

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-132-139>

УДК: 539.213.26; МРНТИ 29.19.11; 29.19.21

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ СТРУКТУРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОМПОЗИТНЫХ CER-CER КЕРАМИКАХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ, СРАВНИМЫМИ С ОСКОЛКАМИ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Ш. Г. Гиниятова¹, А. Л. Козловский^{1,2*}, Д. И. Шлимас^{1,2}

¹ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

² РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан

* E-mail для контактов: kozlovskiy.a@inp.kz

В работе представлены результаты оценки изменений структурных, прочностных и теплофизических параметров композитных керамик по типу сег-сег на основе оксидных соединений к радиационным повреждениям, вызванным высокотемпературным облучением тяжелыми ионами Kr^{15+} и He^{23+} . В ходе проведенных исследований установлены взаимосвязи между изменениями структурных параметров, обусловленных деформационным искажением кристаллической структуры и увеличением ее объема, с результатами оценки деградации прочностных и теплофизических параметров. Определено, что увеличение флюенса облучения приводит к накопительному эффекту деградации свойств керамик, при этом в случае облучения тяжелыми ионами He^{23+} эффект структурного разупорядочения и деградации прочностных и теплофизических параметров более выражен, чем в случае облучения ионами Kr^{15+} . Данное явление обусловлено различиями в величинах ионизационных потерь налетающих ионов, а также размерами поврежденных областей, возникающих в результате взаимодействия налетающих ионов с кристаллической структурой поврежденного слоя. При этом наиболее стабильными к радиационно-стимулированным процессам разупрочнения являются двухфазные $Al_2O_3 - ZrO_2$ керамики, в которых наличие межфазных границ приводит к увеличению сопротивляемости к разупрочнению и деструкции при высокодозном облучении. В качестве механизма сдерживания радиационных повреждений в случае двухфазных керамик рассматривается наличие межфазных границ, выступающих барьерными преградами, останавливающими диффузию точечных и вакансионных дефектов, а также снижающих степень структурного разупорядочения поврежденного слоя.

Ключевые слова: радиационные повреждения; композитные керамики; дефектные включения; разупорядочение; газовое распухание; теплопроводность.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из перспективных методов решения проблем в области энергетического сектора, связанных с отказом от углеводородов и снижением количества используемых ископаемых видов топлива для производства энергии, является расширение применимости альтернативных методов производства энергии [1, 2]. При этом среди альтернативных способов получения энергии большое внимание уделяется ядерной энергетике, увеличение доли которой в энергетическом секторе позволит решить большую часть вопросов, связанных с нехваткой энергоресурсов, а также со снижением вредных выбросов в атмосферу при сжигании ископаемого топлива (нефти, газа, угля). Наиболее перспективным решением в области увеличения мощностей ядерных реакторов, а также повышения сроков эксплуатации и степени выгорания ядерного топлива является перевод ядерных реакторов с классических твэлов на использование дисперсного ядерного топлива, в основе технологии которых лежит размещение делящегося ядерного материала в инертных матрицах (оксиды, нитриды, карбиды), использование которых позволяет увеличить устойчивость к радиационному охрупчиванию и распуханию (характерному для металлических сплавов и сталей), а также повысить темпе-

ратуру эксплуатации до 600–700 °C за счет высокой термической стабильности инертных керамик к тепловому расширению и высокотемпературной деградации [3–6]. Одним из классов материалов, предлагаемых для создания дисперсного топлива являются композиты по типу сег-сег, в основе которых лежит использование соединений двух типов керамик, совокупность свойств которых позволит создать инертную матрицу, обладающую высокой устойчивостью к внешним воздействиям (механическим, коррозионным, высокотемпературному нагреву), а также к радиационному охрупчиванию и газовому распуханию, которые являются одними из сдерживающих факторов, определяющих перспективность использования композитных керамик в качестве инертных матриц дисперсного ядерного топлива [7, 8]. При этом немаловажную роль в изучении применимости подобных керамик уделяется изучению фундаментальных основ накопления радиационных повреждений и структурных изменений в инертных матрицах, сравнимых с реальными условиями воздействия, знание которых позволит спрогнозировать поведение материалов при высокодозном радиационном воздействии, а также установить пределы допустимых изменений свойств керамик в результате воздействия ионизирующего излучения. Результаты подобных исследова-

ний в дальнейшем могут послужить для расширения общих представлений механизмов взаимодействия налетающих ионов с кристаллической структурой керамик, а также оценить кинетику накопления повреждений в зависимости от флюенса (дозы или величины атомных смещений), что позволит определить критически допустимые дозы облучения, при достижении которых происходит ускорение процессов деструкции и дестабилизации поврежденного слоя [9–12].

