

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 666.3.022

ХОЛОДНОЕ СПЕКАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Михаил Андреевич Пахомов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия,
pakhomvmish@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены механизмы и результаты применения различных способов холодного спекания, включая специальные условия нагрева и другие инновационные подходы. Особое внимание уделено новым перспективным технологиям, среди которых выделяются процесс холодного спекания (CSP), FLASH-спекание и искровое плазменное спекание (SPS). Эти методы позволяют существенно сократить энергию, необходимую для синтеза керамики, и обеспечить сохранение уникальных свойств исходных материалов, включая наноструктуру и эксплуатационные характеристики. Рассматриваемые подходы демонстрируют значительные преимущества, такие как значительное сокращение температуры спекания до 300 °С и достижение высокого уровня плотности продуктов.

Ключевые слова: холодное спекание, низкотемпературное спекание, спекание, керамика, спекание порошков

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2026-67-4-280-290

Финансирование. Работа выполнена за счет средств Государственного задания научной темы, присвоенной учредителем FFGU-2026-0003.

Для цитирования: Пахомов М.А. Холодное спекание керамических материалов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2026. Т. 67. № 4. С. 280–290.

SCIENTIFIC REVIEW

COLD SINTERING OF CERAMIC MATERIALS

Mikhail A. Pakhomov

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia, pakhomvmish@gmail.com

Abstract. This article examines the mechanisms and results of various cold sintering methods, including special heating conditions and other innovative approaches. Particular attention is paid to promising new technologies, including cold sintering process (CSP), flash sintering, and spark plasma sintering (SPS). These methods significantly reduce the energy required for ceramic synthesis and ensure the preservation of the unique properties of the starting materials, including their nanostructure and performance characteristics. The approaches discussed demonstrate significant advantages, such as a significant reduction in sintering temperature to 300 °C and the achievement of high product density.

Keywords: cold sintering, low-temperature sintering, sintering, ceramics, powder sintering

Financial Support. The work was carried out at the expense of the State Assignment for the scientific topic FFGU-2026-0003, assigned by the founder.

For citation: Pakhomov M.A. Cold Sintering of Ceramic Materials // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Khimiya. 2026. T. 67. № 4. S. 280–290.

Введение

Для осуществления традиционного спекания требуется обеспечить температуру >1600 °С и длительные выдержки, это связано с высокими производственными затратами и низкой экологичностью. В связи с этим в современной науке стала актуальной проблема разработки методов, позволяющих снизить температуру этого процесса. Особый интерес в последние годы представляет инновационная методика, известная как «холодное спекание» (Cold Sintering Process). Эта технология позволяет снизить температуру консолидации керамических материалов приблизительно на 1000 °С относительно традиционных методов. Суть процесса заключается в спекании порошкового сырья в водной среде под действием одноосного давления (50 – 700 МПа), что обеспечивает формирование плотной структуры при температуре, не превышающей 500 °С. Для сравнения: общепринятая технология производства керамики основана на спекании порошков при высокой температуре, составляющей $0,50$ – $0,75$ от их температуры плавления [1]. Ограничения, связанные с низкой скоростью диффузии в твердых телах, стимулировали поиск процесса спекания. Одним из традиционных подходов является жидкофазное спекание, которое, однако, не всегда применимо и может негативно влиять на конечные свойства материала. Это, в свою очередь, привело к разработке инновационных нетермических методов [2]. К ним относятся подходы, увеличивающие движущую силу уплотнения за счет давления прессования во время спекания >100 МПа (Hot Pressing [3], Hot Isostatic Pressing) [4]) или за счет увеличения скорости объемного нагрева (Microwave Sintering [5], Field Assisted Sintering Technology (FAST) [6], Spark Plasma Sintering (SPS) [7]). Несмотря на это, актуальной задачей остается разработка методов, обеспечивающих спекание при температуре ниже 1000 °С. Это обусловлено ростом ассортимента композитных материалов, преимуществами подавления роста зерна и сохранения исходной фазовой структуры порошков [8]. Кроме того, снижение температуры процесса напрямую уменьшает его эко-

номические и экологические издержки [9]. Важность разработки эффективных низкотемпературных методов спекания для перспективных керамик подчеркивается в крупных прогнозных исследованиях [10].

Способы понижения температуры спекания

Традиционное спекание – это классический технологический процесс получения твердых и пористых материалов (керамики, порошковых металлов и композитов) из порошкообразного сырья путем нагрева ниже температуры плавления основного компонента. Высокие значения температуры традиционного спекания приводят к нежелательному росту зерна, что ухудшает механические и функциональные свойства мелкозернистых и наноструктурированных материалов, а также делает невозможной консолидацию многокомпонентных систем из-за разложения термолабильных фаз или протекания разрушительных химических реакций на границах раздела. Кроме того, высокотемпературные процессы энергозатратны, требуют дорогостоящего оборудования и накладывают жесткие ограничения на конструкцию изделий, тогда как низкотемпературные методы, такие как холодное (FLASH-спекание) или искровое плазменное спекание, открывают путь к созданию принципиально новых гибридных материалов (например, керамика-полимер), обеспечивают беспрецедентную энергоэффективность и позволяют сохранить уникальную наноструктуру, получая изделия с превосходными характеристиками.

На данный момент наиболее распространены несколько общепринятых методов снижения температуры спекания, их можно классифицировать по четырем основным категориям [11].

