однако, приведёт к существенному росту его активного сопротивления и соответственно потребуется повысить мощность ГИТ. С другой стороны, можно ограничиться интенсивным охлаждением индуктора, но с технической точки зрения это весьма затруднительно реализовать. Наиболее простую конструкцию РМИ-пресса для горячего прессования возможно создать по схеме Z-пинча, используя для нагрева оболочки отдельный охлаждаемый ВЧ-индуктор. По другому варианту нагрева можно пропускать ток через проводящую оболочку.

В первом приближении давление прессования определялось по расчётной модели, основанной на T-образной схеме замещения РМИ-пресса с учётом индуктивной связи между индуктором и проводящей оболочкой [6, 7] (рис. 2). В основу модели заложен процесс разряда конденсатора на RL-цепь.



**Рис. 2.** Схема замещения РМИ-пресса:  $L_{инд}$  – индуктивность индуктора, Гн;  $L_{об}$  – индуктивность оболочки в осевом направлении, Гн;  $R_{инд}$  – активное сопротивление индуктора, Ом;  $R_{об}$  – активное сопротивление оболочки в осевом направлении, Ом;  $M$  – взаимная индуктивность системы «индуктор–оболочка», Гн;  $L_{об,рад}$  – индуктивность оболочки в радиальном направлении, Гн;  $R_{об}$  – активное сопротивление оболочки в радиальном направлении, Ом;  $C_{конд}$  – ёмкостный накопитель, Ф

Усилие сжатия оболочки определяется суммой двух составляющих: силы Ампера  $F_A$  (Q-сжатие) и силы Лоренца  $F_L$  (Z-сжатие):

$$F(t) = F_L(t) + F_A(t);$$

$$F_L(t) = \frac{m_0 Q I(t) v}{\rho d_1};$$

$$F_A(t) = \frac{m_0 I(t) I_2(t)}{2DD} (dw + d_1),$$

где  $m$  – магнитная проницаемость среды, окружающей оболочку;  $Q$  – заряд, протекающий через оболочку, Кл;  $I$  – разрядный ток в индукторе, А;  $v$  – скорость движения электронов по оболочке в осевом направлении, м/с;  $d_1$  – наружный диаметр оболочки, м;  $I_2$  – индуцированный ток в оболочке, А;  $DD$  – расстояние между оболочкой и индуктором, м;  $d$  – средний диаметр индуктора, м;  $w$  – число витков индуктора.

В ходе экспериментов по РМИ-прессованию фиксировался ток в цепи ГИТ с помощью трансформатора тока и запоминающего осциллографа. Полученная экспериментально кривая тока отличалась от расчётной, период затухающих колебаний оказался примерно в 1,5 раза меньше. Такое несоответствие могло быть вызвано уменьшением индуктивности индуктора РМИ-пресса.

Дополнительно было проведено моделирование процесса РМИ-прессования в программе COMSOL Multiphysics. Данный программный пакет предназначен для конечно-элементного (КЭ) моделирования в различных областях физики, включая связанные (мультифизические) задачи. Работа COMSOL Multiphysics строится на численном решении дифференциальных уравнений в частных производных. Результаты КЭ-моделирования свидетельствуют о неравномерной плотности тока по сечению витков, наибольшее значение наблюдается вблизи внутренней поверхности индуктора 2 (рис. 1). При протекании тока по внешним слоям витка свободные электроны проходят больший путь из-за винтообразной конструкции индуктора. Этот эффект выражается в увеличении электрического сопротивления в удалённых слоях витка, а также снижении эффективной индуктивности индуктора. Образованная таким образом пространственная область с повышенной плотностью тока, расположенная на внутренней поверхности индуктора, генерирует нестационарное в пространстве и по времени магнитное поле, чьи силовые линии пересекают области витков, удалённые от центра, и индуцирует в них переменный ток, направление которого может быть противоположным основному току индуктора. Сложный характер изменения давления магнитного поля на проводящую оболочку близок к виду огибающей затухающих гармонических колебаний (рис. 3).

