

Научная статья

УДК 666.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-74-86

## ФОРМИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КЕРАМИКЕ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ СВОЙСТВ (обзор)

С.В. Житнюк<sup>1</sup>, П.Н. Медведев<sup>1</sup>, О.Ю. Сорокин<sup>1</sup>, А.А. Качаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Рассмотрены основные достижения в области получения керамических материалов с преимущественной кристаллографической ориентацией зерен. Показано, что керамика, для которой характерно наличие кристаллографической текстуры, обладает повышенными свойствами в определенных направлениях в сравнении с бестекстурными материалами. Развитие фундаментальных исследований, направленных на выявление процессов формирования текстуры, способствует разработке керамики с регулируемыми свойствами, востребованной во многих областях промышленности.

**Ключевые слова:** кристаллографическая текстура, керамика, дифракционные методы исследования, микроструктура, определение свойств

**Для цитирования:** Житнюк С.В., Медведев П.Н., Сорокин О.Ю., Качаев А.А. Формирование кристаллографической текстуры в поликристаллической керамике как способ повышения свойств (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-74-86.

Scientific article

## FORMATION OF CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE IN POLYCRYSTALLINE CERAMICS AS A WAY TO ENHANCE PROPERTIES (review)

S.V. Zhitnyuk<sup>1</sup>, P.N. Medvedev<sup>1</sup>, O.Yu. Sorokin<sup>1</sup>, A.A. Kachaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** Considers the main achievements in the field of obtaining ceramic materials with a predominant crystallographic orientation of grains. It is shown that ceramics, which is characterized by the presence of a crystallographic texture, has increased properties in specific directions in comparison with non-textural materials. The development of fundamental research aimed at identifying the processes of texture formation contributes to the obtaining of ceramics with adjustable properties, which are in demand in many areas of industry

**Keywords:** crystallographic texture, ceramics, diffraction research methods, microstructure, property determination

**For citation:** Zhitnyuk S.V., Medvedev P.N., Sorokin O.Yu., Kachaev A.A. Formation of crystallographic texture in polycrystalline ceramics as a way to enhance properties (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-74-86.

## Введение

Свойства керамики определяются сочетанием как микроструктурных, так и кристаллографических характеристик. Внутреннее строение керамических материалов удовлетворяет требованиям большинства областей промышленности благодаря усреднению анизотропных свойств, характерных для многих кристаллических структур [1–7]. Однако повышение таких свойств, как теплопроводность, износостойкость, механическая прочность, электропроводность и др. в большинстве случаев возможно за счет получения анизотропных структур, характерных для монокристаллов. Каждое зерно в поликристаллической структуре является монокристаллом с предельным уровнем анизотропии, а преимущественная ориентировка зерен материала приводит к некоторой степени анизотропии физико-механических свойств изделия в целом. Формирование предпочтительной кристаллографической ориентации зерен широко используется для повышения свойств, особенно когда применение монокристаллов нецелесообразно или невозможно. Керамика с такой структурой обладает эксплуатационными характеристиками, близкими к свойствам монокристалла, но механической прочностью поликристаллического материала. Примерами керамики с кристаллографической текстурой являются магнитные устройства, пьезоэлектрики, сверхпроводники, оптически прозрачная керамика и многие другие [8, 9].

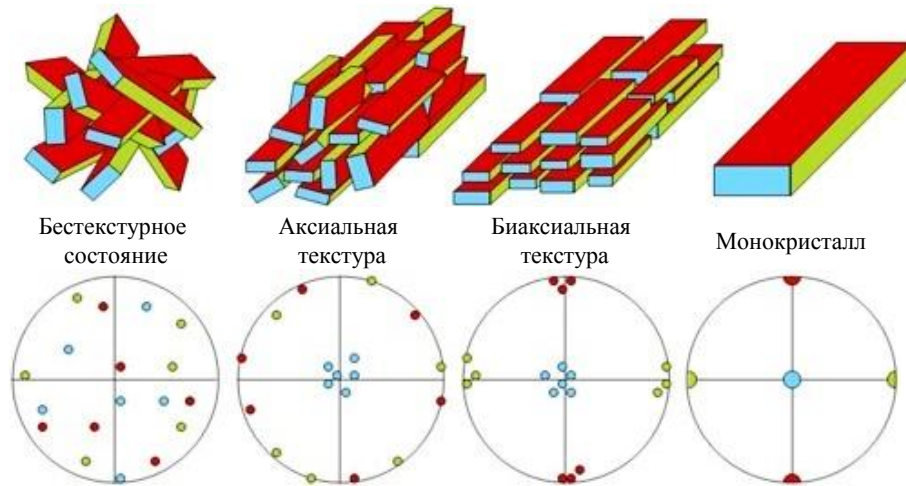
Следует отметить, что сформировать кристаллографическую текстуру в керамике значительно сложнее, чем в металлических системах, где она возникает или изменяется за счет пластической деформации и при гораздо более низких температурах. Однако за последние десятилетия разработаны методы, позволяющие получить керамические материалы с острой текстурой. Среди них – золь-гель метод, шликерное литье под воздействием магнитного поля, процесс биаксиального текстурирования подложки с помощью прокатки (Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate – RABiTS), метод «порошок в трубе» (Powder-in-tube – PIT) и др. [10–14].

В данной работе рассмотрены основные достижения в области получения керамических материалов с преимущественной кристаллографической ориентацией зерен. Развитие фундаментальных исследований, направленных на выявление процессов формирования текстуры, способствует разработке керамики с регулируемыми свойствами, востребованной во многих областях промышленности.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 14.1. «Конструкционные керамические материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

## Методы измерения кристаллографической текстуры

Кристаллографическая текстура описывает любую неслучайную ориентацию зерен в материале. Однако наибольший интерес представляют аксиальные (неограниченные) и биаксиальные (ограниченные) текстуры, так как при таких типах ориентации наблюдают повышение свойств или их приближение к свойствам монокристалла [15]. В аксиальной текстуре одно кристаллографическое направление каждого зерна ориентировано вдоль глобальной оси во всем образце, остальные же ориентированы случайным образом. Для биаксиальной текстуры в каждом зерне характерны фиксированные в одном определенном положении кристаллографическая плоскость и направление, лежащее в этой плоскости. На рисунке представлена схематическая иллюстрация возможных текстурных состояний с соответствующими стереографическими проекциями в керамике с ромбической кристаллической решеткой.