Увеличение дисперсности порошка и оптимизация его агрегатной структуры. Этот метод позволяет повысить вклад поверхностной и зернограничной диффузии по сравнению с объемной диффузией. Относится к низкотемпературному спеканию. Способствует снижению температуры спекания на 100 – 350 °С.

Введение активирующих легкоплавких добавок. Легкоплавкие добавки способствуют межзерненному переносу массы через образование тонкой жидкой пленки. Этот метод применяется в рамках низкотемпературного спекания. Позволяет снизить температуру процесса примерно на 100–500 °С.

Гетеровалентное дозирование исходного порошка. Увеличивается концентрация дефектов в кристаллической решетке, что повышает диффузионную подвижность частиц в ходе спекания. Метод относится к категории низкотемпературных процессов. Температуру спекания удается уменьшить на 100–200 °С.

Разработка новых перспективных методов спекания. Использование современных технологических решений и инновационных подходов. Это новое направление научных исследований в сфере материаловедения, нацеленное на улучшение характеристик спеченных изделий.

Первые три метода хорошо известны и обычно объединяются под общим термином «низкотемпературное спекание» (англ. Low temperature sintering) [12]. Использование этих подходов позволяет снижать температуру спекания на 100–350 °С и более относительно температуры традиционного спекания. В последние десятилетия был достигнут значительный прогресс в

развитии новых перспективных методов спекания (таблица). Начиная с 2010 г., исследования в области спекания развивались очень быстро, было разработано несколько новых методов спекания, таких как FLASH-Sintering [13], модифицированные технологии искрового плазменного спекания (англ. Spark Plasma Sintering) [14], Cold Sintering Process [15]. FLASH-спекание (англ. Flash Sintering) – это метод сверхбыстрого уплотнения керамических материалов без механического давления, при котором сочетают умеренный нагрев в печи (300–800 °С) и подачу постоянного электрического поля, что вызывает нелинейный скачок электропроводности и интенсивный Джоулев разогрев, приводящий к сверхбыстрому уплотнению за секунды (рис. 1). Несмотря на существенное снижение температуры по сравнению с традиционным методом спекания (1700 °С), возможность получения плотных мелкозернистых материалов и высокую энергоэффективность, ключевой проблемой FLASH-спекания остается сложность контроля над однородностью микроструктуры из-за тепловых градиентов. [16, 17]

Технология «искрового плазменного спекания» (Spark Plasma Sintering) – консолидации порошковых материалов с пропуском через спекаемый материал постоянного тока

Методы холодного спекания

Метод	Искровое плазменное спекание (SPS)	FLASH-спекание	Холодное спекание (CSP)
Механизм	ток, одноосное давление и джоулев нагрев	электрическое поле и джоулев нагрев	растворение/осаждение в переходной жидкой фазе и одноосное давление
Качество получаемого материала (плотность, однородность микроструктуры)	очень высокая плотность (~98–99%), однородность (92–95%)	высокая плотность (~95–98%), однородность (~75–85%)	средняя–высокая плотность (~90–98%), однородность (~80–90%)
Температура спекания, °С	600–1200	300–1000	25–300
Время выдержки	3–10 мин	1–30 с	5–120 мин
Давление, МПа	20–100	–	50–700
Энергоэффективность (общие энергозатраты)	средняя	очень высокая	высокая
Универсальность (применимость к материалам)	широкая (керамика, металлы, интерметаллиды, композиты)	в основном керамика и полупроводники	керамика, композиты керамика-полимер, гибридные материалы

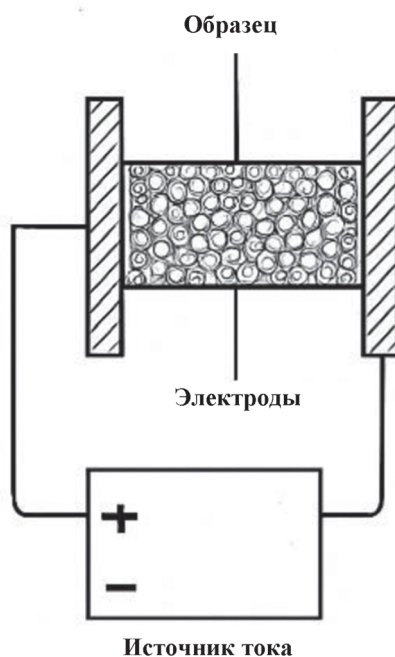


Рис. 1. Схема установки FLASH-спекания

при одновременном воздействии одноосного давления (до 100 МПа). Помимо резистивного нагрева, это приводит к активации поверхности порошка вследствие образования в зазорах искровой плазмы, что обеспечивает быстрый объемный нагрев и активное спекание за счет комбинации Джоулева тепла, воздействия электрического поля и пластической деформации. [18, 19] (рис. 2) К основным преимуществам технологии относятся:

- равномерное распределение тепла по образцу;
- высокая плотность и контролируемая пористость;
- предварительная обработка давлением и связующие не требуются;
- равномерное спекание однородных и разнородных материалов;
- короткое время рабочего цикла;
- минимальный рост зерна и влияние на микроструктуру.

Холодное спекание (Cold Sintering Process) представляет собой низкотемпературный (в диапазоне от комнатной температуры до 200–300 °С) процесс уплотнения порошков, протекающий в присутствии переходной жидкой фазы (чаще всего воды или водных растворов солей, кислот и щелочей), выступающих в роли активаторов процесса, при одновременным при-

ложении одноосного давления (50–700 МПа). [20, 21] (рис. 3) Ключевой аспект заключается в том, что температура процесса значительно ниже точки плавления или температуры солидуса спекаемого материала. Это исключает термическую активацию как основной механизм, что обеспечивает возможность получения керамических материалов с контролируемым размером зерен, а также новых композиционных и термически нестабильных материалов [22].

