

–Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 1 (2024)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и информационных
систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/KOTB8442>

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.

к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,

д.т.н., профессор

Новожилов А. Н.,

д.т.н., профессор

Никитин К. И.,

д.т.н., профессор (Россия)

Никифоров А. С.,

д.т.н., профессор

Новожилов Т. А.,

д.т.н., профессор

Алиферов А.И.,

д.т.н., профессор (Россия)

Кошкеков К.Т.,

д.т.н., профессор

Приходько Е.В.,

к.т.н., профессор

Оспанова Н. Н.,

к.п.н., доцент

Нефтисов А. В.,

доктор PhD

Омарова А.Р.,

технический редактор

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

МРНТИ 54.548.4

<https://doi.org/10.48081/ARIW5885>

**А. К. Алина¹, *К. К. Кадыржанов¹, Д.И. Шлимас¹,
А. Н. Бергузинов²**

¹Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана;

²Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

*e-mail: kadyrzhanov1945@gmail.com

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННОЙ МОДИФИКАЦИИ НА УПРОЧНЕНИЕ В $(1-x)\text{WO}_3 - x\text{ZnO}$ КЕРАМИКАХ

В данной работе представлены результаты исследований, связанных с изучением влияния облучения низкоэнергетическими ионами He^{2+} с флюенсами от 10^{14} до 10^{16} ион/см², выбор которых обусловлен возможностями внесения в приповерхностный слой структурных искажений, вызванных результатов взаимодействия ионов с кристаллической структурой, при этом исключая эффект формирования гелиевых пузырьков, возникающих в облученных материалах при высоких концентрациях имплантированного гелия. В качестве объектов для исследований были выбраны микрокомпозитные керамики, выбор которых обусловлен перспективами применения их в качестве конструкционных материалов для ядерной энергетики. Также для сравнения были выбраны образцы WO_3 керамик, перемолотые и отожженные при тех же условиях термического отжига, что и $(1-x)\text{WO}_3 - x\text{ZnO}$ керамики. В ходе определения влияния облучения на изменение прочностных характеристик было установлено, что наиболее оптимальным флюенсом облучения, приводящим к максимальному эффекту упрочнения является 5×10^{15} ион/см². При этом анализ изменения структурных характеристик в зависимости от флюенса облучения позволил установить двухфакторный механизм

изменения, связанных с доминированием деформационных искажающих напряжений растягивающего типа при флюенсах облучения $10^{14} - 5 \times 10^{15}$ ион/см², и увеличением вклада накопления дефектной фракции, оказывающей негативное влияние на разупрочнение при флюенсе облучения 10^{16} ион/см².

Ключевые слова: радиационные дефекты, упрочнение, твердость, устойчивость, материалы для ядерной энергетики, вольфраматы, ионная модификация.

Введение

Вольфраматы представляют собой класс минералов, в структуре которых встречаются анионы WO_4^{2-} , наличие которых играет весьма важную роль в определении типа вольфрамов (моновольфраматы, полиавольфраматы, гетерополивольфраматы), а также области их применения.

Интерес к использованию полупроводниковых фотокатализаторов для фотокаталитического разложения органических красителей или же генерации водорода с помощью солнечного света обусловлен возможностями снижения себестоимости утилизации данных красителей, а также развитием дешевых экологических технологий разложения достаточно устойчивых к классическим способам утилизации органических красителей. При этом сам процесс фотокатализа основан на разложении данных красителей на безвредные составляющие, что позволяет не только снизить уровень загрязнения сточных вод, но и создать достаточно дешевые технологии утилизации [1,2]. Использование вольфрамов в данном направлении позволяет не только расширить спектр их применения, но и за счет возможностей вариации их структурных, оптических и электронных свойств, а также высоких показателей устойчивости к внешним воздействиям позволяет создать высокую конкуренцию классическим фотокатализаторам (в основе которых используется диоксид титана).

