

УДК 621.039:621-03

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2026-155-2-69-81>

## Многофазные литийсодержащие керамики на основе $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ , $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ , $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ : синтез, структура и упрочнение

Шлимас Д.И.<sup>1,2</sup>, Хаметова А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория физики твердого тела, Институт ядерной физики Агентства Республики Казахстан по атомной энергии, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup> Лаборатория инженерного профиля, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

E-mail:shlimas@mail.ru, khametovaaa@gmail.com

**Аннотация.** Исследовано влияние формирования двух- и трехфазных литийсодержащих керамик на основе  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  и  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  на их структурные и механические свойства в контексте применения в системах размножения трития. Целью исследования являлась оценка возможностей повышения механической устойчивости литийсодержащих керамик за счёт управления фазовым составом и реализации механизмов межфазного упрочнения.

Многофазные керамики получены методом механохимического твердофазного синтеза с последующей термической обработкой при  $700^\circ\text{C}$ . Фазовый состав и степень кристалличности образцов анализировались методом рентгеновской дифракции, а механические свойства оценивались методом оценки устойчивости к однократному сжатию. Показано, что используемый метод обеспечивает формирование керамик с высокой степенью кристалличности и стабильным фазовым составом.

Установлено, что варьирование соотношения фаз повышает критическую нагрузку разрушения при однократном сжатии двухфазных керамик более чем в 1.5 раза по сравнению с однофазными, а введение  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  обеспечивает дополнительное увеличение этого параметра для трехфазных керамик (до 1.5–1.6 раза относительно двухфазных материалов). Полученные результаты демонстрируют потенциал применения многофазных литийсодержащих керамик для использования в бланкетных системах термоядерных реакторов.

**Ключевые слова:** литийсодержащие керамики, механохимический синтез, допирование, двухфазные и трехфазные керамики, структурное упорядочение, межфазные границы

Поступила 12.02.2026. После доработки 14.04.2026. Принята к печати 21.04.2026. Доступно онлайн 30.06.2026.

\*автор для корреспонденции

## Введение

В последние годы ядерная и термоядерная энергетика занимают особое место среди перспективных энергетических направлений, обладая высокой энергоёмкостью и значительным потенциалом для долгосрочного устойчивого развития [1–3]. Использование бланкетных систем на основе литийсодержащих керамик, обеспечивающих взаимодействие нейтронов с литием и формирование топливных компонентов непосредственно в активной зоне реактора является ключевой особенностью термоядерных энергетических установок [4–6]. В качестве материалов-размножителей трития наибольшее распространение получили литийсодержащие керамики на основе  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  и  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ , привлекающие особое внимание благодаря высокой физической, термической стабильности, а также химической инертности [7–8]. Вместе с тем, молибдат лития ( $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ ) характеризуется структурной стабильностью и способен способствовать формированию плотной микроструктуры многофазных керамик за счёт особенностей синтеза и уплотнения, что делает его перспективным компонентом для микроструктурной модификации материалов и управления механическим откликом [9–10]. В то же время данные о влиянии  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  на механические свойства и межфазное упрочнение многофазных литийсодержащих керамик в условиях, приближенных к эксплуатации термоядерных установок, остаются ограниченными.

Эксплуатация литийсодержащих керамик в условиях термоядерных реакторов сопровождается воздействием высоких температур, термомеханических напряжений и механических нагрузок, что предъявляет повышенные требования к их прочностным и структурным характеристикам. Однако однофазные литийсодержащие керамики зачастую демонстрируют ограниченную устойчивость к растрескиванию и накоплению дефектов при внешнем воздействии, что обуславливает актуальность разработки многофазных систем [11–12]. Формирование двух- и трехфазных керамических материалов на основе литиевых соединений, а также введение молибдата лития ( $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ ) в качестве допанта открывают возможности реализации эффекта межфазного упрочнения за счет торможения распространения микротрещин и перераспределения механических напряжений [13–16]. Одним из эффективных методов получения таких материалов является механохимический твердофазный синтез, позволяющий формировать однородные порошковые системы с контролируемым фазовым составом, однако требующий оптимизации режимов последующей термической обработки для стабилизации структуры и сохранения высокой степени кристалличности, что и реализуется в настоящей работе [17].

Целью работы является поиск и отработка технологических решений создания двух- и трехфазных литийсодержащих керамик на основе соединений  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  и  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  с применением метода механохимического твердофазного синтеза. Объект исследования - многофазные литийсодержащие керамические материалы на основе соединений  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  и  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ .

Предметом исследования являются закономерности формирования фазового состава, микроструктуры и механических свойств указанных керамик в зависимости от соотношения фаз и условий синтеза. В настоящей работе впервые проведено систематическое исследование влияния вариации соотношения фаз и содержания допирующей компоненты  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  на фазовый состав, структурное упорядочение и механическую устойчивость двух- и трёхфазных литийсодержащих керамик, при однократном сжатии. Научный интерес работы обусловлен возможностью выявления закономерностей межфазного упрочнения в многофазных литийсодержащих керамиках, а практическая значимость связана с перспективами создания высокопрочных материалов-размножителей трития для бланкетных модулей термоядерных энергетических установок.

## Материалы и методы

В рамках настоящей работы исследовательский вопрос заключался в установлении влияния фазового состава и соотношения фаз на структурные и механические свойства многофазных литийсодержащих керамик на основе соединений  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  и  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ . В качестве рабочей гипотезы рассматривалось предположение о том, что формирование двух- и трехфазной структуры литийсодержащих керамик способствует повышению их механической устойчивости за счёт реализации механизмов межфазного упрочнения. Исследование включало последовательные этапы синтеза керамических материалов, их структурно-фазового анализа и оценку механической устойчивости керамик при однократном сжатии.

В качестве исходных объектов для исследования использовались порошки литийсодержащих керамик, такие как метатитанат лития ( $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ), метацирконат лития ( $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ ) и молибдат лития ( $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ ). Вариация соотношений компонент в двухфазных керамиках осуществлялась в диапазоне от 0.1 до 0.9 массовых долей (далее м.д.), в случае трехфазных керамик в качестве дополнительной компоненты использовался  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  порошок, весовой

вклад которого варьировался от 0.1 до 0.25 м.д. от общего состава порошков в керамике. Все исходные компоненты были приобретены у компании Sigma Aldrich, химическая чистота реактивов составляла порядка 99.95 %.