Анализ трех перспективных методов спекания (искрового плазменного (SPS), FLASH-спекания и холодного спекания (CSP)) демонстрирует принципиально разные подходы к получению высокоплотных материалов. SPS обеспечивает максимальную плотность (98–99,9%) и однородность микроструктуры благодаря комбинации джоулева нагрева, импульсного тока и давления, однако этот метод ограничен дороговизной и размерами образцов. FLASH-спекание отличается экстремальной скоростью (секунды) и значительным снижением температуры за счет явления теплового разгона, инициируемого электрическим полем, однако страдает от неоднородности микроструктуры. Холодное спекание (CSP), основанное на механизме растворения/осаждения в переходной жидкой фазе под высоким давлением, является единственным методом, позволяющим полностью сохранить наноструктуру и

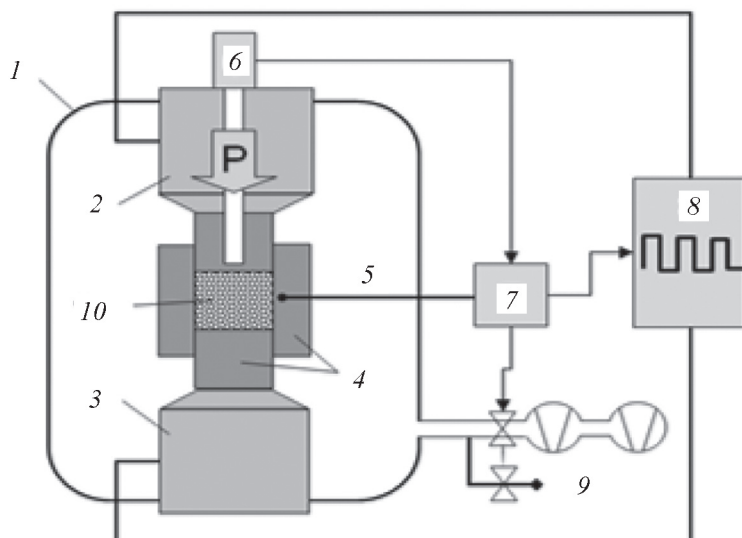


Рис. 2. Схема установки ИПС: 1 – рабочая камера, 2 – верхний (подвижный) пуансон, 3 – нижний пуансон, 4 – графитовая оснастка, 5 – термопара, 6 – пирометр, 7 – контроллер системы, 8 – генератор импульсов постоянного тока, 9 – модули создания печной атмосферы, 10 – спекаемый материал [19]

работать с термолabileными материалами, хотя и не всегда достигает теоретической плотности. Таким образом, эти методы занимают различные технологические ниши: SPS используют для премиального качества, FLASH – для скоростного и энергоэффективного производства, а CSP – для создания принципиально новых гибридных и термочувствительных материалов.

Анализ методов холодного спекания

Исследования методов спекания мотивированы снижением потребляемой энергии [23] и выбросов CO_2 , что важно в ситуации глобального потепления климата. Кроме того, стратегические отрасли, такие как радиоэлектроника, аэрокосмическая и атомная промышленность [24], требуют передовой керамики с улучшенными или новыми эксплуатационными свойствами. Новые технологии спекания могут оказать определяющее влияние на биоматериалы, электронику, системы связи, инкапсуляцию ядерных отходов, производство и хранение энергии, электромеханические устройства и катализ [25].

Наиболее важной инновацией последнего десятилетия, по мнению исследователей в данной области, является процесс холодного спекания [15]. В настоящее время в мировой практике закрепился термин «процесс холодного спекания»

(Cold Sintering Process), чтобы отличить его от одноименного метода консолидации при комнатной температуре. Ключевое различие заключается в механизме: классический метод основан на пластической деформации и сварке частиц под действием высокого давления (несколько ГПа) в сухих условиях, тогда как современный процесс является химико-термическим и предполагает введение жидкой фазы, нагрев до умеренной температуры (100–300 °C) и консолидацию за счет растворения/осаждения при значительно более низком давлении [26]. Как правило, CSP осуществляется следующим образом: смесь порошков (обычно оксидов) в сочетании с жидкой фазой (обычно водные растворы кислот или щелочей) одноосно прессуется (50–700 МПа) в пресс-форме при температуре ниже 350 °C [27]. Процесс холодного спекания (CSP) отличается от широко известного процесса гидротермального горячего прессования (Hydrothermal Hot Pressing (ННП)) [28]. ННП ограничено сравнительно узкой номенклатурой получаемых керамических материалов, которые образуются в ходе гидротермальных химических реакций (материалы на основе оксида кремния, биокерамика на основе гидроксиапатита, оксида циркония, радиоактивных отходов [25]), а также необходимостью длительной выдержки (до нескольких десятков часов) при