Цель данного исследования заключается в определении влияния высокотемпературного облучения тяжелыми ионами Kr^{15+} и He^{23+} с энергиями 150 и 230 МэВ, воздействие которых сравнимо с воздействием осколков деления ядерного топлива на изменение структурных, прочностных и теплофизических параметров композитных керамик по типу сег-сег. Выбор типов ионов для облучения, а также флюенсов и температуры облучения обусловлен возможностями моделирования максимально приближенных условий накопления радиационных повреждений в приповерхностном слое сег-сег керамик к реальным условиям эксплуатации данных керамик при использовании их в качестве материалов инертных матриц дисперсного ядерного топлива в реакторах нового поколения. При этом выбор сег-сег керамик в качестве объектов исследований обусловлен возможностями увеличения стабильности к радиационно-индуцированным процессам деструкции керамик, что в свою очередь позволит увеличить срок их эксплуатации в качестве материалов инертных матриц, а также увеличить глубину выгорания ядерного топлива, которого сопровождается большим количеством структурных искажений, вызванных воздействием осколков деления [12–14]. Концепция использования композитных сег-сег керамик в качестве основы для создания инертных матриц дисперсного ядерного топлива заключается в возможности увеличения сроков эксплуатации топливных элементов за счет увеличения глубины выгорания, а также увеличения сопротивляемости инертного материала к деструктивному охрупчиванию и разупорядочению при высокодозном воздействии осколков деления ядерного топлива в зоне соприкосновения делящегося ядерного материала и инертной матрицы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Интерес к изучению радиационных повреждений, а также их накоплению в приповерхностном слое керамик – материалов инертных матриц дисперсного ядерного топлива, обусловлен возможностями получения данных о поведении материалов ядерного топлива при длительной эксплуатации в условиях воздействия осколков деления (He , Kr с энергиями 150–250 МэВ). При этом наибольшему радиационному воздействию подвергается приповерхностный слой толщиной 15–20 мкм, деструкция которого под действием накопления радиационных повреждений может привести к разупрочнению и охрупчиванию, что

впоследствии может инициировать процессы локального перегрева за счет ухудшения теплофизических параметров, а также разрушению материала инертной матрицы. Также следует отметить, что в силу своей природы накопление осколков деления может привести к возникновению газовых включений при их агломерации и последующему деформационному искажению кристаллической структуры. Для моделирования данных процессов с целью определения оптимальных составов керамик, обладающих высокой радиационной стойкостью и повышенной сопротивляемостью к разупрочнению и деградации теплофизических и прочностных свойств, как правило, используют метод облучения тяжелыми ионами, выбор типа и энергии которых обусловлен возможностью моделирования ситуаций, максимально приближенных к реальным условиям, эксплуатации данных материалов в качестве инертных матриц.

В качестве объектов исследований были выбраны керамики по типу сег-сег, полученные с применением метода механохимического синтеза путем смешивания комбинаций двух оксидов с целью получения композитных керамик, обладающих повышенной устойчивостью к распуханию и деградации. Смешивание порошков для получения композитных керамик проводилось в планетарной мельнице PULVERISSETTE 6 (Fritsch, Берлин, Германия), термическая обработка перемолотых порошков проводилась в муфельной печи ПМ-1700 (Русуниверсталь, г. Челябинск, Россия), позволяющей отжигать образцы при высоких температурах с поддержанием заданной температуры в течение длительного времени (порядка 8 часов).

В таблице 1 представлены данные структурных параметров исследуемых образцов, а также условия их получения. Выбор данных типов керамик на основе соединений оксида алюминия с другими типами оксидов (SiO_2 , NiO , Bi_2O_3 , ZrO_2 , MgO) обусловлен возможностями вариации их физико-химическими, прочностными и теплофизическими параметрами, за счет сочетания данных характеристик оксидов и получения структур шпинельного типа (кубические шпинели) или же орторомбических сложных оксидов. При этом данные композитные керамики по типу сег-сег обладают большими перспективами в области использования их в качестве материалов инертных матриц дисперсного топлива, способного эксплуатироваться в режимах высоких температур, так как данные оксидные соединения имеют высокие температуры плавления (выше 2000°C), а также хорошие прочностные свойства (более 600–700 HV).

Определение структурных параметров и фазового состава исследуемых образцов сег-сег керамик, результаты которых представлены в таблице 1, было осуществлено с применением метода рентгеноструктурного анализа. Данные измерения проводились на порошковом дифрактометре D8 Advance ECO (Bruker, Германия), съемка дифрактограмм проводи-

Таблица 1. Данные исследуемых образцов

№	Материал / соотношение компонент	Условия получения	Фазовый состав керамик
1	Al ₂ O ₃ – SiO ₂ / 1:1	Механохимическое перемалывание при скорости помола 400 оборот/мин в течение 5 часов. Термический отжиг образцов при температуре 1500 °С в течение 8 часов и последующее остывание образца в течение 24 часов вместе с печью.	Al ₂ SiO ₅ – Orthorhombic Pbnm(62) (PDF-01-074-0274) a=7,4754 Å, b=7,6753 Å, c=5,7778 Å, V=331,5 Å ³
2	Al ₂ O ₃ – NiO / 1:1		NiAl ₂ O ₄ Cubic Fd-3m(227) (PDF-00-010-0339) a=8,0512 Å, V=521,9 Å ³
3	Al ₂ O ₃ – Bi ₂ O ₃ / 1:1		Bi ₂ Al ₄ O ₉ – Orthorhombic Pbam(55) (PDF-01-083-7824) a=7,7779 Å, b=8,1587 Å, c=5,7395 Å, V=364,3 Å ³
4	Al ₂ O ₃ – ZrO ₂ / 1:1		Al ₂ O ₃ Rhombo.H.axes R-3c(167) (PDF-00-046-1212) a=4,7278 Å, c=12,9292 Å, V=250,5 Å ³ ; ZrO ₂ Monoclinic P21/a(14) (PDF-00-065-0728) a=5,2899 Å, b=5,1896 Å, c=5,1359 Å, β=99,173°, V=139,1 Å ³ ; Соотношение фаз Al ₂ O ₃ /ZrO ₂ составляет 40/60.
5	Al ₂ O ₃ – MgO / 1:1		MgAl ₂ O ₄ – Cubic Fd-3m(227) (PDF-04-073-1959) a=7,9964 Å, V=511,3 Å ³