Механохимический твердофазный синтез для получения двух и трехфазных литийсодержащих керамик использовался для смешивания исходных компонентов и получения однородного и изотропного распределения литийсодержащих керамик. Смешивание проводилось в планетарной мельнице PULVERISETTE 6 (Fritsch, Берлин, Германия) при скорости помола 150 оборот/мин в течение 30 минут. Выбор низких скоростей смешивания обусловлен возможностями исключения интенсивного деформационного воздействия на литийсодержащие порошки при перемешивании, а также исключения эффекта дробления зерен и разрушения кристаллической структуры. После перемешивания полученные порошки с изотропным распределением каждой фазы в составе были подвергнуты запрессовке в таблетки диаметром 10 мм и толщиной порядка 1 мм для изучения структурных особенностей и механической прочности на устойчивость к внешним воздействиям при однократном сжатии. Запрессовка осуществлялась с использованием стандартного метода в цилиндрической пресс-форме, давление составляло 250 МПа, время прессования 30 минут.

После перемешивания и прессования полученные таблетки из порошков подвергались термической обработке в муфельной печи для снятия релаксации деформационных напряжений, возникших при смешивании и последующей запрессовки в таблетки. Термический отжиг проводился в муфельной печи Nabertherm LE 4/11/R6 (Nabertherm, Лилиенталь, Германия) при температуре 700 °С в течение 5 часов при скорости нагрева 20 °С/мин. Выбор температурных режимов отжига обусловлен возможностью исключения эффектов фазовых трансформаций в исходных порошках литийсодержащих керамик, возникающих при высоких температурах воздействия.

Оценка фазового состава и структурных параметров исследуемых литийсодержащих керамик в зависимости от вариации соотношения компонент в составе осуществлялась с использованием метода рентгеновской дифракции. Съемка дифрактограмм проводилась на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE ECO (Bruker, Карлсруэ, Германия) в геометрии Брегг – Брентано в угловом диапазоне  $2\theta=20-80^\circ$ , с шагом  $0.03^\circ$  и временем набора дифрактограммы в одной точке 1 сек. Расшифровка дифрактограмм реализовывалась в программном коде DiffracEVA v.4.2, определение фазового состава и уточнение параметров для всех установленных фаз было выполнено с использованием карточных значений из базы данных PDF-2. Весовые вклады каждой фазы были определены путем уточнения величин площадей всех дифракционных рефлексов, характерных для данной фазы с последующим вычислением их вклада в общей дифрактограмме с учетом корундовых чисел для каждой фазы.

Испытания на определение устойчивости к внешним воздействиям, в частности устойчивости к однократному сжатию, выполнялись методом одноосного сжатия образцов на испытательной машине LFM-L 10kN (Walter + Bai AG, Лёнинген, Швейцария). Нагружение осуществлялось с постоянной скоростью и было равным 0,05 мм/с. В ходе эксперимента регистрировалась зависимость приложенной нагрузки от деформации. Критическая нагрузка разрушения определялась при снижении давления не менее чем на 75% от максимального значения.

Для каждого состава было испытано не менее 4 образцов. Полученные значения критической нагрузки усреднялись, а в качестве итоговых значений приводились средние величины. Испытания проводились на образцах цилиндрической формы (таблетках) диаметром ~12 мм. Все образцы имели одинаковую геометрию и близкие линейные размеры, что обеспечивало корректность сравнительного анализа результатов механических испытаний по величине нагрузки.

### Результаты и обсуждение

На рисунках 1 – 3 приведены результаты рентгеновской дифракции исследуемых образцов двухфазных керамик в случае вариации компонентов в диапазоне от 0.1 до 0.9 м.д., а также на рисунках указаны дифрактограммы для однофазных керамик. В таблицах 1 – 3 представлены результаты структурных параметров, определенных на основе полученных дифрактограмм и их анализе. На всех рентгеновских дифрактограммах выведены также дифрактограммы однофазных керамик с целью отражения положения основных рефлексов для однофазных керамик, а также сравнительного анализа с двухфазными керамиками при смешивании их в различном соотношении компонентов в составе. Общий вид приведенных дифрактограмм для двухфазных керамик свидетельствует о достаточно высокой степени кристалличности и структурного упорядочения исследуемых образцов вне зависимости от соотношения компонентов в составе, из чего следует вывод о том, что при механическом смешивании компонентов и последующей термической обработке образцов с целью снятия деформационных напряжений в структуре величина структурного упорядочения сохраняется. В случае двухфазных керамик на основе соединений метатитаната лития и метацирконата лития вариация компонентов в составе керамик не приводит

к формированию новых фаз, кроме двух основных установленных для однофазных керамик – метатитанат лития с моноклинным типом кристаллической структуры (PDF-01-077-8280) и метацирконата лития с моноклинным типом кристаллической структуры (PDF-00-033-0843). При этом следует отметить, что оценка весовых вкладов в составе двухфазных керамик, проведенная на основе полученных дифрактограмм, показала хорошую сходимость определенных весовых вкладов и весовых долей каждого компонента, используемого для синтеза двухфазных керамик. Приведенные в таблице 1 результаты структурных параметров исследуемых керамик свидетельствуют о малом влиянии деформационного механического воздействия на отклонение параметров от эталонных значений, а малые изменения свидетельствуют о структурных эффектах, связанных с процессами смешивания и последующей термической релаксации.