высоком механическом давлении прессования. CSP представляет собой существенную эволюцию процесса ННР, хотя эти процессы имеют общие черты. Ключевое различие между процессом холодного спекания (CSP) и гидротермальным горячим прессованием (ННР) заключается в механизме создания давления и состоянии жидкостной среды. Таким образом, жидкость представляет собой метастабильную переходную фазу, которая выдавливается и испаряется из рабочего объема со временем. С этой точки зрения различие между CSP и ННР носит исключительно технологический характер, и оба процесса, вероятно, обладают некоторыми общими механизмами. В отличие от ННР, CSP является более универсальным процессом с точки зрения широты номенклатуры материалов. В настоящее время экспериментально подтверждена принципиальная возможность применения процесса холодного спекания для более чем пятидесяти композиций материалов, преимущественно на основе оксидной керамики. К ним относятся микроволновые диэлектрики, сегнетоэлектрики, конструкционная керамика, литий-ионные катоды, твердотельные электролиты, полупроводники, керамические клеи, магнитная керамика, неорганическое стекло [29]. В работе [30] показано, что снижение температуры холодного спекания и энергопотребления может достигать сотен градусов и двух порядков по сравнению с традиционным

высокотемпературным спеканием. Вместе с потенциальными и фактическими преимуществами процессу холодного спекания присущи также некоторые недостатки и ограничения. Во многом они связаны с новизной процесса и текущим начальным этапом накопления данных о его фундаментальных и прикладных аспектах. Наиболее важной научной проблемой на данный момент является отсутствие общепринятых и экспериментально подтвержденных представлений о механизме, или механизмах, процесса холодного спекания. Начиная с работы [15], наибольшее признание получил механизм, основной стадией которого является перенос массы за счет растворения-осаждения [29]. Согласно этой модели, в процессе рассматриваются три этапа: уплотнение под действием механического давления; перегруппировка частиц, которую облегчает жидкая фаза; рост зерен и удаление пор благодаря растворению вещества в зонах с высоким напряжением контактирующих частиц при последующем осаждении на бесконтактных поверхностях с низким напряжением [15]. Однако последующие исследования показали, что в процессе холодного спекания участвуют более сложные механизмы, которые еще не до конца понятны [31]. Было отмечено, что в модели переосаждения существует проблема – растворение и осаждение являются исключительно поверхностными явлениями и могут приводить только к укрупнению частиц, но не могут спо-

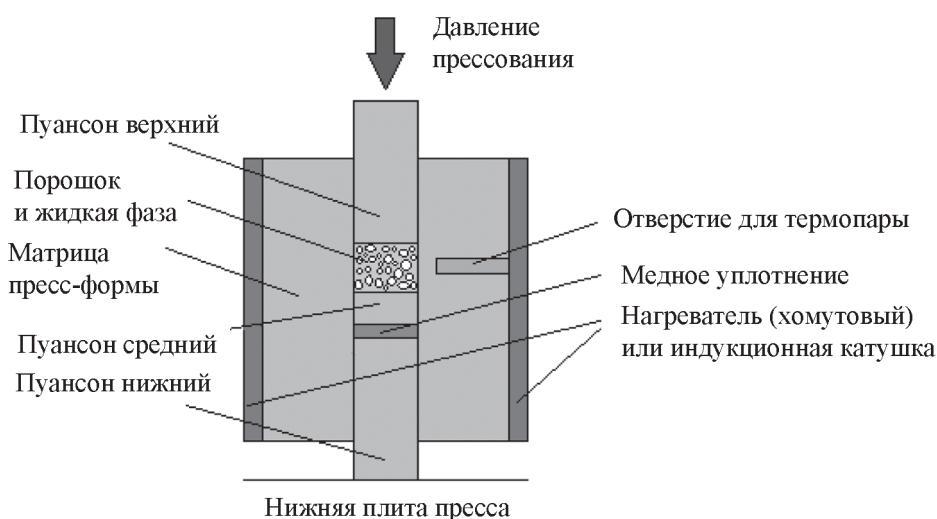


Рис. 3. Схема реализации процесса холодного спекания

способствовать их уплотнению. Было установлено, что для образования керамики достаточно 5% объемной доли жидкости, которую по аналогии с жидкофазным спеканием назвали транспортной фазой [29]. Оказалось также, что спекание ZnO происходит уже в присутствии 1,7 мас.% воды, количество которой соответствует лишь двум монослоям воды на поверхности частиц и недостаточно для протекания процессов растворения-осаждения [11]. В работе [32] показано, что при холодном спекании ZnO в присутствии в качестве транспортной фазы кристаллической добавки $Zn(OAc)_2 \cdot 2H_2O$ массоперенос связан не с жидкой водой, а с адсорбированной и структурной водой добавки. Авторы не рассматривают механизм действия транспортной фазы, но полагают, что она способствует усилению поверхностной диффузии и росту зерна. В [11] авторы обратили внимание на то, что половина из 1,7 мас.% воды, достаточной для спекания ZnO, диссоциирует и диффундирует в решетку оксида, увеличивая дефектность кристаллов и границ зерен. С учетом этого эффекта уплотнение при холодном спекании было объяснено уменьшением энергии активации атомной диффузии вдоль границ зерен из-за высокой концентрации гидроксильных ионов и других дефектов, образующихся вследствие диссоциативной адсорбции воды [11, 33, 34]. Тема переноса массы благодаря поверхностной диффузии начала активно обсуждаться в литературе [35]. В результате при описании стадии переноса массы в модели холодного спекания акцент с механизма переосаждения был перенесен на механизм поверхностной диффузии.