Схематическая иллюстрация и стереографические проекции возможных текстурных состояний в керамике с ромбической кристаллической решеткой [8]

Выявление взаимосвязи между ориентацией зерен в объеме материала и его свойствами требует описания и анализа текстуры. Для исследования текстуры чаще всего применяют методы дифракции электронов, нейтронов, рентгеновского излучения. Проникающая способность электронов и рентгеновского излучения меньше, чем нейтронов. Поэтому для керамики, препятствующей распространению рентгеновского излучения (например, содержащей свинец), метод дифракции нейтронов является более предпочтительным [8].

Для описания текстурного состояния используют методы построения прямых и обратных полюсных фигур, функций распределения разориентировок, кривой качания, а также определяют степень ориентации плоскостей определенного типа – фактор  $F$  (метод Лотгеринга). Прямые и обратные полюсные фигуры, а также функции распределения разориентировок демонстрируют достоверное описание текстур, но их построение для керамики, обладающей сложной кристаллической структурой, требует больших усилий и громоздко для представления [16]. В работе [17] предложен экспресс-метод оценки степени ориентированности структуры. Суть метода заключается в определении соотношения доли характеризующих текстуру пиков на дифрактограмме к доле всех пиков (иногда только к основному), а степень ориентации зеренной структуры описывается одним параметром – фактором  $F$ :

$$F_{(00l)} = (P_{(00l)} - P_0)/(1 - P_0), \quad (1)$$

$$P_{(00l)} = \Sigma I_{(00l)}/\Sigma I_{(hkl)}, \quad (2)$$

$$P_0 = \Sigma I_{0(00l)}/\Sigma I_{0(hkl)}, \quad (3)$$

где  $P_{(00l)}$  – доля интенсивностей пиков, характерных для плоскостей  $(00l)$  деформированных образцов;  $P_0$  – доля интенсивностей пиков, характерных для всех плоскостей беспорядочного эталона;  $\Sigma I_{(00l)}$  – сумма интенсивностей пиков, характерных для плоскостей  $(00l)$ , имп./с;  $\Sigma I_{(hkl)}$  – сумма интенсивностей пиков, характерных для всех плоскостей, имп./с [16].

Фактор  $F$  зависит от выбранного диапазона углов  $2\theta$  и является скорее качественной оценкой. Его значение лежит в пределах от 0 (беспорядочное состояние) до 1 (состояние с идеальной  $(00l)$  текстурой).

В настоящее время наиболее полную картину ориентации зерен и микроструктуры материалов дает метод дифракции обратноотраженных электронов (Electron

backscattered diffraction – EBSD). Этот метод позволяет получить данные с множества точек, которые возможно представить в виде прямых и обратных полюсных фигур, функции разориентировок и карт ориентации. Кроме того, существует возможность идентифицировать фазы, присутствующие в материале, а также количественно охарактеризовать микроструктуру.

### Керамические материалы с направленной кристаллографической структурой

#### *Керамика с магнитными свойствами*

Магнитные свойства имеют ярко выраженную зависимость от кристаллографического направления. В керамике электронные орбиты связаны в кристаллической решетке благодаря химическим связям, за счет чего спины электронов свободно ориентируются в магнитном поле, обуславливая основной вклад в величину магнитного момента [18].

Основная часть магнитной керамики представлена ферритами с кубической и гексагональной решетками. Эффект влияния текстуры на магнитные свойства впервые выявлен в соединении  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  с гексагональной решеткой и получен путем воздействия магнитного поля на суспензию, содержащую частицы  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ . Синтезированный материал обладал остаточной намагниченностью 0,37 Тл и коэрцитивной силой 1200 Э в направлении, параллельном базисной плоскости, в то время как для бестекстурного  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  соответствующие характеристики составляли 0,205 Тл и 2600 Э [19].

В настоящее время с появлением новых методов получения материалов интерес к магнитной керамике с кристаллографической текстурой возрос. Авторы работы [20] получили материал на основе  $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$  путем одноосного прессования в магнитном поле с последующим обжигом при температуре 1200–1280 °С. Керамика характеризовалась фактором  $F_{(001)}$ , варьирующимся от 0,3 до 0,5, что способствовало повышению остаточной намагниченности и снижению коэрцитивной силы в сравнении с бестекстурным  $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{19}$ . Сообщалось также о получении керамики на основе  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  методом реакционного пленочного литья, обладающей  $F_{(001)} = 0,81$ , намагниченностью насыщения 355 кА/м и остаточной намагниченностью 90 кА/м [21]. Другим примером может являться материал на основе  $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ , полученный методом реакционного пленочного литья, в котором наблюдали возрастание магнитной проницаемости и снижение коэрцитивной силы в параллельном базисной плоскости направлении уже при  $F_{(001)} = 0,39$  [22].

#### *Сверхпроводники*

Сверхпроводники – уникальный класс материалов, проявляющих отсутствие электрического сопротивления при температуре ниже критической. В 1986 г. обнаружена сверхпроводимость материала на основе  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  при температуре 93 К, что выше температуры кипения жидкого азота (77 К). Такое открытие позволило значительно снизить издержки, возникающие при охлаждении сверхпроводников. Кроме того, дальнейшие исследования привели к разработке целого ряда сверхпроводников на основе системы  $\text{Bi-Sr-Ca-Cu-O}$ , получаемых РИТ-методом. Данная технология позволяет не только синтезировать материалы с мелкозернистой структурой, но и контролировать текстурное состояние при относительно низких температурах [16, 23]. Так, в работе [24] сообщается о получении РИТ-методом сверхпроводящей проволоки из соединения  $\text{MgB}_2$ , которая при воздействии магнитного поля обладала критической плотностью тока  $\sim 10^4$  А/см<sup>2</sup> в параллельном направлении и  $\sim 10^3$  А/см<sup>2</sup> – в поперечном.

Критическая плотность тока ( $J_c$ ) зависит не только от ориентировки зерен относительно кристаллографических направлений. Установлено, что ее величина значительно убывает в зависимости от угла разворота зерен относительно друг друга даже при острой текстуре. Таким образом, острая биаксиальная текстура является необходимой для достижения высоких значений  $J_c$  [25].