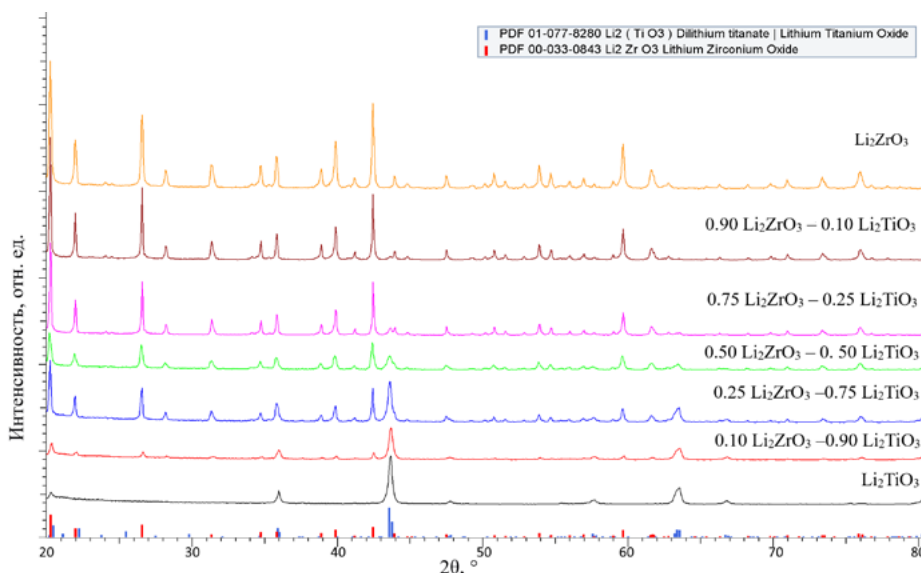
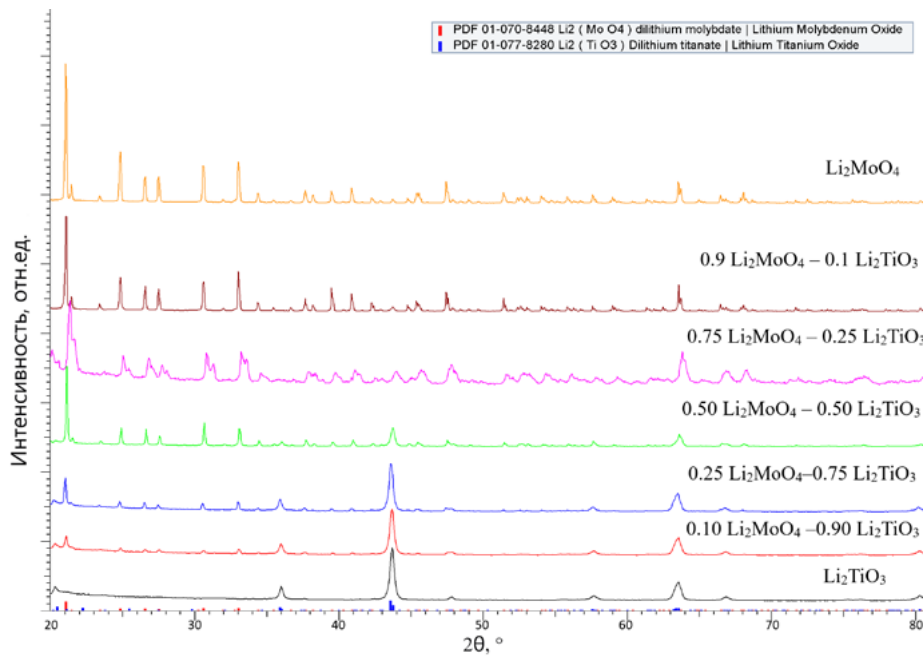


Рисунок 1. Результаты рентгеновской дифракции исследуемых  $\text{Li}_2\text{TiO}_3 - \text{Li}_2\text{ZrO}_3$  керамик

Таблица 1. Результаты структурных параметров исследуемых  $\text{Li}_2\text{TiO}_3 - \text{Li}_2\text{ZrO}_3$  керамик.

Фаза	Параметры кристаллической решетки						
	Концентрация компоненты $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ , м.д.						
	0.0	0.10	0.25	0.50	0.75	0.9	1.0
$\text{Li}_2\text{TiO}_3$	a=5.0335 Å, b=8.7754 Å, c=9.7361 Å, $\beta=100.310^\circ$ V=423.11 Å <sup>3</sup>	a=5.0514 Å, b=8.7479 Å, c=9.7246 Å, $\beta=99.996^\circ$ V=423.20 Å <sup>3</sup>	a=5.0454 Å, b=8.7652 Å, c=9.7896 Å, $\beta=99.917^\circ$ V=426.47 Å <sup>3</sup>	a=5.0653 Å, b=8.7408 Å, c=9.7284 Å, $\beta=100.035^\circ$ V=424.15 Å <sup>3</sup>	a=5.0673 Å, b=8.7721 Å, c=9.7743 Å, $\beta=100.507^\circ$ V=427.19 Å <sup>3</sup>	a=5.0494 Å, b=8.7618 Å, c=9.8049 Å, $\beta=99.996^\circ$ V=427.20 Å <sup>3</sup>	-
$\text{Li}_2\text{ZrO}_3$	-	a=5.4171 Å, b=9.0152 Å, c=5.4089 Å, $\beta=112.477^\circ$ V=244.08 Å <sup>3</sup>	a=5.4128 Å, b=9.0044 Å, c=5.4387 Å, $\beta=112.565^\circ$ V=244.78 Å <sup>3</sup>	a=5.4085 Å, b=9.0222 Å, c=5.4153 Å, $\beta=112.786^\circ$ V=243.62 Å <sup>3</sup>	a=5.4170 Å, b=9.0186 Å, c=5.4153 Å, $\beta=112.433^\circ$ V=244.54 Å <sup>3</sup>	a=5.4128 Å, b=9.0079 Å, c=5.4131 Å, $\beta=112.698^\circ$ V=243.49 Å <sup>3</sup>	a=5.4171 Å, b=9.0151 Å, c=5.4132 Å, $\beta=112.477^\circ$ V=244.27 Å <sup>3</sup>

В случае двухфазных керамик, полученных путем механического смешивания метатитаната лития и молибдата лития, также не наблюдается формирование каких-либо новых фаз, помимо двух основных, определенных для однофазных керамик, а малые смещения дифракционных рефлексов и их форма свидетельствует о малом деформационном воздействии фаз друг на друга при смешивании и последующем термическом воздействии.



**Рисунок 2. Результаты рентгеновской дифракции исследуемых Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> – Li<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> керамик**

Основные фазы, установленные в образцах, представляют собой моноклинную фазу Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> (PDF-01-077-8280) и ромбическую фазу Li<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> (PDF-01-070-8448). Оценка весовых вкладов показала хорошее согласие между результатами весовых долей используемых компонентов при смешивании и их весовыми вкладами на дифрактограммах в исследуемых образцах, полученными в зависимости от вариации соотношения компонентов в составе. Результаты структурных параметров, приведенные в таблице 2, также свидетельствуют о малом вкладе деформационного воздействия при смешивании двух компонентов в керамиках.

**Таблица 2 – Результаты структурных параметров исследуемых Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> – Li<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> керамик**

Фаза	Параметры кристаллической решетки						
	Концентрация компонента Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> , м.д.						
	0.0	0.10	0.25	0.50	0.75	0.9	1.0
Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub>	a=5.0642 Å, b=8.7479 Å, c=9.7586 Å, β=100.310°, V=425.29 Å <sup>3</sup>	a=5.0712 Å, b=8.8065 Å, c=9.7743 Å, β=100.310°, V=429.47 Å <sup>3</sup>	a=5.0395 Å, b=8.7135 Å, c=9.7858 Å, β=100.507°, V=422.50 Å <sup>3</sup>	a=5.0534 Å, b=8.7257 Å, c=9.6978 Å, β=99.760°, V=421.43 Å <sup>3</sup>	a=5.0792 Å, b=8.7514 Å, c=9.7207 Å, β=100.153°, V=425.32 Å <sup>3</sup>	a=5.0454 Å, b=8.7548 Å, c=9.7246 Å, β=100.035°, V=422.98 Å <sup>3</sup>	-
Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	-	a=14.2834 Å, c=9.5607 Å, V=1689.21 Å <sup>3</sup>	a=14.3227 Å, c=9.5607 Å, V=1698.53 Å <sup>3</sup>	a=14.2890 Å, c=9.5757 Å, V=1693.20 Å <sup>3</sup>	a=14.2946 Å, c=9.5682 Å, V=1693.20 Å <sup>3</sup>	a=14.2890 Å, c=9.5607 Å, V=1690.82 Å <sup>3</sup>	a=14.2721 Å, c=9.6246 Å, V=1697.82 Å <sup>3</sup>