В исследованиях было показано образование мелкокристаллических оксидов в условиях автоклавной обработки в среде до- и сверхкритического водного флюида низкой плотности [36, 37]. Показано, что сопровождающее эти процессы гидроксिलирование оксидов как на поверхности, так и в объеме частиц приводит к повышению их реакционной способности и эволюции морфологии продукта. В условиях процесса холодного спекания с приложенным механическим давлением такое гидроксिलирование может играть существенную роль в общем механизме спекания.

С практической точки зрения большое значение имеют вопросы потенциальной совместности процесса холодного спекания с масштабным промышленным производством. Несмотря на недостаточное понимание механизмов про-

цесса холодного спекания, попытка преодоления данной технологической проблемы не является преждевременной [29, 38]. Прикладные исследования процесса холодного спекания все чаще появляются в опубликованных статьях. В работе [39] показана возможность применения CPS для совмещения процессов спекания керамики и металлизации на примере многослойных варисторов, таких как смешанные частицы Fe–Cu, совместно спеченные между слоями ZnO. Эффективный подход к значительному увеличению электропроводности керамики ZnO с помощью комбинации CSP и последующего отжига в печи продемонстрирован в работе [40]. Электрическая проводимость образца холодного спекания была увеличена с 0,0005 до 1,5 и 16,4 С/см. Значимые прикладные результаты были получены в приложении CSP для производства радиоэлектронных компонентов [41].

В статье [42] авторы демонстрируют процесс термического холодного спекания по схеме TA-CSP при температуре 300 °С с последующим отжигом в печи, для изготовления высокоплотной керамики $\alpha-Al_2O_3$ с субмикронным размером зерна 120–180 нм. После второго термического отжига при 800–1350 °С $\alpha-Al_2O_3$ -керамика с субмикронным размером зерна ~720 нм может быть полностью уплотнена с относительной плотностью 98%. Керамические образцы Al_2O_3 , полученные по методу термического холодного спекания TA-CSP, не уступают традиционным высокотемпературным (1500–1700 °С). Таким образом, метод TA-CSP с последующим фазовым переходом позволяет спекать керамику Al_2O_3 при существенно более низкой температуре, чем это требуется для традиционного спекания. В исследовании [43] рассматривается холодное спекание при температуре <400 °С с использованием прекурсора гидроксида алюминия. Такой режим спекания позволяет получить плотный образец и метастабильную фазу $\gamma-Al_2O_3$ с возможностью дальнейшего ее превращения в фазу $\alpha-Al_2O_3$ при нагреве 1000–1100 °С. В образце сохраняется смесь кристаллической и аморфной фаз. Присутствие аморфной фазы может способствовать механической стабильности. Такое одноэтапное спекание позволяет получить оксид алюминия в виде спеченных плотных или пористых образцов со стабильной фазой $\gamma-Al_2O_3$, которая часто используется из-за ее высокой удельной поверхности и является отличным кандидатом для холодного

спекания пористых материалов, придавая оптические свойства, обеспечивая механическую прочность образца и демонстрируя способность процесса холодного спекания применяться в области каталитических и оптических приложений. Наиболее подробные данные по холодному спеканию в водной среде имеются для ограниченного перечня керамических материалов: ZnO [32–42], перовскитов (титаната бария [43–46], KNN [47–50], PZT [51–53]). Однако для большого числа практически значимых материалов отсутствуют известные и научно обоснованные подходы, позволяющие стабильно получать керамику высокой плотности и с требуемыми свойствами в процессе холодного спекания. «Трудным» для холодного спекания материалом является оксид алюминия, имеющий несколько фаз в широком интервале температур – основа для спектра востребованных керамических и композиционных материалов широкого назначения. Оксид алюминия (α -Al₂O₃), корунд в форме непрозрачной и полупрозрачной керамики, а также в форме прозрачного кристаллического лейкосапфира широко используется в различных целях – от огнеупоров и режущих инструментов, до основы LTCC материалов [54] и фотоники [55]. Традиционные методы изготовления из α -Al₂O₃ керамических изделий с высокой плотностью требуют температуру выше 1400 °С [56], а наплавление лейкосапфира методами Вернейля, Багдасарова, Степанова, Бриджена, Киропулоса происходит при температуре выше температуры его плавления, составляющей 2050 °С.

В настоящее время отсутствуют публикации, в которых была бы показана возможность получения керамики из α -Al₂O₃ в процессе холодного спекания. Описаны только композиты Al₂O₃-NaCl [57, 58], Al₂O₃-гидроксипатит [59], полученные в процессе холодного спекания. Вероятно, результаты холодного спекания Al₂O₃ связаны с особенностями кристаллической структуры, термической стабильностью и фазовыми превращениями. В работе [60] описаны попытки холодного спекания оксида алюминия. Процесс холодного спекания был применен к гидроксиду алюминия (Al(OH)₃·xH₂O). При температуре спекания 150–400 °С и одноосном

давлении 500 МПа в течение выдержки от 30 до 180 мин были получены плотные полупрозрачные керамические образцы из смеси аморфной и кристаллической фаз, содержащие бемит (γ -AlOOH). После дополнительной термообработки в печи при 500 °С бемит превратился в γ -Al₂O₃.

Выводы

Проведенный анализ литературы позволяет сделать выводы, касающиеся технологии холодного спекания (CSP) керамических материалов:

1. Эффективность и технологические параметры. Холодное спекание подтвердило свою принципиальную возможность получения плотных керамических изделий при температуре, не превышающей 300–500 °С. Ключевыми факторами успешного уплотнения являются правильный подбор временной дисперсной среды, приложение одноосного давления и контроль температурного режима, что позволяет достигать высокой относительной плотности без глубокого изменения микроструктуры исходного порошка.