В целом бестекстурная сверхпроводящая керамика характеризуется значениями  $J_c$  на уровне  $10\text{--}10^2$  А/см<sup>2</sup>, в то время как современные технологические подходы к формированию текстур позволяют повысить их до  $10^3\text{--}10^4$  А/см<sup>2</sup> [25].

### *Пьезоэлектрическая керамика*

Пьезоэлектрики широко применяются в различных областях производства в качестве генераторов и преобразователей напряжения, сенсорных датчиков, силовых приводов и др. В основе пьезоэффекта лежит доменная структура, обусловленная отсутствием центра симметрии в элементарной ячейке. В настоящее время большие усилия сосредоточены на создании направленной поликристаллической структуры по принципу ориентированных доменов [8].

Керамика, содержащая свинец, доминирует на рынке пьезоэлектриков благодаря высокому уровню электромеханических свойств. Опубликовано большое количество работ, направленных на исследование показателей материалов с острой текстурой. Авторы работы [26] получили керамику на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС) методом шликерного литья под воздействием магнитного поля. Материал характеризовался фактором  $F_{(001)} = 0,77$  и коэффициентом электромеханической связи  $k_{31} = 0,44$ , что на 30 % превысило соответствующее значение для бестекстурного образца. Известно также о получении керамики на основе соединения  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{--PbTiO}_3$  с добавкой 1 % (объемн.)  $\text{BaTiO}_3$ , обладающей фактором  $F = 0,98$  в направлении [001]. Электромеханические свойства синтезированного материала в значительной степени превосходили бестекстурный аналог: по пьезомодулям –  $d_{33} = 1000 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н,  $d_{31} = 371 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н и по тангенсу угла диэлектрических потерь –  $\text{tg}\delta = 0,6$  % [27].

Не менее важной характеристикой является температура Кюри ( $T_C$ ), ограничивающая возможности применения пьезоэлектриков. Исследования, направленные на повышение значений  $T_C$ , показали, что керамика на основе соединений  $\text{PbTiO}_3$ ,  $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{--Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{--PbTiO}_3$ ,  $\text{Pb}(\text{Yb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{--Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{--PbTiO}_3$  и  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{--Pb}(\text{Zr, Ti})\text{O}_3$  сохраняет работоспособность в интервале температур от 203 до 364 °С. Повышение данной характеристики связано с формированием острой кристаллографической текстуры [28–32].

В связи с ужесточением экологических стандартов во всем мире активно развивают технологии, с помощью которых можно найти альтернативу применению свинца. Пьезоэлектрики на основе соединений (К, Na)NbO<sub>3</sub>, (Bi<sub>1/2</sub>Na<sub>1/2</sub>)TiO<sub>3</sub> и BaTiO<sub>3</sub> являются наиболее привлекательной заменой керамике, содержащей свинец, так как не уступают ей по уровню свойств. Установлено, что добавки CuO, Li<sup>+</sup>, Ta<sup>5+</sup> и Sb<sup>5+</sup> способствуют получению материала на основе (К, Na)NbO<sub>3</sub>, обладающего фактором Лотгеринга в направлении [001] до 0,93 и пьезомодулем  $d_{33}$  – до  $390 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н, что сопоставимо с характеристиками керамики на основе ЦТС [33–35].

Керамику на основе соединений (Bi<sub>1/2</sub>Na<sub>1/2</sub>)TiO<sub>3</sub> и (Bi<sub>1/2</sub>K<sub>1/2</sub>)TiO<sub>3</sub> применяют в качестве концевых элементов электрических цепей. Модификация материала такими соединениями, как K<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Nb<sub>5</sub>O<sub>15</sub>, SrTiO<sub>3</sub>, Bi<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>12</sub>, NaNbO<sub>3</sub>, SrBi<sub>4</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>15</sub> и др., позволяет значительно повысить электромеханические свойства путем формирования острой кристаллографической текстуры [36–43].

Широкое применение также находят пьезоэлектрики на основе соединения  $\text{BaTiO}_3$ . Показано, что такая керамика, характеризующаяся  $F_{(001)} = 0,97$ , обладает пьезомодулем  $d_{33} = 274 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н, а материал с преимущественной кристаллографической ориентацией в направлении  $[110]$  демонстрирует  $d_{31} = 50 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н и  $d_{33} = 788 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н [44, 45].

#### *Теплопроводная керамика*

В керамике способность проводить тепло определяется строением кристаллической решетки. Соединения с легкими катионами, высокой энергией межатомной связи и менее плотной упаковкой атомов обладают более высокой теплопроводностью, чем вещества с тяжелыми катионами и сложными структурами [46]. Таким образом, наиболее распространенными теплопроводными материалами являются соединения  $\text{SiC}$ ,  $\text{AlN}$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , которые, в частности, применяют для изготовления радиаторов в электронике [8]. Такие соединения обладают кристаллической структурой средней симметрии, что приводит к анизотропии свойств в различных кристаллографических направлениях. Для нитрида алюминия и карбида кремния такая анизотропия невелика, а, например, для керамики на основе  $\text{AlN}$ , полученной методом шликерного литья под воздействием магнитного поля, теплопроводность составила  $164,7$  Вт/(м·К) в направлении преимущественной кристаллографической ориентации и  $154,6$  Вт/(м·К) – перпендикулярно данному направлению [47].

Напротив, для нитрида кремния анизотропия теплопроводности высока. Известно, что для керамики на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , полученной методом шликерного литья под воздействием магнитного поля, при  $F_{(001)} = 0,98$  теплопроводность в направлении преимущественной кристаллографической ориентации составила  $176$  Вт/(м·К), а в перпендикулярном направлении  $62$  Вт/(м·К) [48].

#### *Оптически прозрачная керамика*

За последние десятилетия число исследований в области создания оптически прозрачной керамики со светопропусканием  $>80\%$  в видимом и ближнем ИК-диапазоне значительно возросло. Интерес к таким материалам обусловлен уровнем мощности генерируемого лазерного излучения, сравнимым с монокристаллами [49]. В керамике с кубической кристаллической решеткой, такой как алюмомагнезиальная шпинель или иттрий-алюминиевый гранат, высокий уровень светопропускания достигим без намеренного формирования текстурного состояния, так как показатель преломления в таких соединениях изотропен. Для керамики с другими кристаллическими решетками характерна анизотропия показателя преломления в различных кристаллографических направлениях, что способствует снижению светопропускания при переходе световой волны от одного зерна к другому. По этой причине предприняты попытки получить керамические материалы с направленной структурой.