В случае двухфазных керамик Li<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> – Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>, так же как и в случае других синтезированных типов двухфазных керамик, наличие примесных фаз, возникающих при смешивании двух компонентов не установлено, на дифрактограммах присутствуют только дифракционные рефлексы для фаз Li<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> (PDF-01-070-8448) с ромбическим типом кристаллической решетки и Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> (PDF-00-033-0843) с моноклинным типом кристаллической решетки. Оценка структурных параметров свидетельствует о малом влиянии деформационного механического воздействия при перемешивании двухфазных керамик на искажение кристаллической решетки (см. данные приведенные в таблице 3). Также в ходе исследований было обнаружено, что весовые вклады каждой установленной

фазы с применением метода рентгенофазового анализа имеют хорошее согласие с весовыми вкладами каждого компонента, используемого для смешивания образцов двухфазных керамик.

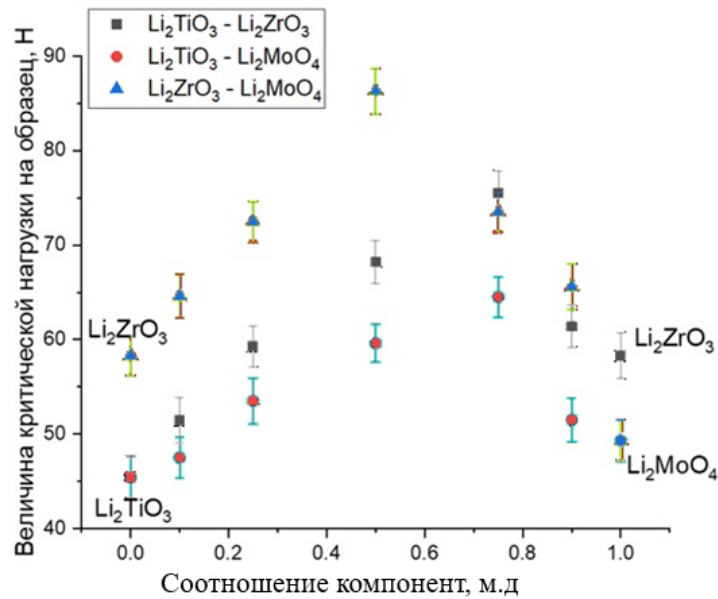


Рисунок 3. Результаты рентгеновской дифракции исследуемых  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  -  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  керамик

Таблица 3. Результаты структурных параметров исследуемых  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  -  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  керамик

Фаза	Параметры кристаллической решетки						
	Концентрация компонента $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ , м.д.						
	0.0	0.10	0.25	0.50	0.75	0.9	1.0
$\text{Li}_2\text{ZrO}_3$	a=5.4319 Å, b=9.0398 Å, c=5.4216 Å, $\beta=112.831^\circ$ , V=245.37 Å <sup>3</sup>	a=5.4181 Å, b=9.0309 Å, c=5.4036 Å, $\beta=113.162^\circ$ , V=243.09 Å <sup>3</sup>	a=5.4340 Å, b=9.0469 Å, c=5.3877 Å, $\beta=113.495^\circ$ , V=242.91 Å <sup>3</sup>	a=5.4244 Å, b=9.0309 Å, c=5.4078 Å, $\beta=113.295^\circ$ , V=243.32 Å <sup>3</sup>	a=5.4085 Å, b=9.0539 Å, c=5.4237 Å, $\beta=112.873^\circ$ , V=244.70 Å <sup>3</sup>	a=5.4011 Å, b=9.0699 Å, c=5.4162 Å, $\beta=112.762^\circ$ , V=244.66 Å <sup>3</sup>	-
$\text{Li}_2\text{MoO}_4$	-	a=14.4015 Å, c=9.5043 Å, V=1707.12 Å <sup>3</sup>	a=14.3817 Å, c=9.5322 Å, V=1707.44 Å <sup>3</sup>	a=14.3619 Å, c=9.5079 Å, V=1698.42 Å <sup>3</sup>	a=14.3253 Å, c=9.4763 Å, V=1684.14 Å <sup>3</sup>	a=14.3843 Å, c=9.5041 Å, V=1703.03 Å <sup>3</sup>	a=14.3648 Å, c=9.6321 Å, V=1721.18 Å <sup>3</sup>

На рисунке 4 приведены результаты оценки прочностных свойств керамик в зависимости от вариации типа компонентов в двухфазных литийсодержащих керамиках. Данные были получены в ходе экспериментальных работ, выполненных на испытательной машине с применением метода однократного сжатия образцов и фиксации максимальной нагрузки, при которой происходит деструкция таблетки и ее растрескивания. Фиксация образования трещин в образцах при изменении величины оказываемого давления на образец проводилось с применением метода экстензометрии. Также на графике приведены результаты определения величины критической нагрузки, способной выдержать при сжатии однокомпонентных (однофазных) керамик. Результаты приведены для сравнения и оценки эффективности упрочнения за счет эффектов, связанных с вариацией двух фаз в составе керамик. В основе рассматриваемого эффекта упрочнения в случае двухфазных керамик рассматривается эффект межфазного упрочнения, связанного с возникновением дополнительных границ зерен при вариации соотношения фаз, наличие которых приводит к созданию дополнительных барьеров, сдерживающих распространение микротрещин при изменении внешней нагрузки на образцы при сжатии.