2. Преимущества перед традиционными методами. Основными преимуществами CSP являются значительное снижение энергопотребления по сравнению с высокотемпературным спеканием, а также возможность интеграции керамических материалов с металлами или полимерами в многослойные структуры, что открывает путь к созданию гибридных устройств, недостижимых традиционными методами.

3. Состояние теоретической базы и перспективы. Несмотря на экспериментальные успехи, фундаментальные механизмы CSP, такие как процессы, протекающие в присутствии временной жидкости (например, растворение/осаждение) остаются недостаточно изученными. Это создает основное направление для будущих исследований, которые должны быть сфокусированы на установлении четких количественных связей между параметрами процесса, составом среды, микроструктурой и конечными функциональными свойствами спеченной керамики. Решение этих задач является ключом к оптимизации и широкому промышленному внедрению технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kang S.-J.L. Sintering: densification, grain growth, and microstructure. 2005. 256 p.
2. Bordia R.K., Kang S.-J.L., Olevsky E.A. Current

understanding and future research directions at the onset of the next century of sintering science and technology // Journal of the American Ceramic So-

- ciety. 2017. Vol. 100. P. 2314–2352 (DOI: 10.1111/jace.14919).
3. Langer J., Hoffmann M.J., Guillon O. Direct comparison between hot pressing and electric field-assisted sintering of submicron alumina // *Acta Materialia*. 2009. Vol. 57. P. 5454–5465 (DOI: 10.1016/j.actamat.2009.07.043).
 4. Bocanegra-Bernal M.H. Hot isostatic pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics // *J. Materials Science*. 2004. Vol. 39. P. 6399–6420 (DOI: 10.1023/B:JMSC.0000044878.11441.90).
 5. Oghbaei M., Mirzaee O. Microwave versus conventional sintering: A review of fundamentals, advantages and applications // *J. Alloys and Compounds*. 2010. Vol. 494. P. 175–189 (DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.01.068).
 6. Munir Z.A., Quach D.V., Ohyanagi M. Electric current activation of sintering: A review of the pulsed electric current sintering process // *Journal of the American Ceramic Society*. 2011. Vol. 94. P. 1–19 (DOI: 10.1111/j.1551-2916.2010.04210.x).
 7. Munir Z.A., Anselmi-Tamburini U., Ohyanagi M. The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method // *Journal of Materials Science*. 2006. Vol. 41. P. 763–777 (DOI: 10.1007/s10853-006-6555-2).
 8. Rahaman M.N. *Ceramic processing and sintering*. 2nd edition. 2017. 600 p. (DOI: 10.1201/9781315274126).
 9. Ibn-Mohammed T. C.A. Randall, K.B. Mustapha, et al. Decarbonising ceramic manufacturing: A techno-economic analysis of energy efficient sintering technologies in the functional materials sector // *Journal of the European Ceramic Society*. 2019. Vol. 39. P. 5213–5235 (DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.08.011).
 10. Faber T., Asefa T., Backhaus-Ricoultet M., et al. The role of ceramic and glass science research in meeting societal challenges: Report from an NSF-sponsored workshop // *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. P. 1777–1803 (DOI: 10.1111/jace.14881).
 11. Gonzalez-Julian J., Neuhaus K., Bernemann M. et al. Unveiling the mechanisms of cold sintering of ZnO at 250 °C by varying applied stress and characterizing grain boundaries by Kelvin Probe Force Microscopy // *Acta Materialia*. 2018. Vol. 144. P. 116–128 (DOI: 10.1016/j.actamat.2017.10.055).
 12. Valant M., Suvorov D., Pullar R.C., et al. A mechanism for low-temperature sintering // *Journal of the European Ceramic Society*. 2006. Vol. 26. P. 2777–2783 (DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2005.06.026).
 13. Cologna M., Rashkova B., Raj R. Flash sintering of nanograin zirconia in <5 s at 850°C // *Journal of the American Ceramic Society*. 2010. Vol. 93. P. 3556–3559 (DOI: 10.1111/j.1551-2916.2010.04089.x).
 14. Mucche N.F., Drazin W., John Mardinly et al. Colossal grain boundary strengthening in ultrafine nanocrystalline oxides // *Materials Letters*. 2017. Vol. 186. P. 298–300 (DOI: 10.1016/j.matlet.2016.10.035).
 15. Guo J., Guo H., Bakeret A.L. et al. Cold Sintering: A Paradigm Shift for Processing and Integration of Ceramics // *Angewandte Chemie International Edition*. 2016. Vol. 55. P. 11457–11461 (DOI: 10.1002/anie.201605443).
 16. Lai Y., Su H., Wang G. et al. Low - temperature sintering of microwave ceramics with high Qf values through LiF addition // *Journal of the American Ceramic Society*. 2019. Vol. 102. № 4. P. 1893–1903.
 17. Qin T., Zhong C., Qinet Y. et al. Low-temperature sintering mechanism and microwave dielectric properties of ZnAl₂O₄-LMZBS composites // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 797. P. 744–753.
 18. Hu Z.-Y., Zhang Z.-H., Chenget X.-W. et al. A review of multi-physical fields induced phenomena and effects in spark plasma sintering: Fundamentals and applications // *Materials & Design*. 2020. Vol. 191. P. 108662 (DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108662).
 19. Смирнов В.Л., Юровских А.С. Искровое плазменное спекание порошковых материалов системы Fe-N // XVII международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлослов-молодых ученых: сб. ст. в 2 ч. Екатеринбург, 2016. Ч. 2. С. 224–228.
 20. Jiang Q., Zhou J., Miaoet Y. et al. Lower-temperature preparation of SiC ceramic membrane using zeolite residue as sintering aid for oil-in-water separation // *J. Membrane Science*. 2020. Vol. 610. P. 118238.
 21. X. Jiang, G. Zhu, H. Xu et al. Preparation of high density ZnO ceramics by the Cold Sintering Process // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. N 14. P. 17382–17386.
 22. Kholodkova A.A., Kornushin M.V., Pakhomov M.A., et al. Water-Assisted Cold Sintering of Alumina Ceramics in SPS Conditions // *Ceramics*. 2023. Vol. 6. P. 1113–1128 (DOI: 10.3390/ceramics6020066).
 23. Корнюшин М.В. и др. Спекание оксидной керамики при пониженной температуре с использованием водной среды // *Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества: материалы докладов IX Международной конференции с элементами научной школы для молодежи (Суздаль, 03–07 октября 2022 года)*. Суздаль, 2022. С. 158–159.
 24. European Commission. *Ceramic Manufacturing Industry* // European Commission. 2007. P. 210–211.
 25. Padture N.P. Advanced structural ceramics in aerospace propulsion // *Nature Materials*. 2016. Vol. 15. P. 804–809 (DOI: 10.1038/nmat4687).
 26. Biesuz M., Grasso S., Sglavo V.M. What’s new in ceramics sintering? A short report on the latest trends and future prospects // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2020. Vol. 24 (DOI: 10.1016/j.cossms.2020.100868).
 27. Gutmanas E.Y., Rabinkin A., Roitberg M. Cold sintering under high pressure // *Scripta Metallurgica*. 1979. Vol. 13. P. 11–15 (DOI: 10.1016/0036-9748(79)90380-6).
 28. Maria J.-P., Kang X., Floydet R.D. et al. Cold sintering: Current status and prospects // *Journal of Materials Research*. 2017. Vol. 32. P. 3205–3218 (DOI: 10.1557/jmr.2017.262).
 29. Yamasaki N., Yanagisawa K., Nishiokaet M. et al. A hydrothermal hot-pressing method: Apparatus and application // *J/ Materials Science Letters*. 1986. Vol. 5. P. 355–356 (DOI: 10.1007/BF01748104).