лась в геометрии Брегг – Брентано, что позволило получить ряд дифрактограмм, характерных для поликристаллических структур, с различным фазовым составом, изменение которого варьируются за счет изменения типов используемых оксидов для получения керамик. В ряде случаев, получаемые образцы представляют собой поликристаллические однофазные структуры, обладающие достаточно высокими показателями степени структурного упорядочения, которые обусловлены методом их изготовления при механохимическом перемалывании и последующем термическом отжиге, использование которого при выбранных условиях позволяет инициировать процессы фазовых трансформаций в образцах, приводящие к формированию высокоупорядоченных структур.

Моделирование радиационных повреждений в приповерхностном слое было выполнено на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 (ИЯФ, г. Астана, Казахстан). Для моделирования структурных и прочностных изменений в приповерхностном слое толщиной 15–20 мкм были выбраны тяжелые ионы Kr¹⁵⁺ и Xe²³⁺ с энергиями 150 и 230 МэВ соответственно. Облучение было проведено при температуре 1000 К с флюенсами 10¹¹–10¹⁵ ион/см². Выбор условий облучения обусловлен возможностью моделирования механизмов радиационных повреждений, наиболее приближенных к реальным условиям эксплуатации ядерного дисперсного топлива, в условиях работы высокотемпературных ядерных реакторов [3, 15, 16]. Поддержание температуры облучения осуществлялось с использованием специального держателя-нагревателя, использование которого позволяет поддерживать постоянную температуры образцов в ходе длительных экспериментов по облучению. Контроль за тем-

пературой осуществлялся с использованием термопар, закрепленных с двух сторон образцов, позволяющих определить скорость прогрева образцов. А также определения степени стабилизации температуры в образце в ходе всего облучения. Использование термопар для контроля температуры образцов в ходе облучения также позволяет оценить возможное формирование термических эффектов, связанных с трансформацией кинетической энергии налетающих ионов в тепловую.

Оценка накопления радиационных повреждений в результате увеличения флюенса облучения, связанных с увеличением деформационных искажений и остаточных механических напряжений в поврежденном слое керамик, была выполнена с применением метода рентгеноструктурного анализа. Для оценки использовались данные изменений величин объема и параметров кристаллической решетки, изменения которых позволяют оценить степень структурных искажений, характер накопленных остаточных механических напряжений (растягивающий или сжимающий), а также концентрацию дефектной фракции в поврежденном слое.

Определение эффекта разупрочнения поврежденного слоя проводилось с применением метода индентирования (измерения твердости) образцов в исходном и облученном состоянии. Измерения проводились с использованием микротвердомера Duroline M1 (Metkon, Бурса, Турция), в качестве метода оценки твердости использовался метод Виккерса, в котором в качестве индентера использовалась алмазная пирамидка с углом 136° между противоположными гранями, в результате использования которого получается отпечаток в виде четырехгранной пирамиды.

Определение влияния радиационных повреждений в случае высокотемпературного облучения тяжелыми ионами на изменение теплофизических параметров проводилось с применением метода оценки изменений коэффициента теплопроводности исследуемых образцов в зависимости от флюенса облучения. Результаты измерений были получены путем использования метода оценки прямого теплового потока через образец с использованием системы термопар и универсального прибора для измерения теплопроводности КИТ-800 (Теплофон, Россия). Для определения величины коэффициента теплопроводности использовался диапазон измеряемых температур от 25 до 800 °С, на основе изменений которого были определены средние значения коэффициента теплопроводности. Определение деградации коэффициента теплопроводности было осуществлено путем сравнительного анализа полученных изменений величин коэффициента теплопроводности в зависимости от флюенса облучения тяжелыми ионами с последующим сравнением со значениями, полученными для исходных образцов и вычислением разницы, отражающей ухудшение теплофизических параметров за счет увеличения тепловых потерь в поврежденном слое.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены данные изменения величины ΔV , описывающей деформационное изменение объема кристаллической решетки в сравнении с данными исходных значений. Результаты представлены в виде зависимостей изменения величины ΔV от флюенса облучения для всех исследуемых образцов, погрешность измерений определялась путем изучения серии образцов каждой партии состоящих минимум из пяти образцов для набора статистических данных, а также вычисления среднеквадратичного отклонения. Результаты оценки изменений ΔV , представленные на графиках рисунка 1 свидетельствуют о накопительном эффекте структурных искажений, имеющих прямую корреляцию с изменением величины флюенса облучения, при этом различия в величинах ΔV для различных типов керамик свидетельствуют о различной устойчивости керамик к внешним воздействиям и деформационным искажениям, вызванным облучением. Следует также отметить, что наиболее данный эффект проявлен в случае высокодозного облучения при флюенсах выше 10^{13} ион/см², для которых, как известно из ряда экспериментальных работ [17, 18], характерно формирование эффекта перекрытия образующихся дефектных областей, возникающих в результате взаимодействия налетающих ионов с кристаллической структурой в результате упругих и неупругих соударений.