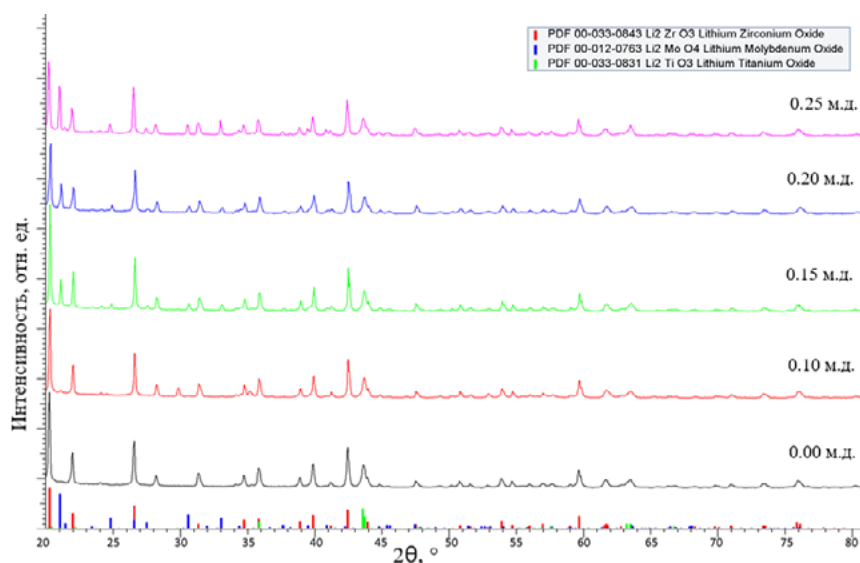
**Рисунок 4. Результаты оценки изменения прочностных свойств двухфазных керамик при вариации соотношения компонентов в составе, в случае определения величины максимальной нагрузки на образец**

Согласно приведенным данным видно, что использование предложенного метода смешивания двухфазных керамик приводит к увеличению эффективности и сопротивляемости к внешним механическим воздействиям при сжатии в сравнении с однофазными керамиками. При этом следует отметить, что  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  керамики обладают наименьшей устойчивостью к однократному сжатию среди однофазных керамик, а  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  керамики обладают наибольшей сопротивляемостью к внешнему механическому воздействию, приводящему к растрескиванию при однократном сжатии. В случае  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  керамик величина критической нагрузки, при которой наблюдается растрескивание, составляет порядка  $45 \pm 2$  Н, для  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  керамик данная величина составляет порядка  $58 \pm 2$  Н, для  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  керамик величина составляет порядка  $49 \pm 2$  Н, что больше, чем для метатитаната лития. В случае двухфазных литийсодержащих керамик при смешивании метатитаната лития и метацирконата лития увеличение соотношения компонентов в составе с 0.1 до 0.75 м.д.  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  приводит к росту величины критической нагрузки с 51 до 75 Н, что более чем в 1.5 раза больше величины критической нагрузки, способной выдержать однофазной  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  керамикой. При этом увеличение содержания метацирконата лития до 0.9 м.д. приводит к снижению эффективности устойчивости к внешним механическим воздействиям при сжатии, из чего следует, что наблюдаемый эффект упрочнения, вероятно, связан с наличием межфазных границ, что может обуславливать сдерживание распространения микротрещин при сжатии и изменении нагрузки на образец. В данном случае можно предположить, что сдерживание осуществляется на межфазных границах, изменение плотности которых приводит к росту сопротивляемости к деградации при сжатии.

В случае  $\text{Li}_2\text{TiO}_3 - \text{Li}_2\text{MoO}_4$  изменение соотношения компонентов в составе керамик приводит к повышению величины критической нагрузки с  $45 \pm 2$  Н (в случае однофазной  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  керамикой) до 59 – 64 Н в случае, когда доля  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  составляет 0.5 – 0.75 м.д. При этом следует отметить, что увеличение доли  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  до 0.9 м.д. в составе приводит к снижению величины критической нагрузки до  $51 \pm 2$  Н, что свидетельствует о снижении эффекта упрочнения за счет доминирования свойств одной из двух фаз в составе керамик.

В случае  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3 - \text{Li}_2\text{MoO}_4$  керамик величина максимальной нагрузки, способной выдержать керамикой, при концентрациях  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  равной 0.5 – 0.75 м.д. составляет порядка 73 – 86 Н, что значительно выше, чем в случае двух других вариаций компонентов двухфазных керамик, полученных при смешивании метатитаната лития и молибдата лития и метатитаната лития и метацирконата лития. В данном случае эффект упрочнения, вероятно, обусловлен совокупностью эффектов наличия межфазных границ в составе керамик, а также более высокими показателями прочности и устойчивости к растрескиванию метацирконата лития и молибдата лития по сравнению с метатитанатом лития.

На рисунке 5 приведены результаты рентгеновской дифракции исследуемых трехфазных литийсодержащих керамик, полученных методом механического твердофазного смешивания. В качестве основы использовалась система  $\text{Li}_2\text{TiO}_3 - \text{Li}_2\text{ZrO}_3$ , полученная путем смешивания двух типов керамик в равном соотношении компонентов. В качестве допанта использовался молибдат лития, добавление которого осуществлялось к двухфазной керамике на этапе механического смешивания в соотношении компонентов от 0.10 до 0.25 м.д.



**Рисунок 5. Результаты рентгеновской дифракции трехфазных литийсодержащих керамик при вариации соотношения компонентов в составе и добавлении в состав  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$**

В таблице 4 приведены результаты оценки структурных параметров исследуемых керамик в зависимости от типа и соотношения компонентов в составе. После перемалывания в планетарной мельнице и запрессовке в таблетки, полученные образцы подвергались термической обработке. Рентгеновские дифрактограммы приведены для образцов после термического отжига. Общий вид полученных дифрактограмм в зависимости от вариации компонентов в составе свидетельствует об отсутствии процессов фазовых трансформаций, вызванных механически-деформационным воздействием и последующим термическим отжигом. При этом форма дифракционных рефлексов свидетельствует о положительном воздействии термического отжига, приводящего к релаксации деформационных напряжений и искажений, вызванных механическим воздействием мелющих тел в процессе перемешивания. Стоит также отметить, что на представленных дифрактограммах, в зависимости от изменения соотношения компонентов, в составе формирования новых фаз, кроме основных, характерных для исследуемых порошков, не наблюдается, что, в свою очередь, подтверждает отсутствие фазовых трансформаций в процессе смешивания и последующего термического воздействия.