Одним из потенциальных способов повышения устойчивости фотокатализаторов на основе вольфрамов, а также изменению их ширины запрещенной зоны, с целью ее уменьшения для возможности использования большего светопоглощения (в особенности в области видимого света), является метод ионной модификации приповерхностных слоев [1; 2; 3]. Интерес к данному направлению обусловлен в первую очередь возможностями внесения необходимых изменений на заданной глубине приповерхностного слоя, который играет наибольшую важность в процессах адсорбции и последующей генерации носителей заряда, а также наиболее подвержен внешнему воздействию при длительном контакте с

красителями, а также водными средами, изменение уровня кислотности (pH) которых может негативно сказаться на устойчивости фотокатализаторов и сохранению их производительности [5; 6].

Возможность применения методов ионной модификации приповерхностных слоев материалов, не смотря на достаточно высокую себестоимость и сложность в проведении, является одним из наиболее привлекательных методов модификации свойств материалов [7; 8], позволяющих повысить их устойчивость к внешним воздействиям за счет формирования высокодефектного слоя [8; 9], снижающего скорость деградации при длительной эксплуатации материалов, а также изменяя их электронные и структурные свойства.

Материалы и методы

Синтез образцов микрокомпозитных $(1-x)\text{WO}_3 - x\text{ZnO}$ керамик был осуществлен с применением метода механохимического твердофазного перемалывания с последующим термическим отжигом, применяемым с целью инициализации процессов фазовых трансформаций, направленных на получение фазы вольфрамата цинка (ZnWO_4). Для получения $(1-x)\text{WO}_3 - x\text{ZnO}$ керамик использовались оксид вольфрама (WO_3) и оксид цинка (ZnO), химическая чистота которых составляла 99.95 %. Исходные компоненты были приобретены у компании Sigma Aldrich (Sigma, США). Размеры порошков в исходном состоянии согласно паспортным данным составляли порядка 5 мкм. Механохимическое перемалывание было осуществлено в планетарной мельнице PULVERISETTE 6 (Fritsch, Берлин, Германия). Термический отжиг образцов был выполнен в муфельной печи SNOL 7.2/1100 (SNOL/Umega group, АВ, г. Утена, Литва) при температуре 1000 °С, скорость нагрева составляла 20 °С/мин.

Модификация исследуемых $(1-x)\text{WO}_3 - x\text{ZnO}$ керамик была осуществлена путем облучения низкоэнергетическими ионами гелия (He^{2+}) с суммарной энергией налетающих ионов равной 40 кэВ (20 кэВ/заряд). Облучение проводилось на ускорителе тяжелых ионов ДЦ – 60 (Астанинский филиал Института ядерной физики МЭ РК, Астана, Казахстан). Флюенсы облучения низкоэнергетических ионов для модификации были выбраны от 10^{14} до 10^{16} ион/см². Облучение проводилось при комнатной температуре образцов (25 °С), поддержание температуры в ходе облучения на заданном уровне было выполнено путем закрепления образцов на специальных держателях с водяным охлаждением, что позволило исключить эффекты термической аннигиляции точечных дефектов в образцах, возникающих в результате взаимодействия низкоэнергетических ионов с кристаллической структурой приповерхностного слоя. Выбор типа ионов He^{2+} для направленной модификации приповерхностного слоя обусловлен возможностями внесения структурных изменений на глубине порядка 300 – 400 нм

приповерхностного слоя, который является наиболее активно участвующим в процессе фотогенерации свободных носителей заряда для фотокаталитического разложения.

Определение микротвердости образцов было выполнено на микротвердомере Duroline M1 (Metkon, Бурса, Турция), в котором в качестве индентера использовалась пирамида Виккерса, а нагрузка на индентер при измерениях составляла 10 Н, что позволило определить значение твердости приповерхностного слоя на глубине порядка 0.4 мкм (согласно данным оценки формы отпечатка индентера). Определение эффекта упрочнения (разупрочнения) в зависимости от фазового состава $(1-x)\text{WO}_3 - x\text{ZnO}$ керамик было выполнено путем сравнительного анализа данных твердости до и после внешних воздействий.