Как видно из представленных данных, характер изменения величины деформационного искажения объема кристаллической решетки свидетельствует о растягивающих деформационных искажениях, связанных с формированием остаточных механических

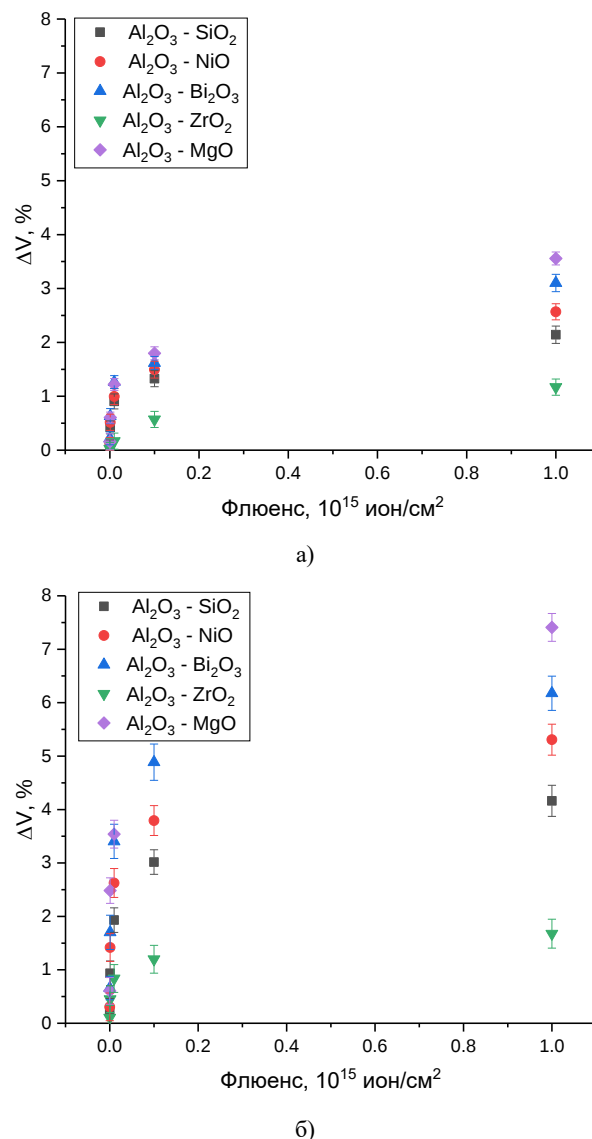


Рисунок 1. Данные деформационного изменения объема кристаллической решетки в результате накопления радиационных повреждений при облучении тяжелыми ионами Kr¹⁵⁺ (а) и Xe²³⁺ (б)

напряжений, а также структурных искажений, вызванных накоплением радиационных повреждений. При этом увеличение величины ΔV в зависимости от флюенса облучения свидетельствует о формировании в структуре приповерхностного слоя керамик газонаполненных включений, которые возникают в результате накопления имплантированных тяжелых ионов в поврежденном слое. Накопление данных включений приводит к дестабилизации кристаллической структуры, а также ее разупорядочению, которое выражается в увеличении объема кристаллической решетки, и как следствие, росту величины ΔV при увеличении флюенса облучения. При этом наблюдаемые тенденции роста величины ΔV для исследуемых образцов в зависимости от флюенса облучения свидетельствуют о накопительном эффекте, свя-

занном как с увеличением концентрации структурных искажений, вызванных взаимодействием налетающих ионов с кристаллической структурой, так и эффектами перекрытия дефектных областей (наиболее данный эффект проявляется для флюенсов облучения выше 10^{13} ион/см²).

В случае исследуемых керамик, как видно из представленных данных, изменение типа ионов с Kr^{15+} на He^{23+} приводит практически к двукратному увеличению деформационных искажений кристаллической структуры, что обусловлено эффектами увеличения ионизационных потерь налетающих ионов и, как следствие, увеличение деформационных искажений кристаллической решетки в результате упругих и неупругих соударений. Наблюдаемые различия в трендах изменений величины ΔV от флюенса облучения в сравнении для двух типов ионов позволяют сделать вывод о том, что в случае облучения тяжелыми ионами He^{23+} эффекты структурного разупрочнения более выражены, так как это обусловлено как большими величинами ионизационных потерь при взаимодействии ионов He^{23+} с кристаллической структурой, что в свою очередь приводит к увеличению размеров поврежденной областей, так и большей концентрацией вакансионных и точечных дефектов, образующихся в результате соударений ионов с кристаллической структурой.