**Таблица 4. Данные структурных параметров для трехфазных литийсодержащих керамик**

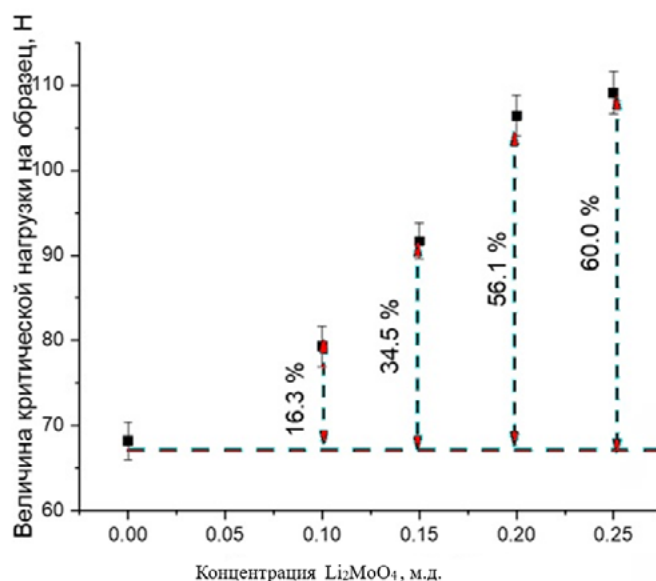
Весовой вклад $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ в составе керамик, м.д.	$\text{Li}_2\text{TiO}_3$ – (PDF-00-033-0831), моноклинная, $C2/c(15)$	$\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ – (PDF-00-033-0843), моноклинная, $C2/c(15)$	$\text{Li}_2\text{MoO}_4$ – (PDF-00-012-0763), ромбоэдрическая, $R-3(148)$
0	$a=5.05608 \text{ \AA}$ , $b=8.78347 \text{ \AA}$ , $c=9.72264 \text{ \AA}$ , $\beta=100.062^\circ$ , $V=425.14 \text{ \AA}^3$	$a=5.42979 \text{ \AA}$ , $b=9.04340 \text{ \AA}$ , $c=5.43652 \text{ \AA}$ , $\beta=112.720^\circ$ , $V=246.24 \text{ \AA}^3$	-
0.1	$a=5.06403 \text{ \AA}$ , $b=8.77657 \text{ \AA}$ , $c=9.72264 \text{ \AA}$ , $\beta=100.023^\circ$ , $V=423.53 \text{ \AA}^3$	$a=5.41915 \text{ \AA}$ , $b=9.0860 \text{ \AA}$ , $c=5.41100 \text{ \AA}$ , $\beta=112.676^\circ$ , $V=244.01 \text{ \AA}^3$	$a=14.37897 \text{ \AA}$ , $c=9.57198 \text{ \AA}$ , $V=1713.91 \text{ \AA}^3$
0.15	$a=5.05608 \text{ \AA}$ , $b=8.76967 \text{ \AA}$ , $c=9.78770 \text{ \AA}$ , $\beta=100.062^\circ$ , $V=427.31 \text{ \AA}^3$	$a=5.40638 \text{ \AA}$ , $b=9.00798 \text{ \AA}$ , $c=5.41313 \text{ \AA}$ , $\beta=113.007^\circ$ , $V=242.65 \text{ \AA}^3$	$a=14.30025 \text{ \AA}$ , $c=9.57198 \text{ \AA}$ , $V=1695.20 \text{ \AA}^3$

0.20	a=5.06005 Å, b=8.78347 Å, c=9.74561 Å, β=100.141°, V=426.37 Å <sup>3</sup>	a=5.41489 Å, b=9.01506 Å, c=5.40675 Å, β=112.433°, V=243.96 Å <sup>3</sup>	a=14.28901 Å, c=9.57574 Å, V=1693.20 Å <sup>3</sup>
0.25	a=5.06403 Å, b=8.78002 Å, c=9.74561 Å, β=100.023°, V=426.70 Å <sup>3</sup>	a=5.44043 Å, b=9.06464 Å, c=5.40888 Å, β=112.433°, V=246.56 Å <sup>3</sup>	a=14.33961 Å, c=9.56822 Å, V=1703.87 Å <sup>3</sup>

Оценка весовых вкладов показала, что в случае исходных двухфазных керамик использование равновероятного соотношения двух компонентов – метатитаната лития и метацирконата лития позволяет получить равное соотношение весовых вкладов фаз, установленных в составе двухфазных керамик. При добавлении молибдата лития в состав двухфазных керамик оценка весовых вкладов показала хорошее согласие между используемым весовым соотношением допанта и весовым вкладом, установленным для данной фазы при оценке фазового состава керамик. Оценка данных структурных параметров исследуемых фаз в составе керамик, выполненная с применением метода уточнения параметров и сравнения их с результатами для эталонных значений, взятых из базы данных PDF-2, показала, что механическое воздействие при перемалывании и последующем термическом отжиге приводит к незначительному отличию экспериментальных параметров от эталонных значений, обусловленных деформационным искажением при смешивании и воздействии фаз друг на друга, а также возможной инициализацией процессов катионного замещения при смешивании фаз и их контакте друг с другом в результате механического перемалывания, однако данный эффект в наблюдаемых образцах минимальный.

На рисунке 6 приведены результаты оценки величины критической нагрузки, способной выдержать трехфазной керамикой при однократном сжатии, отражающей устойчивость к внешним механическим нагрузкам. Полученные результаты свидетельствуют о влиянии вариации соотношения компонентов в составе трехфазных керамик на упрочнение и повышение устойчивости к внешним воздействиям при сжатии и механических нагрузках.

Как видно из представленных данных добавление в состав Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> – Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> керамик допанта Li<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> приводит к увеличению сопротивляемости к внешним механическим нагрузкам, при этом изменение концентрации с 0.1 до 0.15 м.д. приводит к росту эффективности с 16 до 34 %, в то время как увеличение концентрации до 0.2 – 0.25 м.д. приводит к росту эффективности сопротивляемости к растрескиванию до 56 – 60 %. Однако следует также отметить, что в случае увеличения концентрации допанта с 0.2 до 0.25 м.д. эффективность сопротивляемости к растрескиванию возрастает всего на 4 %, в то время как при меньших концентрациях рост доли допанта в составе приводит к более значимым эффектам упрочнения до 15 – 20 %.



**Рисунок 6. Результаты оценки величины критической нагрузки, при которой наблюдается растрескивание образцов керамик в зависимости от соотношения компонентов в трехфазных керамиках**

Наблюдаемый эффект упрочнения свидетельствует о достаточно высокой эффективности использования метода модификации двухфазных керамик путем добавления третьего компонента в состав, наличие которого при малых концентрациях приводит к росту эффективности упрочнения более чем в 1.3 – 1.5 раза по сравнению с двухфазными керамиками.

### Заключение

Методом механохимического твердофазного синтеза с последующей термической обработкой получены двух- и трехфазные литийсодержащие керамики на основе  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  и  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  с различной вариацией соотношения компонентов. Рентгенофазовый анализ выявил отсутствие примесных фаз и высокую степень кристалличности синтезированных образцов при сохранении параметров кристаллических решёток, близких к эталонным значениям.

Установлено, что формирование двухфазных керамик сопровождается увеличением устойчивости к однократному сжатию по сравнению с однофазными материалами, при этом наибольший эффект упрочнения достигается при промежуточных соотношениях фаз (0.5–0.75 м.д.). Вместе с тем установлено, что введение  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  в систему  $\text{Li}_2\text{TiO}_3 - \text{Li}_2\text{ZrO}_3$  в качестве допанта обеспечивает дополнительное повышение прочности за счёт формирования трехфазной структуры по сравнению с двухфазными керамиками.