Результаты и обсуждение

Одним из наиболее достоверных способов определения влияния облучения на изменение свойств материалов является метод рентгеновской дифракции, использование которого путем сравнения полученных данных структурных параметров образцов до и после облучения позволяет определить не только наличие структурных искажений, но и характер данных изменений, связанных с деформационными искажениями структуры (тип деформационных искажений определяется по изменению структурных параметров в сравнении с исходными значениями). На рисунке 1 представлены результаты рентгеновской дифракции исследуемых образцов $(1-x)\text{WO}_3 - x\text{ZnO}$ керамик в исходном состоянии (не подвергнутых облучению), которые характеризуют фазовый состав исследуемых образцов. Общий вид представленных данных свидетельствует о влиянии вариации условий синтеза на процессы фазообразования в $(1-x)\text{WO}_3 - x\text{ZnO}$ керамиках, связанных с формированием двухфазных керамик типа $0.55\text{WO}_3/0.45\text{ZnWO}_4$ и $0.25\text{WO}_3/0.75\text{ZnWO}_4$ при концентрациях содержания ZnO равных 0.1 М и 0.2 М; однофазных керамик типа ZnWO_4 , полученных при соотношении компонент $\text{WO}_3 : \text{ZnO}$ равному 0.7 М : 0.3 М; двухфазных керамик типа $0.3\text{ZnO}/0.7\text{ZnWO}_4$ и $0.75\text{ZnO}/0.25\text{ZnWO}_4$ полученных при использовании концентраций ZnO, равных 0.5 М и 0.8 М соответственно. При этом общий вид полученных рентгеновских дифрактограмм свидетельствует о достаточно высокой степени структурного упорядочения (степени кристалличности) исследуемых образцов, которая составила порядка 87 – 89 %.

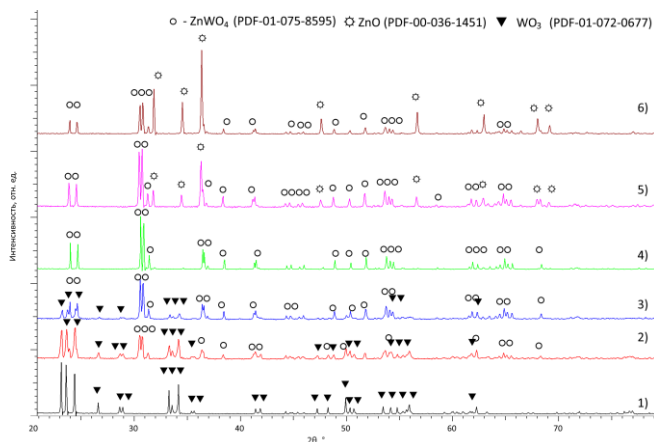


Рисунок 1 – Рентгеновские дифрактограммы исследуемых $(1-x)\text{WO}_3 - x\text{ZnO}$ керамик: 1) WO_3 ; 2) $0.55\text{WO}_3/0.45\text{ZnWO}_4$; 3) $0.25\text{WO}_3/0.75\text{ZnWO}_4$; 4) ZnWO_4 ; 5) $0.3\text{ZnO}/0.7\text{ZnWO}_4$; 6) $0.75\text{ZnO}/0.25\text{ZnWO}_4$

В случае облучения низкоэнергетическими ионами He^{2+} с флюенсами $10^{14} - 10^{16}$ ион/см², основные структурные изменения связаны (согласно расчетам величин Δd) с формированием деформационных искажений, вызванных накоплением дефектов, возникающих в результате взаимодействия налетающих ионов с кристаллической структурой керамик. Следует также отметить, что максимальное изменение величины смещений (порядка 13 Δd) достигается при флюенсах облучения 10^{16} ион/см², что в свою очередь характерно для концентраций имплантированного гелия не более 0.01 ат. %, что исключает вероятность структурных изменений, связанных с эффектами газового распухания, обусловленного формированием газонаполненных включений в поврежденном слое. При этом, большие величины электронных ионизационных потерь обуславливают, согласно литературным данным, возникновение атермических эффектов, связанных с процессами ионизации и изменениями электронной плотности в поврежденном слое, что в свою очередь может привести к изменению ширины запрещенной зоны. Анализ рентгеновских дифрактограмм облученных образцов керамик в зависимости от дозы облучения не выявил наличие каких – либо новых дифракционных рефлексов, связанных с формированием новых фаз или процессов окисления, вызванных облучением, а основные изменения, наблюдаемые на рентгеновских дифрактограммах связаны со смещением положений максимумов относительно исходных значений, а также снижению интенсивности дифракционных рефлексов, которое в отсутствии изменений размеров кристаллитов (обнаружено не было)