30. Guo J.R. Floyd S. Lowum. et al. Cold Sintering: Progress, Challenges, and Future Opportunities // *Annual Review of Materials Research*. 2019. Vol. 49. P. 275–295 (DOI: 10.1146/annurev-matsci-070218-010041).
31. Sohrabi Baba Heidary D., Lanagan M., Randall C.A. Contrasting energy efficiency in various ceramic sintering processes // *Journal of the European Ceramic Society*. 2018. Vol. 38. P. 1018–1029 (DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.10.015).
32. Grasso S., Biesuz M., Zoliet L. et al. A review of cold sintering processes // *Advances in Applied Ceramics*. 2020. Vol. 119. P. 115–143 (DOI: 10.1080/17436753.2019.1706825).
33. Floyd R.D., Lowum S., Maria J.-P. Cold sintering zinc oxide with a crystalline zinc acetate dihydrate mass transport phase // *J. Materials Science*. 2020. Vol. 55. P. 15117–15129 (DOI: 10.1007/s10853-020-05100-9).
34. Dargatz B., Gonzalez-Julian J., Bramet M. et al. FAST/SPS sintering of nanocrystalline zinc oxide-Part I: Enhanced densification and formation of hydrogen-related defects in presence of adsorbed water // *Journal of the European Ceramic Society*. 2016. Vol. 36. P. 1207–1220 (DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2015.12.009).
35. Sengul M.Y. Jing Guo Dr., Randallet A. et al. Water-Mediated Surface Diffusion Mechanism Enables the Cold Sintering Process: A Combined Computational and Experimental Study // *Angewandte Chemie International Edition*. 2019. Vol. 58. P. 12420–12424 (DOI: 10.1002/anie.201904738).
36. Ivakin Y.D. Danchevskaya M. N., Muravieva G. P. Recrystallization of Zinc Oxide in a Sub- and Supercritical Water Medium // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2019. Vol. 13. P. 1189–1200 (DOI: 10.1134/S199079311907011X).
37. Ivakin Y. Smirnov A., Kholodkova A. et al. Comparative Study of Cold Sintering Process and Autoclave Thermo-Vapor Treatment on a ZnO Sample // *Crystals*. 2021. Vol. 11. P. 71 (DOI: 10.3390/cryst11010071).
38. Bang S.H. Tsuji K., Ndayishimiye A. et al. Toward a size scale-up cold sintering process at reduced uniaxial pressure // *Journal of the American Ceramic Society*. 2020. Vol. 103. P. 2322–2327 (DOI: 10.1111/jace.16976).
39. de Beauvoir T.H., Dursun S., Gao L. et al. New Opportunities in Metallization Integration in Cofired Electroceramic Multilayers by the Cold Sintering Process // *ACS Applied Electronic Materials*. 2019. Vol. 1. P. 1198–1207 (DOI: 10.1021/acsaelm.9b00184).
40. Jing Y., Luo N., Wu S. et al. Remarkably improved electrical conductivity of ZnO ceramics by cold sintering and post-heat-treatment // *Ceramics International*. 2018. Vol. 44. P. 20570–20574 (DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.07.192).
41. Wang D., Li L., Jiang J. et al. Cold sintering of microwave dielectric ceramics and devices // *J. Materials Research*. 2021 (DOI: 10.1557/s43578-020-00029-w).
42. Kang S., Zhao X., Guo J., et al. Thermal-assisted cold sintering study of Al₂O₃ ceramics: Enabled with a soluble γ -Al₂O₃ intermediate phase // *J. the European Ceramic Society*. 2023. Vol. 43. P. 478–485 (DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.10.039).
43. Hérisson de Beauvoir T., Estournès C. Translucent γ -AlOOH and γ -Al₂O₃ glass-ceramics using the cold sintering process // *Scripta Materialia*. 2021. Vol. 194. P. 113650 (DOI: 10.1016/j.scriptamat.2020.113650).
44. Funahashi S. Guo J., Guo H. et al. Demonstration of the cold sintering process study for the densification and grain growth of ZnO ceramics // *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 100. P. 546–553 (DOI: 10.1111/jace.14617).
45. Ma J. Xiao-Ming Chen, Wan-Qing Ouyang et al. Microstructure, dielectric, and energy storage properties of BaTiO₃ ceramics prepared via cold sintering // *Ceramics International*. 2018. Vol. 44. N 4. P. 4436–4441 (doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.044).
46. Tsuji K. Ndayishimiye A., Lowumet S et al. Single step densification of high permittivity BaTiO₃ ceramics at 300 °C // *J. the European Ceramic Society*. 2020. Vol. 40. N 4. P. 1280–1284 (doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.12.022).
47. Sada T. Ndayishimiye A., Fanet Z. et al. Surface modification of BaTiO₃ with catechol surfactant and effects on cold sintering // *J. Applied Physics*. 2021. Vol. 129. N 18. P. 184102.
48. Guo N., Shen H.-Z., Shen P. One-step synthesis and densification of BaTiO₃ by reactive cold sintering // *Scripta Materialia*. 2022. Vol. 213. P. 114628.
49. Ma J. Composition, microstructure and electrical properties of K_{0.5}Na_{0.5}NbO₃ ceramics fabricated by cold sintering assisted sintering // *Journal of the European Ceramic Society*. 2019. Vol. 39. N 4. P. 986–993.
50. Chi M., Ma W., Guo J. et al. Effect of NaCl on the microstructure and electrical properties of K_{0.5}Na_{0.5}NbO₃ ceramics prepared by cold sintering process // *J. Materials Science: Materials in Electronics*. 2019. Vol. 30. N 24. P. 21435–21443.
51. Cong L. Effect of dwell time on cold sintering assisted sintering based highly transparent 0.9 K_{0.5}Na_{0.5}NbO₃-0.1 LiBiO₃ ceramics // *J. Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 826. P. 154249.
52. Tsuji K. Fan Z., Bang S. et al. Cold sintering of the ceramic potassium sodium niobate, (K_{0.5}Na_{0.5})NbO₃, and influences on piezoelectric properties // *Journal of the European Ceramic Society*. 2022. Vol. 42. N 1. P. 105–111.
53. Wang D. Guo H., Morandiet C. et al. Cold sintering and electrical characterization of lead zirconate titanate piezoelectric ceramics // *APL Materials*. 2018. Vol. 6. N 1. P. 016101.
54. Wang D., Tsuji K., Randall C. et al. Model for the cold sintering of lead zirconate titanate ceramic composites // *Journal of the American Ceramic Society*. 2020. Vol. 103. N 9. P. 4894–4902.
55. Wang D. Dursun S., Gaoet Li. al. Fabrication of bimorph lead zirconate titanate thick films on metal substrates via the cold sintering-assisted process // *Acta Materialia*. 2020. Vol. 195. P. 482–490 (doi.org/10.1016/j.actamat.2020.05.053).