Полученные результаты свидетельствуют о потенциальной перспективности формирования многофазных литийсодержащих керамик для применения в качестве бланкетных материалов термоядерных энергетических установок. Для их практического применения необходимы дополнительные исследования, в том числе проверка на возможное формирование армирующего эффекта за счет межфазных границ, а также проведение испытаний на радиационную стойкость.

### Благодарность

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (No. BR28712757).

### Вклад авторов

**Хаметова А.А.** выполнила синтез и подготовку образцов литийсодержащих керамик, структурно-фазовый анализ и механические испытания, обработку и интерпретацию экспериментальных данных, подготовила первоначальную рукопись статьи.

**Шлимас Д.И.** участвовал в разработке научной концепции исследования, осуществил структурно-фазовый анализ, интерпретировал полученные результаты, выполнил критический пересмотр рукописи с точки зрения научного содержания и структуры, утвердил окончательный вариант статьи для публикации.

### Список литературы

1. E. R. Sadik-Zada, A. Gatto, and Y. Weibnicht, Back to the Future: Revisiting the Perspectives on Nuclear Fusion and Juxtaposition to Existing Energy Sources, *Energy* 290, 129150 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129150>
2. International Atomic Energy Agency, What is Nuclear Fusion? <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-fusion> (accessed January 21, 2026).
3. D. J. Rose, M. Clark Jr., and H. Chang, *Plasmas and Controlled Fusion* (Cambridge University Press, Cambridge, 1961).
4. R. Knitter et al., Recent developments of solid breeder fabrication, *J. Nucl. Mater.* 442, S420 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.02.060>
5. S. Konishi et al., Functional materials for breeding blankets—status and developments, *Nucl. Fusion* 57, 092014 (2017). DOI: 10.1088/1741-4326/aa7e4e
6. F. A. Hernández and P. Pereslavitsev, First principles review of options for tritium breeder and neutron multiplier materials for breeding blankets in fusion reactors, *Fusion Eng. Des.* 137, 243 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.09.014>
7. D. K. Meena et al., Inelastic scattering and first-principles study of tritium breeder materials  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  and  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ , *Radiat. Phys. Chem.* 203, 110630 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110630>
8. K. A. Rex et al., Defect properties and lithium incorporation in  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ , *Energies* 14, 3963 (2021). <https://doi.org/10.3390/en14133963>

9. R. Yang et al., Low-temperature sintering and microwave dielectric properties of glass-free  $\text{SrWO}_4$ - $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  ceramics, *Ceram. Int.* 49, 39959 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.09.306>
10. M. Väättäjä et al.,  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ -based composite ceramics fabricated from temperature- and atmosphere-sensitive  $\text{MnZn}$  ferrite at room temperature, *J. Am. Ceram. Soc.* 100, 3626 (2017). <https://doi.org/10.1111/jace.14914>
11. J. D. Lulewicz and N. Roux, First results of the investigation of  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  and  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  pebbles, *Fusion Eng. Des.* 39, 745 (1998). [https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(98\)00328-7](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(98)00328-7)
12. S. Gu et al., Mechanical strength stability of tritium breeding materials under high-temperature deuterium conditions, *Ceram. Int.* 46, 1195 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.092>
13. N. Chen et al., Cold-sintered  $\text{Ni}_{0.2}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ - $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  ceramic composites with enhanced magnetodielectric properties, *J. Eur. Ceram. Soc.* 41, 1310 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.09.034>
14. N. Kuzmić et al., Dielectric properties of upside-down  $\text{SrTiO}_3/\text{Li}_2\text{MoO}_4$  composites fabricated at room temperature, *Front. Mater.* 8, 669421 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.669421>
15. H. Zhang et al., Preparation of  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  using aqueous solution method and microwave dielectric properties after sintering, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 27, 5422 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10854-016-4444-2>
16. O. Gavaldá-Díaz et al., Toughening of ceramics and ceramic composites through microstructure engineering: A review, *Int. Mater. Rev.* 70, 3 (2025). <https://doi.org/10.1177/09506608241308337>
17. Z. Qiang, J. Hu, and B. Jiang, Mechanochemical synthesis of advanced materials for all-solid-state battery (ASSB) applications: A review, *Polymers* 17, 2340 (2025). <https://doi.org/10.3390/polym17172340>

**Шлимас Д.И.<sup>1,2</sup>, Хаметова А.А.<sup>1,2\*</sup>**

<sup>1</sup>Қатты дене физикасы зертханасы, Қазақстан Республикасы  
Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Инженерлік бейіндегі зертхана, Л.Н. Гумилев атындағы  
Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

(E-mail: shlimas@mail.ru, khametovaaa@gmail.com)

### **$\text{Li}_2\text{TiO}_3$ , $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ , $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ негізіндегі көпфазалы литийқұрамды керамикалар: синтез, құрылым және беріктену**

**Аңдатпа.**  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  және  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  негізіндегі екіфазалы және үшфазалы литийқұрамды керамикалардың қалыптасуының олардың құрылымдық және механикалық қасиеттеріне әсері тритийді көбейту жүйелерінде қолдану тұрғысынан зерттелді. Зерттеудің мақсаты фазалық құрамды басқару және фазалар арасындағы беріктену механизмдерін іске асыру арқылы литийқұрамды керамикалардың механикалық тұрақтылығын арттыру мүмкіндіктерін бағалау болды.

Көпфазалы керамикалық материалдар механохимиялық қаттыфазалы синтез әдісімен, кейін 700 °С температурада термиялық өңдеу жүргізу арқылы алынды. Үлгілердің фазалық құрамы мен кристалдылық дәрежесі рентгенфазалық талдау әдісімен зерттелді, ал механикалық қасиеттері бір бағытта сығу төзімділігін бағалау арқылы анықталды. Қолданылған синтез әдісі жоғары кристалдылық дәрежесі мен тұрақты фазалық құрамға ие керамикалардың түзілуін қамтамасыз ететіні көрсетілді.

Фазалар арақатынасының өзгеруі екіфазалы керамикалардың бір бағытта сығу кезіндегі критикалық бұзылу жүктемесінің бірфазалы материалдармен салыстырғанда 1.5 еседен астам артуына әкелетіні анықталды, ал  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  енгізілуі үшфазалы керамикалар үшін бұл көрсеткіштің қосымша өсуін қамтамасыз етеді (екіфазалы материалдармен салыстырғанда 1.5–1.6 есеге дейін). Алынған нәтижелер көпфазалы литийқұрамды керамикалардың термоядролық реакторлардың бланкет жүйелерінде қолдану үшін перспективалы екенін көрсетеді.