При этом увеличение флюенса облучения приводит к увеличению деформационных искажений, что свидетельствует о накопительном эффекте структурных изменений, вызванных облучением. Стоит отметить также, что деформационные искажения, связанные с накоплением структурных искажений, а также остаточными механическими напряжениями, вызванными облучением, могут привести к ухудшению прочностных и теплофизических параметров, связанному с образованием дефектных включений и областей разупорядочения в поврежденном слое. При этом накопление данных включений может привести к резкому ухудшению свойств керамик.

Согласно полученным данным наиболее устойчивыми к процессам распухания и деградации кристаллической структуры проявили керамики на основе $Al_2O_3 - ZrO_2$, повышение устойчивости для которых обусловлено эффектами наличия межфазных границ и повышенной дислокационной плотности, обусловленной эффектами наличия мелкодисперсных зерен, а также физико-химическими свойствами данных соединений. Наихудшей устойчивостью к радиационным повреждениям, а также распуханию кристаллической структуры обладают керамики со шпинельным типом кристаллической решетки, полученные на основе соединений $Al_2O_3 - NiO$ и $Al_2O_3 - MgO$. Такое поведение керамик обусловлено низкой устойчивостью данных соединений к структурным искажениям, связанным с деформационными напряжениями, накопление которых происходит в процессе вза-

имодействия налетающих ионов с кристаллической структурой керамик.

На рисунке 2 представлены результаты оценки изменения прочностных характеристик керамик, связанных с накоплением структурных изменений в поврежденном приповерхностном слое, определенные с применением метода индентирования с использованием твердомера с постоянной нагрузкой на индентер в 100 Н.

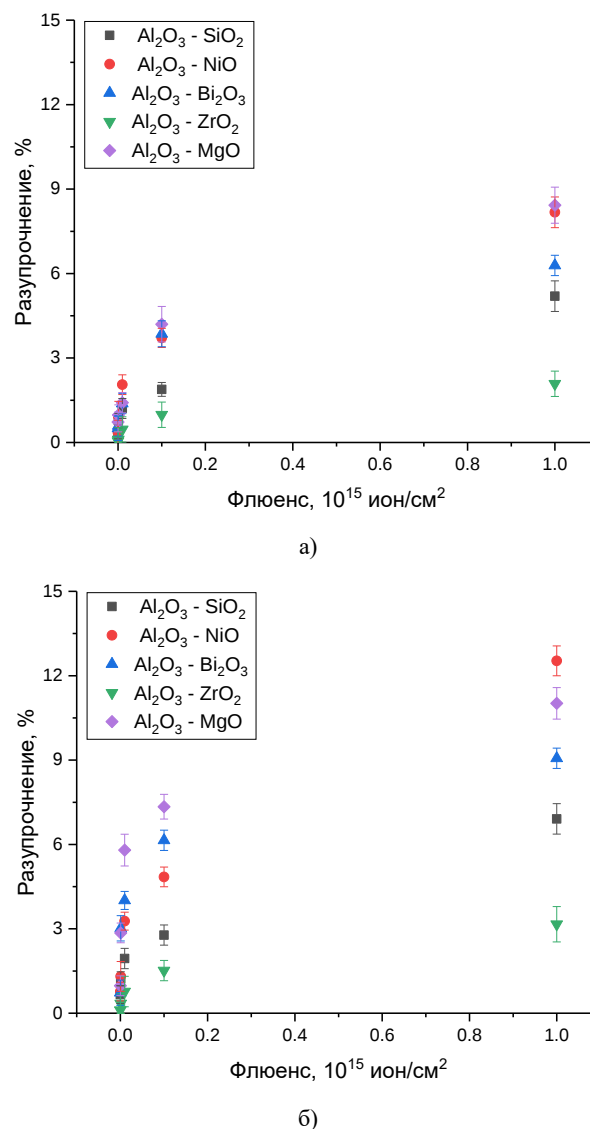


Рисунок 2. Результаты изменения величины разупрочнения керамик в результате внешних воздействий, связанных с облучением тяжелыми ионами Kr^{15+} (а), He^{23+} (б) и последующим разупрочнением

Общий вид наблюдаемых изменений прочностных характеристик свидетельствует о влиянии деформационного искажения и распухания на разупрочнение поврежденного слоя керамик. При этом наиболее выражены данные изменения при облучении ионами He^{23+} , для которых при максимальном флюенсе облучения снижение твердости приповерхност-

ного слоя составляет более 9–12% для керамик со шпинельным типом кристаллической решетки, а также менее 3% для керамик на основе $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$.