Авторы работы [50] получили керамику на основе оксида алюминия путем воздействия магнитного поля на шликер с последующим горячим изостатическим прессованием. Синтезированный материал обладал фактором Лотгеринга  $0,45$  и светопропусканием  $52\%$  при длине волны  $600$  нм. Согласно данным работы [51], применение аналогичного технологического подхода привело к получению образца поликристаллической алюмооксидной керамики со светопропусканием  $78\%$  при длине волны  $650$  нм, что составило  $84,5\%$  от светопропускания монокристалла сапфира.

Известно также о синтезировании материала с тетрагональной кристаллической решеткой на основе соединения  $\text{Sr}_{0,6}\text{Ba}_{0,4}\text{Nb}_2\text{O}_6$ , характеризующегося  $F_{(001)} = 1,0$  и светопропусканием  $50\%$  при длине волны  $1500$  нм [52], а также керамики с направленной

структурой на основе соединения  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ , перспективной в качестве альтернативы иттрий-алюминиевому гранату [53, 54].

### *Конструкционная керамика*

Конструкционная керамика обладает высоким уровнем физико-механических характеристик, однако ее применение ограничивается хрупкостью и широким интервалом значений прочности. Основным направлением создания преимущественной ориентации зерен в таких материалах является повышение твердости, прочности и трещиностойкости.

Так, согласно данным работы [55], методом горячего прессования при температуре 1800 °С и давлении 25 МПа получена керамика на основе SiC, модифицированная иттрий-алюминиевым гранатом, которую подвергали дополнительной термообработке при температуре 1900 °С и давлении 25 МПа. Синтезированный материал характеризовался преимущественной ориентацией зерен и обладал прочностью при изгибе  $1150 \pm 190$  МПа, твердостью по Виккерсу  $26,8 \pm 1,5$  ГПа и трещиностойкостью  $4,4 \pm 0,3$  МПа  $\sqrt{\text{м}}$  в плоскости, перпендикулярной оси прессования. Для горячепрессованного материала без дополнительной термообработки соответствующие показатели составили:  $640 \pm 70$  МПа,  $23,9 \pm 1,1$  ГПа и  $3,8 \pm 0,5$  МПа  $\sqrt{\text{м}}$ . Известно также о керамике на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , полученной методом экструзии с последующим обжигом. Свойства определяли в плоскости, параллельной оси экструзии, для образцов, содержащих зерна вытянутой формы и без таких зерен. В первом случае прочность при изгибе составила 1394 МПа, твердость по Виккерсу 17,0 ГПа и трещиностойкость  $9,7$  МПа  $\sqrt{\text{м}}$ , во втором: 930 МПа, 15,6 ГПа и  $5,7$  МПа  $\sqrt{\text{м}}$  соответственно [56].

Особый интерес представляют тройные карбиды и нитриды металлов (так называемые МАХ-фазы), обладающие слоистой структурой. Они сочетают свойства, характерные как для керамики, так и для металлов. Формирование направленной структуры в таких материалах приводит к повышению физико-механических свойств как в параллельной, так и в перпендикулярной плоскости относительно направления преимущественной ориентации зерен. Так, бестекстурный карбид  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  обладает прочностью при изгибе 320 МПа и трещиностойкостью  $6,9$  МПа  $\sqrt{\text{м}}$ . Формирование текстурного состояния путем воздействия магнитного поля на шликер с последующим искровым плазменным спеканием способствовало получению керамики со следующими свойствами: прочность при изгибе  $1261 \pm 232$  и  $1005 \pm 117$  МПа в перпендикулярной и параллельной плоскости относительно оси прессования, трещиностойкостью  $13,1 \pm 0,4$  и  $14,6 \pm 0,6$  МПа  $\sqrt{\text{м}}$  соответственно [57].

Следует отметить, что в последние десятилетия выявлена прямая зависимость свойств от остроты кристаллографической текстуры не только для материалов, описанных ранее, но и для применяемых в качестве ионных проводников, термоэлектрических элементов и теплозащитных покрытий [58–60]. Таким образом, разработка керамики с преимущественной кристаллографической ориентацией зерен является перспективным направлением материаловедения, решение задач которого позволит совершить качественный технологический рывок в самых разнообразных областях промышленности.

### **Заключения**

Исследования в области формирования текстурного состояния в поликристаллической керамике показывают, что совершенствование технологий и понимание процессов, обуславливающих возникновение преимущественной ориентации зерен, в значительной степени способствуют получению материалов с повышенными свойствами.

В большинстве вышеперечисленных работ синтезируемая керамика обладает аксиальной текстурой, в то время как получение биаксиальных текстур в таких материалах позволит приблизить значения их свойств к свойствам монокристаллов. Фундаментальные исследования, направленные на выявление механизмов формирования текстур, процессов межзеренного взаимодействия и роста зерен, позволят расширить область применения керамики и разработать новые материалы, обладающие уникальными свойствами.

#### Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Состояние и перспективы арктического материаловедения // *Вестник РАН*. 2017. Т. 87. № 9. С. 827–839.
3. Каблов Е.Н. Доминанта национальной технологической инициативы. Проблемы ускорения развития аддитивных технологий в России // *Металлы Евразии*. 2017. № 3. С. 2–6.
4. Лавров А.В., Яковлев Н.О., Ерасов В.С. К вопросу разрушения керамики при воздействии высокоскоростного индентора // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-88-94.
5. Лощинин Ю.В., Будиновский С.А., Размахов М.Г. Теплопроводность теплозащитных легированных оксидами РЗМ покрытий  $ZrO_2-Y_2O_3$ , полученных магнетронным нанесением // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 42–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-42-49.
6. Воронов В.А., Лебедева Ю.Е., Сорокин О.Ю., Ваганова М.Л. Исследование защитного действия покрытия на основе иттрийалюмосиликатной системы на карбидокремниевом материале в условиях воздействия окислительной атмосферы // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 4 (53). С. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-63-73.
7. Бабашов В.Г., Максимов В.Г., Варрик Н.М., Самородова О.Н. Изучение структуры и свойств керамических композиционных материалов на основе муллита // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 54–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-54-63.
8. Messing G.L., Poterala S., Chang Y. et al. Texture-engineered ceramics – Property enhancements through crystallographic tailoring // *Journal of Material Research*. 2017. Vol. 32. P. 3219–3241.
9. Seabaugh M.M., Kerscht I.H., Messing G.L. Texture development by templated grain growth in liquid-phase-sintered  $\alpha$ -alumina // *Journal of the American Ceramic Society*. 1997. No. 80. P. 1181–1188.
10. Tani T. Texture engineering of electronic ceramics by the reactive-templated grain growth method // *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2006. No. 114. P. 363–370.
11. Yilmaz H., Messing G.L., Trolrier-McKinstry S. (Reactive) templated grain growth of textured sodium bismuth titanate ( $Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3-BaTiO_3$ ) ceramics processing // *Journal of Electroceramics*. 2003. No. 11. P. 207–215.
12. Jin S., Sherwood R.C. et al. High TC superconductors-composite wire fabrication // *Applied Physics Letters*. 1987. No. 51. P. 203–204.
13. Goyal A., Feenstra R., List F.A. et al. Using RABiTS to fabricate high-temperature superconducting wire // *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 1999. No. 51. P. 19–23.
14. Sakka Y., Suzuki T.S. Textured development of feeble magnetic ceramics by colloidal processing under high magnetic field // *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2005. Vol. 113. P. 26–36.
15. Messing G.L., Trolrier-McKinstry T., Sabolsky E.M. et al. Templated grain growth of textured piezoelectric ceramics // *Critical Reviews in Solid State and Material Sciences*. 2004. No. 29. P. 45–96.
16. Кабинова Д.Б. Эволюция микроструктуры и текстуры при отжиге и деформации сверхпроводящей керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа: Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, 2020. 190 с.

17. Lotgering F.K.J. Topotactical reactions with ferromagnetic oxides having hexagonal crystal structures // *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*. 1959. No. 9. P. 113–123.
18. Кингери У.Д. Введение в керамику: пер. с англ. М.: Стройиздат, 1967. 499 с.
19. Stuijts A.L., Rathenau G.W., Weber G.H. Ferroxdure II and III, anisotropic permanent magnet materials // *Philips Technical Review*. 1954. Vol. 16. No. 5–6. P. 141–180.
20. Chen Y., Daigle A., Fitchorov T. et al. Electronic tuning of magnetic permeability in  $\text{Co}_2\text{Z}$  hexaferrite toward high frequency electromagnetic device miniaturization // *Applied Physics Letters*. 2011. No. 98. Art. 202502.
21. Jian G., Meng F., Zhou D. et al. Fabrication of textured  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  ceramics by novel RTGG method using rod-like  $\alpha\text{-FeOOH}$  particles as templates // *Materials Chemistry and Physics*. 2015. Vol. 162. P. 380–385.
22. Chang P., He L., Wei D. et al. Textured Z-type hexaferrite  $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$  ceramics with high permeability by reactive template grain growth method // *Journal of European Ceramic Society*. 2016. Vol. 36. P. 2519–2524.
23. Desgardin G., Monot I., Raveau B. Texturing of high- $T_C$  superconductors // *Superconductors science and technology*. 1999. Vol. 12. No. 7. P. 115–133.
24. Susner M.A., Daniels T.W., Sumption M.D. et al. Drawing induced texture and the evolution of superconductive properties with heat treatment in powder-in-tube in situ  $\text{MgB}_2$  strands // *Superconductors science and technology*. 2012. Vol. 25. Art. 065002.
25. Shi Y., Durrell J.H., Dennis A.R. et al. Multiple seeding for the growth of bulk GdBCO–Ag superconductors with single grain behavior // *Superconductors science and technology*. 2017. Vol. 30. Art. 015003.
26. Miwa Y., Kawada S., Kimura M. et al. Processing and enhanced piezoelectric properties of highly oriented compositionally modified  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  ceramics fabricated by magnetic alignment // *Applied Physics Express*. 2015. No. 8. Art. 041501.
27. Yan Y., Wang Y.U., Priya S. Electromechanical behavior of [001]-textured  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{--PbTiO}_3$  ceramics // *Applied Physics Letters*. 2012. Vol. 100. Art. 192905.
28. Chang Y., Wu J., Sun Y. et al. Enhanced electromechanical properties and phase transition temperatures in [001]-textured  $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{--Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{--PbTiO}_3$  ternary ceramics // *Applied Physics Letters*. 2015. Vol. 107. Art. 082902.
29. Yan Y., Zhou J.E., Maurya D. et al. Giant piezoelectric voltage coefficient in grain-oriented modified  $\text{PbTiO}_3$  material // *Nature Communications*. 2016. No. 7. Art. 13089.
30. Yan Y., Cho K., Maurya D. et al. Giant energy density in [001]-textured  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{--PbZrO}_3\text{--PbTiO}_3$  piezoelectric ceramics // *Applied Physics Letters*. 2013. Vol. 102. Art. 042903.
31. Wei D., Yuan Q., Zhang G. et al. Templated grain growth and piezoelectric properties of <001>-textured PIN–PMN–PT ceramics // *Journal of Material Research*. 2015. Vol. 30. No 14. P. 2144–2150.
32. Yan Y., Priya S. Strong piezoelectric anisotropy  $d_{15}/d_{33}$  in <111> textured  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{--Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  ceramics // *Applied Physics Letters*. 2015. Vol. 107. Art. 082909.
33. Haugen A.B., Henning G., Madaro F. et al. Piezoelectric  $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$  ceramics textured using needlelike  $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$  templates // *Journal of the American Ceramic Society*. 2014. Vol. 97. P. 3818–3825.
34. Hussain A., Kim J.S., Song T.K. et al. Fabrication of textured KNNT ceramics by reactive template grain growth using NN templates // *Current Applied Physics*. 2013. Vol. 13. P. 1055–1059.
35. Li Y., Hui C., Wu M. et al. Textured  $(\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{NbO}_3$  ceramics prepared by screen-printing multi-layer grain growth technique // *Ceramics International*. 2012. Vol. 38. P. 283–286.
36. Zhang H., Xu P., Patterson E. et al. Preparation and enhanced electrical properties of grain-oriented  $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})\text{TiO}_3$ -based lead-free incipient piezoceramics // *Journal of the European Ceramic Society*. 2015. Vol. 35. P. 2501–2512.
37. Maurya D., Zhou Y., Yan Y. et al. Synthesis mechanism of grain-oriented lead-free piezoelectric  $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{--BaTiO}_3$  ceramics with giant piezoelectric response // *Journal of Materials Chemistry C*. 2013. No 1. P. 2102–2111.
38. Bai W., Hao J., Fu F. et al. Structure and strain behavior of <001> textured BNT-based ceramics by template grain growth // *Materials Letters*. 2013. Vol. 97. P. 137–140.