свидетельствует о формировании дефектной фракции в поврежденном слое. На основе установленных смещений дифракционных рефлексов в зависимости от флюенса облучения были определены параметры кристаллической решетки, для каждой установленной фазы, на основе изменений которых были определены величины объемного деформационного искажения кристаллической структуры, связанного с накоплением структурных повреждений в модифицированном слое. Результаты расчетов представлены на рисунке 2 в виде зависимостей изменения объемного деформационного искажения от величины атомных смещений.

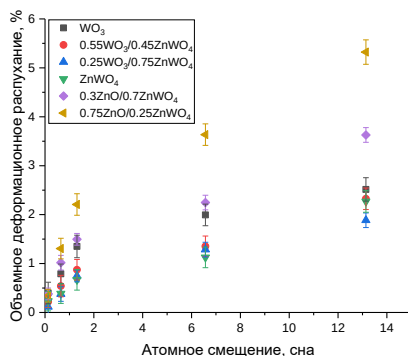


Рисунок 2 – Результаты сравнительного анализа объемного деформационного искажения кристаллической структуры в зависимости от величины атомных смещений

Общая тенденция изменений величины объемного деформационного искажения кристаллической структуры $(1-x)\text{WO}_3 - x\text{ZnO}$ керамик в зависимости от величины накопленных атомных смещений свидетельствует о растягивающих остаточных деформационных напряжениях в кристаллической структуре, изменение концентрации которых происходит в результате увеличения флюенса облучения. При этом различия в накопительном характере изменений величины деформационных искажений в зависимости от фазового состава $(1-x)\text{WO}_3 - x\text{ZnO}$ керамик свидетельствует о существенном влиянии наличия двух фаз, а также типа примесной фазы на деформационное искажение структуры.

В случае двухфазных $0.55\text{WO}_3/0.45\text{ZnWO}_4$ и $0.25\text{WO}_3/0.75\text{ZnWO}_4$ керамик изменение величины объемного деформационного искажения

значительно меньше, чем для однофазных WO_3 и ZnWO_4 керамик, что может быть объяснено не только эффектами более выраженного структурного упорядочения керамик в исходном состоянии, но и эффектами наличия межфазных границ, которые препятствуют миграционным процессам дефектов, образующихся в результате облучения. В этом случае наличие межфазных границ приводит к образованию большого количества стоков дефектов и дислокаций, накопление которых вблизи данных стоков может привести к возникновению, так называемого эффекта дислокационного упрочнения, хорошо известного для керамик и металлов в случае облучения тяжелыми ионами [10,11]. В случае керамик $0.3\text{ZnO}/0.7\text{ZnWO}_4$ и $0.75\text{ZnO}/0.25\text{ZnWO}_4$ увеличение вклада фазы ZnO приводит к более выраженному объемному деформационному распуханию, которое более чем в 1.5–2 раза выше при флюенсе облучения 10^{16} ион/см² (при величии смещений порядка 13 сна). Такое увеличение деформационного искажения для данных типов керамик, не смотря на наличие межфазных границ, свидетельствует о более низкой устойчивости к высокодозному облучению, которое связано с низкой радиационной стойкостью оксида цинка в сравнении с WO_3 и ZnWO_4 .