**Түйін сөздер:** литийқұрамды керамикалар, механохимиялық синтез, қоспалау, екіфазалы және үшфазалы керамикалар, құрылымдық реттелу, фазааралық шекаралар.

D.I. Shlimas<sup>1,2</sup>, A.A. Khametova<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>Laboratory of Solid State Physics, Institute of Nuclear Physics of the Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy, Almaty, Kazakhstan<sup>2</sup>Engineering Profile Laboratory, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan(E-mail: [shlimas@mail.ru](mailto:shlimas@mail.ru), [khametovaaa@gmail.com](mailto:khametovaaa@gmail.com))**Multiphase lithium-containing ceramics based on  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ : synthesis, structure, and strengthening**

**Abstract.** The influence of the formation of two- and three-phase lithium-containing ceramics based on  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ , and  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  on their structural and mechanical properties was investigated in the context of their application in tritium breeding systems. The aim of the study was to evaluate the possibility of enhancing the mechanical stability of lithium-containing ceramics by controlling the phase composition and implementing interphase strengthening mechanisms.

Multiphase ceramic materials were synthesized using a mechanochemical solid-state method followed by thermal treatment at 700 °C. The phase composition and degree of crystallinity of the samples were analyzed by X-ray diffraction, while the mechanical properties were evaluated by assessing the resistance to uniaxial compression. It was shown that the applied synthesis route provides the formation of ceramics with a high degree of crystallinity and a stable phase composition.

It was established that variation of the phase ratio leads to an increase in the critical fracture load under uniaxial compression of two-phase ceramics by more than 1.5 times compared to single-phase materials, while the introduction of  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  provides an additional increase of this parameter for three-phase ceramics (up to 1.5–1.6 times relative to two-phase materials). The obtained results demonstrate the potential of multiphase lithium-containing ceramics for application in blanket systems of thermonuclear reactors.

**Keywords:** lithium-containing ceramics, mechanochemical synthesis, doping, two-phase and three-phase ceramics, structural ordering, interphase boundaries.

**References**

1. E. R. Sadik-Zada, A. Gatto, and Y. Weibnicht, Back to the Future: Revisiting the Perspectives on Nuclear Fusion and Juxtaposition to Existing Energy Sources, *Energy* 290, 129150 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129150>
2. International Atomic Energy Agency, What is Nuclear Fusion? <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-fusion> (accessed January 21, 2026).
3. D. J. Rose, M. Clark Jr., and H. Chang, *Plasmas and Controlled Fusion* (Cambridge University Press, Cambridge, 1961).
4. R. Knitter et al., Recent developments of solid breeder fabrication, *J. Nucl. Mater.* 442, S420 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.02.060>
5. S. Konishi et al., Functional materials for breeding blankets—status and developments, *Nucl. Fusion* 57, 092014 (2017). DOI: 10.1088/1741-4326/aa7e4e
6. F. A. Hernández and P. Pereslavitsev, First principles review of options for tritium breeder and neutron multiplier materials for breeding blankets in fusion reactors, *Fusion Eng. Des.* 137, 243 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.09.014>
7. D. K. Meena et al., Inelastic scattering and first-principles study of tritium breeder materials  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  and  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ , *Radiat. Phys. Chem.* 203, 110630 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110630>
8. K. A. Rex et al., Defect properties and lithium incorporation in  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ , *Energies* 14, 3963 (2021). <https://doi.org/10.3390/en14133963>
9. R. Yang et al., Low-temperature sintering and microwave dielectric properties of glass-free  $\text{SrWO}_4$ - $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  ceramics, *Ceram. Int.* 49, 39959 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.09.306>
10. M. Väätäjä et al.,  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ -based composite ceramics fabricated from temperature- and atmosphere-sensitive MnZn ferrite at room temperature, *J. Am. Ceram. Soc.* 100, 3626 (2017). <https://doi.org/10.1111/jace.14914>
11. J. D. Lulewicz and N. Roux, First results of the investigation of  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  and  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  pebbles, *Fusion Eng. Des.* 39, 745 (1998). [https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(98\)00328-7](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(98)00328-7)
12. S. Gu et al., Mechanical strength stability of tritium breeding materials under high-temperature deuterium condi-

- tions, *Ceram. Int.* 46, 1195 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.092>
13. N. Chen et al., Cold-sintered Ni<sub>0.2</sub>Cu<sub>0.2</sub>Zn<sub>0.6</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-Li<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> ceramic composites with enhanced magnetodielectric properties, *J. Eur. Ceram. Soc.* 41, 1310 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.09.034>
  14. N. Kuzmić et al., Dielectric properties of upside-down SrTiO<sub>3</sub>/Li<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> composites fabricated at room temperature, *Front. Mater.* 8, 669421 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.669421>
  15. H. Zhang et al., Preparation of Li<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> using aqueous solution method and microwave dielectric properties after sintering, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 27, 5422 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10854-016-4444-2>
  16. O. Gavalda-Diaz et al., Toughening of ceramics and ceramic composites through microstructure engineering: A review, *Int. Mater. Rev.* 70, 3 (2025). <https://doi.org/10.1177/09506608241308337>
  17. Z. Qiang, J. Hu, and B. Jiang, Mechanochemical synthesis of advanced materials for all-solid-state battery (ASSB) applications: A review, *Polymers* 17, 2340 (2025). <https://doi.org/10.3390/polym17172340>

#### Сведения об авторах:

**Д.И. Шлимас** - PhD, СИС Лаборатории физики твердого тела Астанинского филиала Института ядерной физики Агентства Республики Казахстан по атомной энергии, Алматы, Казахстан.

**А.А. Хаметова** - автор для корреспонденции, PhD, инженер Лаборатории физики твердого тела Астанинского филиала Института ядерной физики Агентства Республики Казахстан по атомной энергии, Алматы, Казахстан,

**Д.И. Шлимас** - PhD, Қазақстан Республикасы Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің Ядролық физика институтының Астана филиалы Қатты дене физикасы зертханасының аға ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан.

**А.А. Хаметова** - хат-хабар авторы, PhD, Қазақстан Республикасы Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің Ядролық физика институтының Астана филиалы Қатты дене физикасы зертханасының инженері, Алматы, Қазақстан.

**D.I. Shlimas** - PhD, Senior Researcher, Laboratory of Solid State Physics, Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics of the Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy, Almaty, Kazakhstan.

**A.A. Khametova** – the corresponding author, PhD, Engineer, Laboratory of Solid State Physics, Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics of the Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy, Almaty, Kazakhstan.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).