39. Ma S., Zhang Y., Liu Z. et al. Preparation and enhanced electric-field-induced strain of textured 91BNT–6BT–3KNN lead-free piezoceramics by TGG method // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2016. Vol. 27. P. 3076–3081.
40. Deng M., Li X., Zhao Z. et al. Crystallographic textured evolution in  $0,85\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3\text{--}0,04\text{BaTiO}_3\text{--}0,11\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$  ceramics prepared by reactive-templated grain growth method // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2014. Vol. 25. P. 1873–1879.
41. Zou H., Sui Y., Zhu X. et al. Texture development and enhanced electromechanical properties in  $\langle 001 \rangle$ -textured BNT-based materials // *Materials Letters*. 2016. Vol. 184. P. 139–142.
42. Maurya D., Zhou Y., Wang Y. et al. Giant strain with ultralow hysteresis and high temperature stability in grain oriented lead-free  $\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3\text{--BaTiO}_3\text{--Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$  piezoelectric materials // *Scientific Reports*. 2015. No. 5. Art. 8595.
43. Hu D., Mori K., Kong X. et al. Fabrication of [100]-oriented bismuth sodium titanate ceramics with small grain size and high density for piezoelectric materials // *Journal of the European Ceramic Society*. 2014. Vol. 34. P. 1169–1180.
44. Vriami D., Damjanovic D., Vleugels J. et al. Textured  $\text{BaTiO}_3$  by templated grain growth and electrophoretic deposition // *Journal of Materials Science*. 2015. Vol. 50. P. 7896–7907.
45. Fu F., Shen B., Xu Z. et al. Electric properties of  $\text{BaTiO}_3$  lead-free textured piezoelectric thick film by screen printing method // *Journal of Electroceramics*. 2014. Vol. 33. P. 208–213.
46. Химическая технология керамики / под ред. И.Я. Гузмана. М.: Стройматериалы, 2003. 496 с.
47. Suzuki T.S., Sakka Y. Preparation of oriented bulk 5 wt. %  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--AlN}$  ceramics by slip casting in a high magnetic field and sintering // *Scripta Materialia*. 2005. Vol. 52. P. 583–586.
48. Zhu X.W., Sakka Y., Zhou Y. et al. A strategy for fabricating textured silicon nitride with enhanced thermal conductivity // *Journal of the European Ceramic Society*. 2014. Vol. 34. P. 2585–2589.
49. Никова М.С. Синтез и исследование оксидных композиций со структурой граната в системе  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--Yb}_2\text{O}_3\text{--Sc}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3$  для оптической керамики: дис. ... канд. техн. наук. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. 175 с.
50. Liu P., Yi H., Zhou G. et al. HIP and pressureless sintering of transparent alumina shaped by magnetic field assisted slip casting // *Optical Materials Express*. 2015. Vol. 5. P. 441–446.
51. Pringuet A., Takahashi T., Baba S. et al. Fabrication of transparent grain-oriented polycrystalline alumina by colloidal processing // *Journal of the American Ceramic Society*. 2016. Vol. 99. P. 3217–3219.
52. Tanaka S., Takahashi T., Uematsu K. Fabrication of transparent crystal-oriented polycrystalline strontium barium niobate ceramics for electro-optical application // *Journal of the European Ceramic Society*. 2014. Vol. 34. P. 3723–3728.
53. Sato Y., Arzakantsyan M., Akiyama J. et al. Anisotropic Yb:FAP laser ceramics by micro-domain control // *Optical Materials Express*. 2014. Vol. 4. P. 2006–2015.
54. Akiyama J., Sato Y., Taira T. Laser demonstration of diode-pumped  $\text{Nd}^{3+}$ -doped fluorapatite anisotropic ceramics // *Applied Physics Express*. 2011. Vol. 4. Art. 022703.
55. Lee S., Lee Y., Kim Y. et al. Mechanical properties of hot-forged silicon carbide ceramics // *Scripta Materialia*. 2005. Vol. 52. P. 153–156.
56. Nakamura M., Hirao K., Yamauchi Y. et al. Tribological properties of unidirectionally aligned silicon nitride // *Journal of the American Ceramic Society*. 2001. Vol. 84. P. 2579–2584.
57. Zhang H.B., Hu C.F., Sato K. et al. Tailoring  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  ceramic with high anisotropic physical and mechanical properties // *Journal of the European Ceramic Society*. 2015. Vol. 35. P. 393–397.
58. Медведев П.Н., Мубояджян С.А. Рентгеноструктурные исследования электронно-лучевого керамического слоя теплозащитного покрытия на основе  $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$  // *Труды ВИАМ*. 2017. № 1 (49). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-3-3.
59. Lee S., Dursun S., Duran C. et al. Thermoelectric power factor enhancement of textured ferroelectric  $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_{6-\delta}$  ceramics // *Journal of Materials Research*. 2011. Vol. 26. P. 26–30.
60. Fukuda K., Okabe M., Asaka T. Microtexture of c-axis-oriented polycrystalline lanthanum silicate oxyapatite formed by reactive diffusion // *Journal of the American Ceramic Society*. 2016. Vol. 99. P. 2816–2822.