На рисунке 3 представлены результаты оценки формирования дефектной фракции (аморфных включений) в поврежденном приповерхностном слое, которое было рассчитано на основе данных изменений степени кристалличности (степени структурного упорядочения) керамик в зависимости от величины атомных смещений. Разупорядочение, связанное с изменением степени кристалличности образцов в результате образования аморфных включений (областей разупорядоченности), как видно из представленных данных наиболее проявляется при величинах атомных смещений, характерных для флюенсов облучения $5 \times 10^{15} - 10^{16}$ ион/см². Такой характер структурных изменений свидетельствует о том, что при малых флюенсах облучения $10^{14} - 10^{15}$ ион/см² основной эффект на изменение свойств керамик, оказывает деформационное искажение, которое в случае двухфазных $0.55\text{WO}_3/0.45\text{ZnWO}_4$ и $0.25\text{WO}_3/0.75\text{ZnWO}_4$ керамик сдерживается наличием межфазных границ и высокими показателями радиационной стойкости фазы ZnWO_4 . Однако в случае, когда величина атомных смещений превышает более 10 сна (при флюенсе 10^{16} ион/см²) образующиеся структурные разупорядочения, в результате атермических эффектов, а также сильного деформационного искажения (более 1.5 – 2 %) являются доминирующими эффектами в изменении свойств керамик.

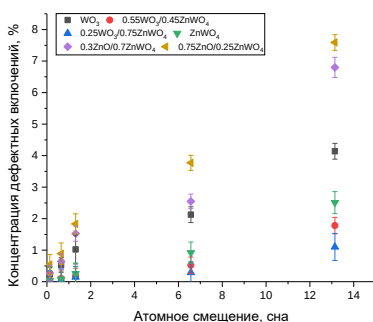
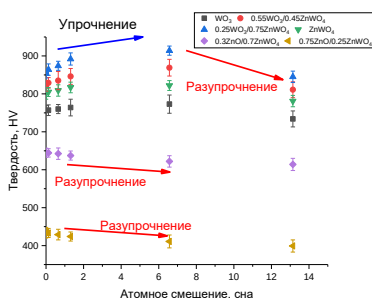
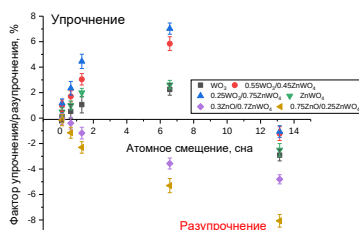


Рисунок 3 – Результаты оценки дефектной фракции в $(1-x)\text{WO}_3 - x\text{ZnO}$ керамиках подверженных облучению ионами He^{2+}

На рисунке 4 представлены результаты изменений величины твердости образцов $(1-x)\text{WO}_3 - x\text{ZnO}$ керамик в зависимости от величины атомных смещений, вызванных накоплением флюенса облучения, а также результаты оценки изменения фактора упрочнения/разупрочнения, связанного с изменением твердости в сравнении с исходными значениями, характерными для необлученных образцов.



а)



б)

Рисунок 4 – Результаты изменения прочностных характеристик $(1-x)\text{WO}_3 - x\text{ZnO}$ керамик подверженных ионному облучению:

а) результаты изменения твердости в зависимости от величины атомных смещений; б) результаты изменения фактора упрочнения/разупрочнения в зависимости от величины атомных смещений

Наиболее проявленный наблюдаемый эффект упрочнения (увеличение твердости для образцов $0.55\text{WO}_3/0.45\text{ZnWO}_4$ и $0.25\text{WO}_3/0.75\text{ZnWO}_4$ керамик может быть объяснен за счет следующих факторов, характерных для двухфазных керамик. Наличие межфазных границ, приводящее к созданию дополнительных барьеров в виде стоков дефектов в случае взаимодействия ионизирующего излучения с кристаллической структурой может привести к замедлению процессов деформационного распухания (что отчетливо видно на данных, представленных на рисунке 2), а также созданию дополнительных дислокаций вблизи границ зерен и межфазных границ, увеличение плотности которых приводит, в совокупности высокими начальными значениями твердости двухфазных керамик типа $0.55\text{WO}_3/0.45\text{ZnWO}_4$ и $0.25\text{WO}_3/0.75\text{ZnWO}_4$ приводит к повышению твердости приповерхностного слоя, результаты которого имеют хорошее согласие с литературными данными о влиянии дислокационного упрочнения материалов, вызванного облучением [12,13]. При этом высокие показатели объемного деформационного распухания для образцов $0.75\text{ZnO}/0.25\text{ZnWO}_4$ приводят к разупрочнению керамик при высокодозном облучении, а более выраженное снижение твердости для облученных образцов обусловлено низкими показателями радиационной стойкости ZnO , являющейся доминирующей фазой в образцах.