Одним из критериев отбора материалов инертных матриц дисперсного ядерного топлива является сохранение их стабильности теплофизических параметров (коэффициента теплопроводности) к накоплению радиационных повреждений. Так как керамики обладают диэлектрической природой, основным механизмом передачи тепла в них является фононный механизм, который основан на обмене тепла за счет движения фононов в материале. В этом случае, наличие структурных искажений и дефектов, возникающих при накоплении радиационных повреждений приведет к созданию дополнительных препятствий для движения фононов, тем самым увеличивая их рассеяния и снижая скорость, что в свою очередь приводит к ухудшению теплопроводности. Результаты изменения величины коэффициента теплопроводности ΔK_t , отражающих ухудшение теплопроводности, вызванное облучением и накоплением радиационных повреждений, представлены на рисунке 3. Результаты представлены в виде зависимости изменения величины теплопроводности в сравнении с исходными значениями для каждого образца, отражающие степень деградации теплопроводности при накоплении структурных повреждений, вызванных облучением.

Как видно из представленных данных изменений теплофизических параметров (снижение коэффициента теплопроводности), наиболее устойчивыми керамиками к деградации теплопроводящих свойств являются керамики на основе $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$, для которых изменение величины составляет менее 1,5% для облучения ионами Kr^{15+} и не более 3% при облучении ионами Xe^{23+} . При этом наименее устойчивыми керамиками к ухудшению теплофизических параметров обладают керамики со шпинельным типом фазового состава, полученных на основе соединений $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{NiO}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$. Такое различие в величинах деградации коэффициента теплопроводности в данном случае может быть объяснено эффектами структурных искажений, связанных с накоплением в поврежденном слое дефектных включений и газонаполненных областей, наличие которых приводит к дестабилизации кристаллической структуры, и как следствие, снижению теплопроводности, деградация которой обусловлена увеличением тепловых потерь за счет эффекта перерассеяния фононов на дефектных включениях. В свою очередь сравнения результаты изменений структурных параметров, выраженных в изменении величины ΔV (см. данные на рисунке 1) с результатами изменений величины коэффициента теплопроводности можно найти прямую корреляцию между данными параметрами, из чего следует сделать вывод о том, что деградация теплопроводности, связанная с ростом тепловых потерь, обусловлена концентрацией структурных искажений в повре-

жденном слое керамик, увеличение которых приводит к дестабилизации как прочностных, так и теплофизических параметров.

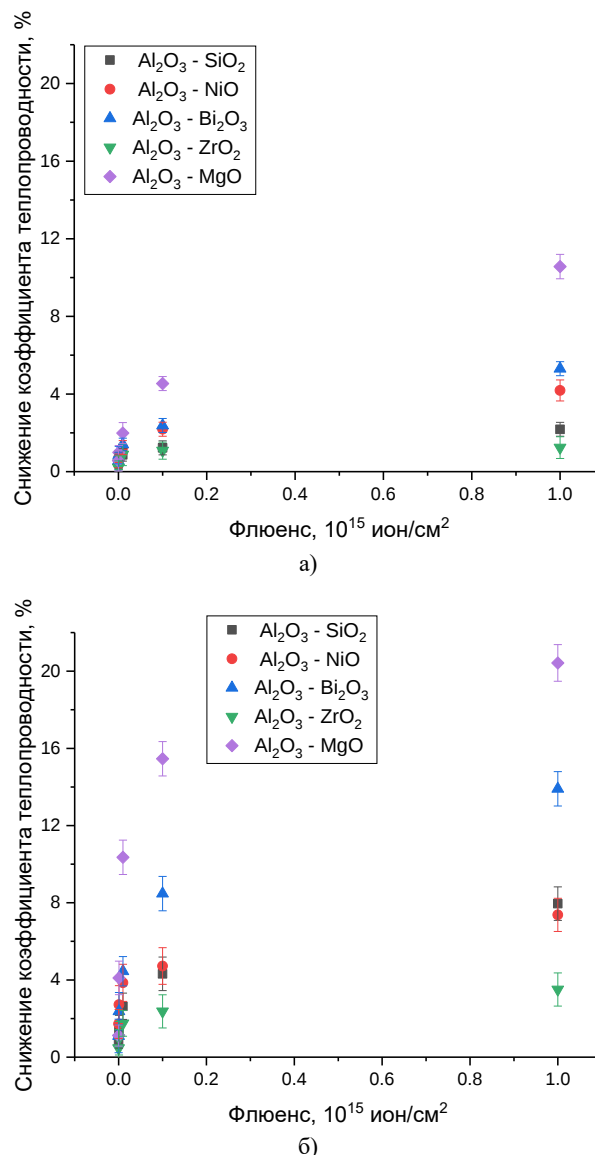


Рисунок 3. Результаты изменения величины коэффициента теплопроводности в зависимости от флюенса облучения тяжелыми ионами Kr^{15+} (а) и Xe^{23+} (б)

Наблюдаемый эффект менее выраженных изменений коэффициента теплопроводности и прочностных параметров для образцов $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ керамик в сравнении с другими типами керамик обусловлен наличием двух фаз в составе керамик, что создает дополнительные барьеры для миграции точечных и вакансионных дефектов в поврежденном слое, которая усилена температурными эффектами, связанными с облучением при высоких температурах и, как следствие, термическим расширением кристаллической структуры. В данном случае наличие межфазных границ в составе $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ керамик приводит к торможению диффузии дефектов, сдерживая их вблизи

границ зерен, тем самым снижая их агломерацию (доказательство данного эффекта заключается в результатах изменений величины ΔV в зависимости от типов ионов облучения и флюенса облучения), что в свою очередь приводит к менее выраженным эффектам деградации прочностных характеристик и изменений теплопроводности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований установлены зависимости влияния фазового состава керамик по типу cer-cer на степень радиационно-индуцированного разупрочнения и деградации прочностных и теплофизических параметров при облучении тяжелыми ионами Kr^{15+} и He^{23+} с флюенсами 10^{11} – 10^{15} ион/см².