По результатам КЭ-моделирования максимум развиваемого давления достигается на первой полуволне расчётной кривой и его значение близко к данным T-модели с учётом поправки на изменение индуктивности индуктора. Во второй полуволне на

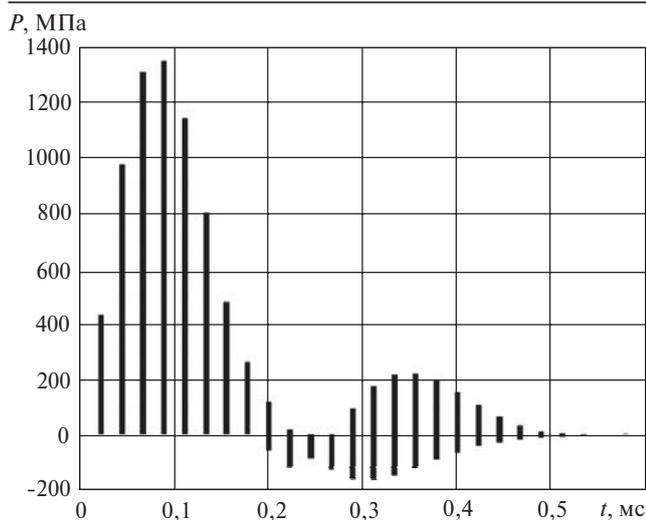


Рис. 3. Изменение давления сжатия проводящей оболочки при параметрах ГИТ:  $C = 6$  мФ,  $U = 2$  кВ

оболочку действуют одновременно как сжимающие усилия, так и растягивающие, что обусловлено возникновением в сечении витков индуктора разнонаправленных токов. Суммарное усилие, воздействующее на оболочку, в этом случае близко к нулю, и им можно пренебречь.

На сегодня нет возможности на практике измерить давление, развиваемое РМИ-прессом. Достоверность расчетных данных доказана сопоставлением близких результатов независимых методик: КЭ-моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics и расчётной модели на основе Т-образной схемы замещения.

Для РМИ-прессования нанопорошков использовалась конденсаторная батарея емкостью 4,8–14,4 мФ (зарядное напряжение  $U_C = 2$  кВ). Давление импульсного магнитного поля создавалось

преимущественно многовитковым индуктором, схема Q-пинча. Амплитудное значение тока в цепи ГИТ в данном случае не превышало 200 кА. Значение давления прессы по схеме Z-пинча меньше, чем при использовании схемы Q-пинча на порядок. Преобладающее влияние схемы Z-пинча в создании импульсного давления магнитного поля на оболочку проявляется при амплитуде тока ГИТ, близкой к 1 МА с длительностью фронта нарастания миллисекундного диапазона.

В исследовании использовались нанопорошки следующих составов: С1 —  $Al_2O_3$ , С2 — 96 вес. %  $ZrO_2$  + 4 вес. %  $Y_2O_3$ , С3 — 76 вес. %  $ZrO_2$  + 4 вес. %  $Y_2O_3$  + 20 вес. %  $Al_2O_3$ . Режим компактирования нанопорошков варьировался путем изменения ёмкости конденсаторной батареи, что отражалось на значении амплитуды и длительности создаваемого импульсного давления. В ходе каждого эксперимента определялась относительная плотность  $\gamma_{отн}$  полученных компактов в виде цилиндров длиной 100 мм и диаметром (13,2–14,4) мм. Результаты РМИ-прессования рассмотренных составов нанопорошков представлены в таблице.

Разработанный РМИ-пресс позволяет получать длинномерные бездефектные объёмные компакты с относительной плотностью до 71% из нанопорошка состава С1 в случае применения предварительной горячей дегазации. При компактировании тяжелых агломерированных нанопорошков составов С2 и С3 с высоким удельным весом достигнута относительная плотность около 40%. Запасённой кинетической энергии тонкостенной проводящей оболочки, выполняющей роль пресс-инструмента, оказалось недостаточно для разрушения крупных агломератов. С ростом давления прессования выше 1,14 ГПа в компактах наблюдается образование

Состав нанопорошка	Ёмкость конденсаторной батареи, мФ	Расчётное давление, ГПа, при использовании		Относительная плотность, %	Параметры вакуумирования
		Т-модели	COMSOL		
С3	4,8	1,14	1,15	36	—
	4,8			36	0,1 атм., 200 °С
	7,2	1,66	1,52	35	—
	9,6	2,1	2,2	Произошел разрыв оболочки	
С2	4,8	1,14	1,15	40	—
	7,2	1,66	1,52	34	—
	9,6	2,1	2,2	Произошел разрыв оболочки	
С1	4,8	1,14	1,15	53	—
	4,8			51	0,1 атм., 200 °С
	6	1,4	1,35	65	—
	6	1,4	1,35	71	0,1 атм., 200 °С

объёмных трещин и, как следствие, снижение относительной плотности. Предварительная дегазация нанопорошка не повлияла на конечную плотность компактов.