## Reference

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Buznik V.M., Kablov E.N. State and prospects of Arctic materials science. *Vestnik RAN*, 2017, vol. 87, no. 9, pp. 827–839.
3. Kablov E.N. Dominant of the national technology initiative. Problems of accelerating the development of additive technologies in Russia. *Metally of Evrazii*, 2017, no. 3, pp. 2–6.
4. Lavrov A.V., Yakovlev N.O., Erasov V.S. Destruction of ceramic materials under the influence of high-speed indenter. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-88-94.
5. Loshchinin Yu.V., Budinovskiy S.A., Razmakhov M.G. Heat conductivity of heat-protective coatings  $ZrO_2$ – $Y_2O_3$  alloyed by REM oxides obtained by magnetron application. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 42–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-42-49.
6. Voronov Vs.A., Lebedeva Yu.E., Sorokin O.Yu., Vaganova M.L. Investigation of the high-temperature coatings properties on the basis of an yttrium-alumosilicate system for the protection of SiC materials from the action of an oxidizing environment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-63-73.
7. Babashov V.G., Maksimov V.G., Varrik N.M., Samorodova O.N. Studying of structure and properties of samples of ceramic composite materials on the basis of mullite. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 54–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-54-63.
8. Messing G.L., Poterala S., Chang Y. et al. Texture-engineered ceramics – Property enhancements through crystallographic tailoring. *Journal of Material Research*, 2017, vol. 32, pp. 3219–3241.
9. Seabaugh M.M., Kerscht I.H., Messing G.L. Texture development by templated grain growth in liquid-phase-sintered  $\alpha$ -alumina. *Journal of the American Ceramic Society*, 1997, no. 80, pp. 1181–1188.
10. Tani T. Texture engineering of electronic ceramics by the reactive-templated grain growth method. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2006, no. 114, pp. 363–370.
11. Yilmaz H., Messing G.L., Trolier-McKinstry S. (Reactive) templated grain growth of textured sodium bismuth titanate ( $Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3$ – $BaTiO_3$ ) ceramics processing. *Journal of Electroceramics*, 2003, no. 11, pp. 207–215.
12. Jin S., Sherwood R.C. et al. High TC superconductors-composite wire fabrication. *Applied Physics Letters*, 1987, no. 51, pp. 203–204.
13. Goyal A., Feenstra R., List F.A. et al. Using RABiTS to fabricate high-temperature superconducting wire. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 1999, no. 51, pp. 19–23.
14. Sakka Y., Suzuki T.S. Textured development of feeble magnetic ceramics by colloidal processing under high magnetic field. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2005, vol. 113, pp. 26–36.
15. Messing G.L., Trolier-McKinstry T., Sabolsky E.M. et al. Templated grain growth of textured piezoelectric ceramics. *Critical Reviews in Solid State and Material Sciences*, 2004, no. 29, pp. 45–96.
16. Kabirova D.B. *Evolution of the microstructure and texture upon annealing and deformation of superconducting  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ceramics*: thesis, Cand. Sc. (Phys. & Math.). Ufa: Institute for Problems of Superplasticity of Metals of the Russian Academy of Sciences, 2020, 190 p.
17. Lotgering F.K.J. Topotactical reactions with ferromagnetic oxides having hexagonal crystal structures. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, 1959, no. 9, pp. 113–123.
18. Kingery W.D. *Introduction to ceramics*: trans. from Engl. Moscow: Stroyizdat, 1967, 499 p.
19. Stuijts A.L., Rathenau G.W., Weber G.H. Ferroxdure II and III, anisotropic permanent magnet materials. *Philips Technical Review*, 1954, vol. 16, no. 5–6, pp. 141–180.
20. Chen Y., Daigle A., Fitchorov T. et al. Electronic tuning of magnetic permeability in  $Co_2Z$  hexaferrite toward high frequency electromagnetic device miniaturization. *Applied Physics Letters*, 2011, no. 98, art. 202502.
21. Jian G., Meng F., Zhou D. et al. Fabrication of textured  $CoFe_2O_4$  ceramics by novel RTGG method using rod-like  $\alpha$ - $FeOOH$  particles as templates. *Materials Chemistry and Physics*, 2015, vol. 162, pp. 380–385.

22. Chang P., He L., Wei D. et al. Textured Z-type hexaferrite  $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$  ceramics with high permeability by reactive template grain growth method. *Journal of European Ceramic Society*, 2016, vol. 36, pp. 2519–2524.
23. Desgardin G., Monot I., Raveau B. Texturing of high- $T_C$  superconductors. *Superconductors science and technology*, 1999, vol. 12, no. 7, pp. 115–133.
24. Susner M.A., Daniels T.W., Sumption M.D. et al. Drawing induced texture and the evolution of superconductive properties with heat treatment in powder-in-tube in situ  $\text{MgB}_2$  strands. *Superconductors science and technology*, 2012, vol. 25, art. 065002.
25. Shi Y., Durrell J.H., Dennis A.R. et al. Multiple seeding for the growth of bulk GdBCO–Ag superconductors with single grain behavior. *Superconductors science and technology*, 2017, vol. 30, art. 015003.
26. Miwa Y., Kawada S., Kimura M. et al. Processing and enhanced piezoelectric properties of highly oriented compositionally modified  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  ceramics fabricated by magnetic alignment. *Applied Physics Express*, 2015, no. 8, art. 041501.
27. Yan Y., Wang Y.U., Priya S. Electromechanical behavior of [001]-textured  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ – $\text{PbTiO}_3$  ceramics. *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 100, art. 192905.
28. Chang Y., Wu J., Sun Y. et al. Enhanced electromechanical properties and phase transition temperatures in [001]-textured  $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$ – $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ – $\text{PbTiO}_3$  ternary ceramics. *Applied Physics Letters*, 2015, vol. 107, art. 082902.
29. Yan Y., Zhou J.E., Maurya D. et al. Giant piezoelectric voltage coefficient in grain-oriented modified  $\text{PbTiO}_3$  material. *Nature Communications*, 2016, no. 7, art. 13089.
30. Yan Y., Cho K., Maurya D. et al. Giant energy density in [001]-textured  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ – $\text{PbZrO}_3$ – $\text{PbTiO}_3$  piezoelectric ceramics. *Applied Physics Letters*, 2013, vol. 102, art. 042903.
31. Wei D., Yuan Q., Zhang G. et al. Templated grain growth and piezoelectric properties of <001>-textured PIN–PMN–PT ceramics. *Journal of Material Research*, 2015, vol. 30, no. 14, pp. 2144–2150.
32. Yan Y., Priya S. Strong piezoelectric anisotropy  $d_{15}/d_{33}$  in <111> textured  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ – $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  ceramics. *Applied Physics Letters*, 2015, vol. 107, art. 082909.
33. Haugen A.B., Henning G., Madaro F. et al. Piezoelectric  $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$  ceramics textured using needlelike  $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$  templates. *Journal of the American Ceramic Society*, 2014, vol. 97, pp. 3818–3825.
34. Hussain A., Kim J.S., Song T.K. et al. Fabrication of textured KNNT ceramics by reactive template grain growth using NN templates. *Current Applied Physics*, 2013, vol. 13, pp. 1055–1059.
35. Li Y., Hui C., Wu M. et al. Textured  $(\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{NbO}_3$  ceramics prepared by screen-printing multi-layer grain growth technique. *Ceramics International*, 2012, vol. 38, pp. 283–286.
36. Zhang H., Xu P., Patterson E. et al. Preparation and enhanced electrical properties of grain-oriented  $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})\text{TiO}_3$ -based lead-free incipient piezoceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2015, vol. 35, pp. 2501–2512.
37. Maurya D., Zhou Y., Yan Y. et al. Synthesis mechanism of grain-oriented lead-free piezoelectric  $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ – $\text{BaTiO}_3$  ceramics with giant piezoelectric response. *Journal of Materials Chemistry C*, 2013, no. 1, pp. 2102–2111.
38. Bai W., Hao J., Fu F. et al. Structure and strain behavior of <001> textured BNT-based ceramics by template grain growth. *Materials Letters*, 2013, vol. 97, pp. 137–140.
39. Ma S., Zhang Y., Liu Z. et al. Preparation and enhanced electric-field-induced strain of textured 91BNT–6BT–3KNN lead-free piezoceramics by TGG method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2016, vol. 27, pp. 3076–3081.
40. Deng M., Li X., Zhao Z. et al. Crystallographic textured evolution in  $0.85\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ – $0.04\text{BaTiO}_3$ – $0.11\text{K}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$  ceramics prepared by reactive-templated grain growth method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2014, vol. 25, pp. 1873–1879.
41. Zou H., Sui Y., Zhu X. et al. Texture development and enhanced electromechanical properties in <001>-textured BNT-based materials. *Materials Letters*, 2016, vol. 184, pp. 139–142.
42. Maurya D., Zhou Y., Wang Y. et al. Giant strain with ultralow hysteresis and high temperature stability in grain oriented lead-free  $\text{K}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ – $\text{BaTiO}_3$ – $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$  piezoelectric materials. *Scientific Reports*, 2015, no. 5, art. 8595.
43. Hu D., Mori K., Kong X. et al. Fabrication of [100]-oriented bismuth sodium titanate ceramics with small grain size and high density for piezoelectric materials. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, vol. 34, pp. 1169–1180.