56. Induja I.J., Surendran K.P., Varma M.R. et al. Low κ , low loss alumina-glass composite with low CTE for LTCC microelectronic applications // *Ceramics International*. 2017. Vol. 43. N 1. P. 736–740.
57. Choi J., Luo Y., Wehrspohn R. et al. Perfect two-dimensional porous alumina photonic crystals with duplex oxide layers // *J. Applied Physics*. 2003. Vol. 94. N 8. P. 4757–4762.
58. Bowen P., Carry C. From powders to sintered pieces: forming, transformations and sintering of nanostructured ceramic oxides // *Powder Technology*. 2002. Vol. 128. P. 248–255.
59. Induja I.J., Sebastian M.T. Microwave dielectric properties of cold sintered Al₂O₃-NaCl composite // *Materials Letters*. 2018. Vol. 211. P. 55–57 (DOI: 10.1016/j.matlet.2017.09.083).
60. Suleiman B., Zhang H., Dinget Y. et al. Microstructure and mechanical properties of cold sintered porous alumina ceramics // *Ceramics International*. 2022 (DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.01.232).

Сведения об авторе

Михаил Андреевич Пахомов – аспирант, мл. науч. сотр. Института машиноведения РАН им. А.А. Благонравова (pakhomovmish@gmail.com)

Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека и животных.

Статья поступила в редакцию 07.10.2025;
одобрена после рецензирования 16.12.2025;
принята к публикации 01.02.2026.