В статье [8] установлено, что для оксида алюминия, допированного магнием, при осевом импульсном давлении ниже 1,8 ГПа наличие адсорбатов не ведёт к разрушению компактов и отчасти выступает как естественная смазка, снижающая межчастичное трение. Подобная зависимость наблюдалась для компактов из химически чистого оксида алюминия (см. таблицу) в случае радиального прессования давлением 1,14 ГПа. Применение предварительной горячей дегазации привело к незначительному снижению плотности образцов из-за возросшего межчастичного трения в процессе прессования. Плотность компактов, подвергнутых дегазации, при дальнейшем увеличении давления растёт быстрее по сравнению с компактами, содержащими адсорбаты. Давление выше 1,14 ГПа для состава С1 является пороговым, выше которого наличие адсорбатов затрудняет консолидацию наночастиц, механически препятствуя их сближению, создавая избыточное давление внутри компакта.

Можно предположить, что при РМИ-прессовании нанопорошков с теоретической плотностью, близкой к плотности состава С1, проявляется эффект порогового давления. При давлении ниже порогового значения такие нанопорошки целесообразно компактировать без удаления адсорбатов.

**Выводы.** 1. Создана расчетная модель РМИ-пресса, позволяющая оценить развиваемое давление прессования в зависимости от используемой энергии ёмкостного накопителя ГИТ. Проведено моделирование процесса сжатия проводящей оболочки импульсным магнитным полем в программном пакете COMSOL Multiphysics. Обе модели показали близкие результаты расчётов давления РМИ-пресса.

2. Экспериментально установлено, что конструкция пресса способна выдержать динамические нагрузки при развиваемом импульсном давлении до 3 ГПа. При сравнительно невысоких энергозатратах (12 кДж) получены бездефектные компакты из нанопорошков  $Al_2O_3$  с относительной плотностью 65%. Применение предварительной дегазации при температуре 200 °С позволило повысить данное значение до 71%.

3. Обнаружено наличие порогового давления РМИ-прессования, ниже значения которого

РМИ-компактирование нанопорошков с удельным весом, близком к этому показателю для  $Al_2O_3$ , эффективнее проводить без удаления адсорбатов. Для нанопорошков с преобладающим содержанием  $ZrO_2$  обнаружить пороговое давление не удалось, максимальная плотность компактов не превысила 40%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анненков Ю.М., Иванов В.В., Ивашутенко А.С., Кондрачук А.А. Эффективность методов прессования корундоциркониевых порошков различной дисперсности. – Изв. Томского политех. ун-та, 2005, т. 308, № 7.
2. Ивашутенко А.С., Анненков Ю. М., Иванов В.В. и др. Эффективность различных методов прессования корундоциркониевых порошков. – Новые огнеупоры, 2008, №10.
3. Никонов А.В. Применение радиального магнитно-импульсного сжатия проводящих оболочек для формирования компонентов электрохимических устройств: Автореф. дис. (Екатеринбург): УрО РАН ИЭ, 2010.
4. Котов Ю.А., Иванов В.В. Порошковые нанотехнологии для создания функциональных материалов и устройств электрохимической энергетики. – Вестник РАН, 2008, т. 78, № 9.
5. Болтачев Г. Ш., Волков Н. Б., Добров С. В. и др. Моделирование радиального магнитно-импульсного уплотнения гранулярной среды в квазистатическом приближении. – ЖТФ, 2007, т. 77, вып. 10.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1996.
7. Борисенко-Каравашкина Д.П. К причине сжатия пучка одноимённых зарядов. – Харьков: Эней, 1994, т. 1.
8. Кайгородов А.С., Иванов В.В., Паранин С.Н., Ноздрин А.А. Роль адсорбатов при импульсном прессовании нанопорошков оксидов. – Российские нанотехнологии, 2007, т. 2, №1.

*Авторы: Акарачкин Сергей Анатольевич закончил ТПУ в 2008 г. Аспирант кафедры электромеханических комплексов и материалов ТПУ.*

*Анненков Юрий Михайлович закончил ТПИ в 1962 г. Докторскую диссертацию «Дефектообразование и массоперенос в ионных структурах при интенсивном облучении ионизирующей радиацией» защитил в 2002 г. Профессор кафедры электромеханических комплексов и материалов ТПУ.*

*Сивков Александр Анатольевич закончил ТПИ в 1975 г. Докторскую диссертацию «Взрывная коммутация и электромагнитное ускорение масс» защитил в 2002 г. Профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий ТПУ.*

*Ивашутенко Александр Сергеевич закончил ТПУ в 2004 г. Кандидатскую диссертацию «Корундоциркониевая нанокерамика, полученная с использованием высокоинтенсивных потоков энергии» защитил в 2010 г. Заведующий кафедрой электромеханических комплексов и материалов ТПУ.*