# ТЕХНОЛОГИЯ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КЕРАМИК ПРАКТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

## Е.К. Папынов, О.О. Шичалин, И.Г. Тананаев, В.А. Авраменко

*ФГБУН «Институт химии Дальневосточного отделения РАН», Владивосток*

*ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток*

[Papynov@mail.ru](mailto:Papynov@mail.ru)

Технология искрового плазменного спекания (ИПС) является мировым трендом в области создания ультрасовременных керамик уникального функционального назначения, обладающих превосходными эксплуатационными характеристиками и чрезвычайно востребованных промышленностью и современным обществом. Концепция технологии заключается в воплощении инновационных механизмов обработки (консолидации/спекания) порошковых материалов, которые ранее не были достигнуты традиционными способами порошковой металлургии. Передовая исключительность технологии выражается в высокоскоростной консолидации дисперсных материалов неограниченного химического и фракционного состава, за счет электроимпульсного нагрева при механической нагрузки. Параметры обработки дисперсных систем в электрическом поле постоянного импульсного тока, с возможностью разогрева до 1000 °С/мин при силе тока в 1,0-10 кА импульсного типа с периодичностью 3,3-329 мс в режиме On/Off, а также с учетом прикладываемой силы сдавливания до 250 kH, позволяют опережать активный рост зерна консолидируемого порошка, тем самым формируя структурные особенности нанокерамики.

Фундаментальная характеристика технологии ИПС весьма обширна и не имеет однозначного обоснования, в виду исключительной сложности физической картины всего процесса, связанного с наложением целого ряда механических, теплофизических и электрофизических эффектов [1]. Однако, несмотря на это, совокупность таких доказанных и возникающих при ИПС процессе физических явлений, как генерация тепла Джоуля-Ленца, электромиграция, электропластичность, пондеромоторные силы, эффект перколяции, электромагнитный эффект «пинча», эффект Пельтье, электротранспорт, поляризация, корреляционные эффекты, межфазные реакции, диффузия атомов и др., дает возможность исключительно варьировать составом и структурной архитектурой получаемых керамик, включая операции с далеко неравновесными нано- и микроструктурными системами.

Кроме этого, неоспоримыми технологическими преимуществами ИПС технологии перед традиционными методами являются низкие температуры синтеза (в среднем ниже на 300 °С), высокая скорость разогрева (среднее 150-200 °С/мин) и охлаждения (400 °С/мин), короткое время термовыдержки (минуты), одновременное спекание и прессование (одностадийность), не требуется введение спекающих добавок, возможность достижения максимальной плотности материала (100 % от теоретического значения).

Результат такого технологического подхода в рамках настоящего исследования были воплощены в виде создания эксклюзивных и практически ориентированных наноструктурированных материалов, в частности:

* магнитная керамика на основе композитных систем (Fe/Fe3O4,Fe3O4/α-Fe2O3, Co/Sm), с намагниченностью насыщения (Ms) ~150 эме/г, коэрцитивной силой (Hc) ~4-3000 Э, площадью удельной поверхности (Sуд) ~10 м2/г, механической прочностью при сжатии (σсж)~250 МПа [2]. Область применения – электротехника (постоянные магниты, сегнето- и пьезоэлектрики, конденсаторы и др.);
* сверхвысокотемпературная карбидокремниевая керамика (SiC и HfB2-SiC), пористость до 30%, устойчивая в потоке диссоциированного воздуха при температуре разогрева >2600 ºС [3]. Область использования - авиация и ракетостроение (носовые обтекатели и острые кромки крыльев летательных аппаратов и боеголовок);
* биоактивная/инертная керамика на основе CaSiO3, ZrO2, TiO2 и их композитных форм с ГАП, ТКФ и благородные металлы, с бимодальной пористой структурой (размер пор 100-500 нм и 1-500 мкм), площадь удельной поверхности (Sуд) ~10 м2/г, механическая прочность при сжатии (σсж) ~50-400 МПа [4]. Область использования – хирургия, костная инженерия (импланты/искусственные матриксы, каркасы для восстановления, замещения, регенерации поврежденных костных тканей);
* керамические и стеклокерамические матрицы различного состава для иммобилизации радионуклидов, количество вмещаемых радионуклидов от 20 масс.%, скорость выщелачивания по 137Cs, 90Sr не менее 10-6-10-7 г/см2⋅сут, механическая прочность при сжатии ~490 МПа, погрешность при дозировании удельной активности ±5 масс.% [5]. Область применения – атомная промышленность/радиоизотопная продукция (источники ионизирующего излучения, РИТЭГи, радионуклидные сорбционные генераторы, единицы хранения ТРО и др.);
* ядерная керамика на основе диоксида урана (UO2), с высокой плотностью таблеточного изделия 97,5–98,4 % от теоретического значения, с полным отсутствием примеси углерода и средним размером зерна не более 3 мкм [6]. Область применения – атомная промышленность (керамическое ядерное топливо);
* прозрачная (оптическая) керамика на основе иттрий-алюминиевого граната (ИАГ) допированного неодимом Nd3+:Y3Al5O12, с высоко гомогенной структурой со средним размером частиц ~710 нм и величиной пропускания света в диапазоне видимых волн более 75% [7]. Область применения – лазерная оптика (высокоапертурный лазерный элемент, оптические линзы, люминесцирующие экраны и др.).

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 17-73-20097).

Литература

1. Anselmi-Tamburini U., Groza J.R., Critical assessment : electrical field/current application – a revolution in materials processing/sintering? // Mater. Sci. Technol. – 2017. P. 1–8.
2. Papynov E.K., Tkachenko I.A., Portnyagin A.S., Modin E.B., Avramenko V.A.. Fabrication of magnetic ceramic materials based on nanostructured hematite powder by spark plasma sintering // ARPN J. Eng. App. Sci. – 2016. - Vol. 11, № 9. – P. 5864-5870.
3. Simonenko E.P., Simonenko N.P., Papynov E.K., Shichalin O.O., Golub A.V., Mayorov V.Yu, Avramenko V.A., Sevastyanov V.G., Kuznetsov N.T. Preparation of porous SiC-ceramics by sol – gel and spark plasma sintering // J. SG. Sci. Tech. – 2017. – Vol. 82. – P. 748-759.
4. Papynov E.K., Shichalin O.O., Mayorov V.Yu., Modin E.B., Portnyagin A.S., Gridasova E.A., Agafonova I.G., A.E. Zakirova, Tananaev I.G., Avramenko V.A. Sol-gel and SPS combined synthesis of highly porous wollastonite ceramic materials with immobilized Au-NPs // Cer. Int. – 2017. – Vol. 43. – P. 8509-8516.
5. Papynov E.K., Shichalin O.O., Mayorov V.Yu., Modin E.B., Portnyagin A.S., Tkachenko I.A., Belov A.A., Gridasova E.A., Tananaev I.G., Avramenko V.A. Spark Plasma Sintering as a High-Tech Approach in a New Generation of Synthesis of Nanostructured Functional Ceramics // Nanotech. Rus. – 2017. - Vol. 12, № 1–2. – P. 49–61.
6. Махров П.В., Папынов Е.К. Применение технологии электроимпульсного спекания под давление для производства топливных таблеток UO2 // Тезисы докладов Седьмой Российской школы по радиохимии и ядерным технологиям - 2016 г. – С.112-113
7. Kosyanov D.Yu., Yavetskiy R.P., Vorona I.O., Shichalin O.O., Papynov E.K., Vornovskikh A.A. , Kuryavyi V.G., Vovna V.I., Golokhvast K.S., Tolmachev A.V. Transparent 4 at% Nd3+:Y3Al5O12 Ceramic By Reactive Spark Plasma Sintering // AIP Conf. Proc. – 2017. – Vol. 1874. – Art. no. 040017.