44. Vriami D., Damjanovic D., Vleugels J. et al. Textured BaTiO<sub>3</sub> by templated grain growth and electrophoretic deposition. *Journal of Materials Science*, 2015, vol. 50, pp. 7896–7907.
45. Fu F., Shen B., Xu Z. et al. Electric properties of BaTiO<sub>3</sub> lead-free textured piezoelectric thick film by screen printing method. *Journal of Electroceramics*, 2014, vol. 33, pp. 208–213.
46. *Chemical technology of ceramics*. Ed. I.Ya. Guzman. Moscow: Stroymaterialy, 2003, 496 p.
47. Suzuki T.S., Sakka Y. Preparation of oriented bulk 5 wt. % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-AlN ceramics by slip casting in a high magnetic field and sintering. *Scripta Materialia*, 2005, vol. 52, pp. 583–586.
48. Zhu X.W., Sakka Y., Zhou Y. et al. A strategy for fabricating textured silicon nitride with enhanced thermal conductivity. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, vol. 34, pp. 2585–2589.
49. Nikova M.S. *Synthesis and study of oxide compositions with a garnet structure in the Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system for optical ceramics*: thesis, Cand. Sc. (Cand.). Stavropol: North Caucasian Federal University, 2020, 175 p.
50. Liu P., Yi H., Zhou G. et al. HIP and pressureless sintering of transparent alumina shaped by magnetic field assisted slip casting. *Optical Materials Express*, 2015, vol. 5, pp. 441–446.
51. Pringuet A., Takahashi T., Baba S. et al. Fabrication of transparent grain-oriented polycrystalline alumina by colloidal processing. *Journal of the American Ceramic Society*, 2016, vol. 99, pp. 3217–3219.
52. Tanaka S., Takahashi T., Uematsu K. Fabrication of transparent crystal-oriented polycrystalline strontium barium niobate ceramics for electro-optical application. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, vol. 34, pp. 3723–3728.
53. Sato Y., Arzakantsyan M., Akiyama J. et al. Anisotropic Yb:FAP laser ceramics by microdomain control. *Optical Materials Express*, 2014, vol. 4, pp. 2006–2015.
54. Akiyama J., Sato Y., Taira T. Laser demonstration of diode-pumped Nd<sup>3+</sup>-doped fluorapatite anisotropic ceramics. *Applied Physics Express*, 2011, vol. 4, art. 022703.
55. Lee S., Lee Y., Kim Y. et al. Mechanical properties of hot-forged silicon carbide ceramics. *Scripta Materialia*, 2005, vol. 52, pp. 153–156.
56. Nakamura M., Hirao K., Yamauchi Y. et al. Tribological properties of unidirectionally aligned silicon nitride. *Journal of the American Ceramic Society*, 2001, vol. 84, pp. 2579–2584.
57. Zhang H.B., Hu C.F., Sato K. et al. Tailoring Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> ceramic with high anisotropic physical and mechanical properties. *Journal of the European Ceramic Society*, 2015, vol. 35, pp. 393–397.
58. Medvedev P.N., Muboyadzhyan S.A. X-ray diffraction studies of electron beam ceramic thermal barrier coating layer based on ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Trudy VIAM*, 2017, no. 1 (49), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 16, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-3-3.
59. Lee S., Dursun S., Duran C. et al. Thermoelectric power factor enhancement of textured ferroelectric Sr<sub>x</sub>Ba<sub>1-x</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>6-δ</sub> ceramics. *Journal of Materials Research*, 2011, vol. 26, pp. 26–30.
60. Fukuda K., Okabe M., Asaka T. Microtexture of c-axis-oriented polycrystalline lanthanum silicate oxyapatite formed by reactive diffusion. *Journal of the American Ceramic Society*, 2016, vol. 99, pp. 2816–2822.

## Информация об авторах

**Житнюк Сергей Викторович**, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Медведев Павел Николаевич**, начальник сектора, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Сорокин Олег Юрьевич**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Качаев Артем Алексеевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

## Information about the authors

**Sergey V. Zhitnyuk**, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Pavel N. Medvedev**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Oleg Yu. Sorokin**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Artem A. Kachaev**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)