В ходе проведенных исследований было установлено, что наиболее устойчивыми к газовому распуханию приповерхностного слоя, а также деградации прочностных и теплофизических параметров керамик обладают Al_2O_3 – ZrO_2 , устойчивость которых обусловлено наличием межфазных границ зерен, а также наличием дополнительных дислокаций, обусловленных мелкозернистой фракцией. При этом, анализируя полученные данные, наименее устойчивыми к радиационным повреждениям являются керамики со шпинельным типом кристаллической решетки, полученные на основе оксидных соединений Al_2O_3 – NiO и Al_2O_3 – MgO .

На основе проведенных исследований было установлено, что керамики на основе Al_2O_3 – ZrO_2 являются наиболее перспективными материалами для создания на их основе инертных матриц для дисперсного ядерного топлива, за счет высокой устойчивости к внешним воздействиям, а также сохранению стабильности к процессам газового распухания и последующей деформации, связанной с частичной аморфизацией и накоплением остаточных механических напряжений.

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (AP19679979).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Golosov O. A. et al. Corrosive and mechanical resistance of MgO ceramics under metallizing and mild chlorination of spent nuclear fuel in molten salts // *Ceramics International*. – 2021. – Vol. 47, No. 3. – P. 3306–3311.
2. Evarts J. S. et al. Ceramic–Metal (Cermet) Composites: A Review of Key Properties and Synthesis Methods Focused on Nuclear Waste Immobilization // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2024. – Vol. 63, No. 14. – P. 6003–6023.
3. Liu Y. et al. Irradiation response of Al_2O_3 – ZrO_2 ceramic composite under He ion irradiation // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2021. – Vol. 41, No. 4. – P. 2883–2891.
4. Alekseeva L. S. et al. Radiation resistance of fine-grained YAG: Nd ceramics irradiated with swift heavy multi-charged Ar and Xe ions // *Ceramics International*. – 2024. – Vol. 50, No. 24. – P. 55251–55262.
5. Wei H. et al. Modeling of irradiation-induced thermo-mechanical coupling and multi-scale behavior in a fully ceramic-microencapsulated fuel pellet // *Journal of Nuclear Materials*. – 2021. – Vol. 544. – P. 152673.
6. Zacharie-Aubrun I. et al. Effects of irradiation on mechanical properties of nuclear UO_2 fuels evaluated by Vickers indentation at room temperature // *Journal of Nuclear Materials*. – 2021. – Vol. 547. – P. 152821.
7. D'Agata E. et al. The behaviour under irradiation of molybdenum matrix for inert matrix fuel containing americium oxide (CerMet concept) // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – Vol. 465. – P. 820–834.
8. Lee W. E. et al. Opportunities for advanced ceramics and composites in the nuclear sector // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2013. – Vol. 96, No. 7. – P. 2005–2030.
9. Sauder C. Ceramic matrix composites: nuclear applications // *Ceramic matrix composites: materials, modeling and technology*. – 2014. – P. 609–646.
10. Bonal J. P. et al. Graphite, ceramics, and ceramic composites for high-temperature nuclear power systems // *MRS bulletin*. – 2009. – Vol. 34, No. 1. – P. 28–34.
11. Castro L. et al. Thermal analysis of ceramic nuclear fuels for the HPLWR // *Annals of Nuclear Energy*. – 2019. – Vol. 127. – P. 227–236.
12. Toulemonde M., Bouffard S., Studer F. Swift heavy ions in insulating and conducting oxides: tracks and physical properties // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 1994. – Vol. 91, No. 1–4. – P. 108–123.
13. Kamarou A. et al. Swift heavy ion irradiation of InP: Thermal spike modeling of track formation // *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*. – 2006. – Vol. 73, No. 18. – P. 184107.
14. Naslain R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview // *Composites Science and Technology*. – 2004. – Vol. 64, No. 2. – P. 155–170.
15. Ishikawa N., Taguchi T., Ogawa H. Comprehensive understanding of hillocks and ion tracks in ceramics irradiated with swift heavy ions // *Quantum Beam Science*. – 2020. – Vol. 4, No. 4. – P. 43.
16. Beauvy M. et al. Damages in ceramics for nuclear waste transmutation by irradiation with swift heavy ions // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2006. – Vol. 242, No. 1–2. – P. 557–561.
17. Rymzhanov R. A. et al. Overlap of swift heavy ion tracks in Al_2O_3 // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2018. – Vol. 435. – P. 121–125.
18. García G. et al. Amorphization kinetics under swift heavy ion irradiation: A cumulative overlapping-track approach // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2011. – Vol. 269, No. 4. – P. 492–497.

**ЯДРОЛЫҚ ОТЫННЫҢ БӨЛІНУ СЫНЫҚТАРЫМЕН САЛЫСТЫРЫЛАТЫН АУЫР ИОНДАРМЕН
СӘУЛЕЛЕНУ КЕЗІНДЕ КОМПОЗИТТІК CER-CER КЕРАМИКАЛАРЫНДАҒЫ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ
ЗАҚЫМДАНУ КИНЕТИКАСЫН ЗЕРТТЕУ**

Ш. Г. Гиниятова¹, А. Л. Козловский^{1,2*}, Д. И. Шлимас^{1,2}

¹ *Л. Н. Гумилев Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан*

² *ҚР Энергетика министрлігі «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан*

** Байланыс үшін e-mail: kozlovskiy.a@inp.kz*

Жұмыста ауыр Kr^{15+} және Xe^{23+} иондарының жоғары температуралық сәулеленуінен туындаған радиациялық зақымдануға оксидті қосылыстар негізінде cer-cer типіндегі композиттік керамиканың құрылымдық, беріктік және жылу-физикалық параметрлерінің өзгерістерін бағалау нәтижелері келтірілген. Жүргізілген зерттеулер барысында кристалдық құрылымның деформациялық бұрмалануына және оның көлемінің ұлғаюына байланысты құрылымдық параметрлердің өзгеруі мен беріктік және жылу-физикалық параметрлердің деградациясын бағалау нәтижелері арасында өзара байланыс орнатылды. Сәулелену флюенсінің жоғарылауы керамика қасиеттерінің деградациясының кумулятивті әсеріне әкелетіні анықталды, ал ауыр иондармен сәулелену жағдайында Xe^{23+} құрылымдық ретке келтіру және беріктік пен термофизикалық параметрлердің деградациясының әсері Kr^{15+} иондарымен сәулелену жағдайына қарағанда айқынырақ болады. Бұл құбылыс ұшатын иондардың иондану шығындарының шамаларындағы айырмашылықтарға, сондай-ақ ұшатын иондардың зақымдалған қабаттың кристалдық құрылымымен әрекеттесуі нәтижесінде пайда болатын зақымдалған аймақтардың мөлшеріне байланысты. Сонымен қатар, екі фазалы $Al_2O_3 - ZrO_2$ керамикасы радиациялық ынталандырылған тазарту процестеріне ең тұрақты болып табылады, онда фазааралық шекаралардың болуы жоғары дозалы сәулелену кезінде тозуға және деструкцияға төзімділіктің артуына әкеледі. Екі фазалы керамика жағдайында радиациялық зақымдануды тежеу механизмі ретінде нүктелік және бос ақаулардың диффузиясын тоқтататын, сондай-ақ зақымдалған қабаттың құрылымдық реттелу дәрежесін төмендететін тосқауыл ретінде әрекет ететін фазааралық шекаралардың болуы қарастырылады.

Түйін сөздер: радиациялық зақымдану; композициялық керамика; ақаулы қосындылар; бұзылу; газдың ісінуі; жылу өткізгіштік.

**STUDY OF THE KINETICS OF STRUCTURAL DAMAGE
IN COMPOSITE CER-CER CERAMICS UNDER IRRADIATION WITH HEAVY IONS
COMPARABLE TO NUCLEAR FUEL FISSION FRAGMENTS**

Sh. G. Ginivatova¹, A. L. Kozlovskiy^{1,2*}, D. I. Shlimas^{1,2}

¹ *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

² *RSE "Institute of Nuclear Physics" ME RK, Almaty, Kazakhstan*

** E-mail for contacts: kozlovskiy.a@inp.kz*

The paper presents the assessment results of changes in the structural, strength and thermal parameters of cer-cer composite ceramics based on oxide compounds to radiation damage caused by high-temperature irradiation with heavy Kr^{15+} and Xe^{23+} ions. During the studies conducted, relationships between changes in structural parameters caused by deformation distortion of the crystalline structure and an increase in its volume, with the assessment results of the degradation of strength and thermal parameters, were established. It was determined that an elevation in the irradiation fluence leads to a cumulative effect of degradation of the properties of ceramics, while in the case of irradiation with heavy Xe^{23+} ions, the effect of structural disordering and degradation of strength and thermal parameters is more pronounced than in the case of irradiation with Kr^{15+} ions. This phenomenon is caused by differences in the value of ionization losses of incident ions, as well as the size of damaged areas that arise as a result of the interaction of incident ions with the crystalline structure of the damaged layer. At the same time, the most stable to radiation-stimulated softening processes are two-phase $Al_2O_3 - ZrO_2$ ceramics, in which the presence of interphase boundaries leads to a growth in resistance to softening and destruction under high-dose irradiation. The presence of interphase boundaries acting as barriers that stop the diffusion of point and vacancy defects and reduce the degree of structural disorder of the damaged layer is considered as a mechanism for containing radiation damage in the case of two-phase ceramics.

Keywords: radiation damage; composite ceramics; defective inclusions; disorder; gas swelling; thermal conductivity.