Выводы

Получены результаты, описывающие влияние облучения низкоэнергетическими ионами He^{2+} на изменение структурных (связанных с деформационным искажением кристаллической структуры), прочностных (возникновением эффекта упрочнения и разупрочнения приповерхностного слоя в зависимости от накопленных повреждений) и фотокаталитических характеристик $(1-x)\text{WO}_3 - x\text{ZnO}$ керамик.

Оценка величины структурного разупорядочения и объемного деформационного распухания позволила установить двухэтапный характер изменения структурных свойств, связанный с накопительным эффектом. В случае когда величина объемного деформационного искажения составляет менее 1.5–2 %, доминирующим механизмом изменения структурных свойств является накопление деформационных напряжений растягивающего типа в приповерхностном поврежденном слое, накопление которых приводит к возникновению эффекта радиационного упрочнения керамик. При величинах объемного деформационного искажения более 2.0 % доминирующую роль в изменении структурных свойств керамик играет накопление аморфных включений (сильно разупорядоченных областей) наличие которых оказывает негативное влияние на устойчивость керамик к разупрочнению. Данный материал

может быть использован в качестве конструкционных материалов для ядерной энергетики.

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ПЦФ РК BR18574135).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Nakata, K., Fujishima, A.** TiO₂ photocatalysis : Design and applications // Journal of photochemistry and photobiology C : Photochemistry Reviews. – 2012. – Vol. 13. – №. 3. – P. 169–189.

2 **Mukherjee, A., Goswami, N., Dhak, D.** Photocatalytic remediation of industrial dye waste streams using biochar and metal-biochar hybrids : a critical review // Chemistry Africa. – 2023. – Vol. 6. – №. 2. – P. 609–628.

3 **Munawar, T.** et al. Enhanced charge carriers separation/transportation via S-scheme ZnCeS–ZnWO heterostructure nanocomposite for photodegradation of synthetic dyes under sunlight // Materials Chemistry and Physics. – 2024. – P. 128938.

4 **Belli, P.** et al. Search for double beta decay of zinc and tungsten with low background ZnWO₄ crystal scintillators // Nuclear Physics A. – 2009. – Vol. 826. – №. 3–4. – P. 256–273.

5 **López, X. A.** et al. Synthesis, characterization and photocatalytic evaluation of MWO₄ (M= Ni, Co, Cu and Mn) tungstates // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – Vol. 41. – № 48. – P. 23312–23317.

6 **Medvedev, R. V.** et al. Low-energy ion polishing of Si in W/Si soft X-ray multilayer structures // Journal of Applied Physics. – 2019. – Vol. 126. – №. 4. – P. 1–10.

7 **Oyarzabal, Í. M.** et al. The effect of flux on ion irradiation-enhanced precipitation in AISI-316L: An in-situ TEM study // Journal of nuclear materials. – 2020. – Vol. 541. – P. 152414.

8 **Jain, I. P., Agarwal, G.** Ion beam induced surface and interface engineering // Surface Science Reports. – 2011. – Vol. 66 №. 3–4. – P. 77–172.

9 **Bieliński, D. M., Ostaszewska, U., Jagielski, J.** Application of ion bombardment to modify tribological properties of elastomers // Polimery. – 2014. – Vol. 59. – № 5. – P. 416–422.

10 **Bulatov, V. V.** et al. Dislocation multi-junctions and strain hardening // Nature. – 2006. – Vol. 440. № 7088. – P. 1174–1178.

11 **Arsenlis, A.** et al. Enabling strain hardening simulations with dislocation dynamics // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. – 2007. – Vol. 15. № 6. – P. 553.

12 **Xiao, X.** Fundamental mechanisms for irradiation-hardening and embrittlement: a review // Metals. – 2019. – Vol. 9. № 10. – P. 1132.

13 **Marian, J., Fitzgerald, S., Po, G.** Discrete dislocation dynamics simulations of irradiation hardening in nuclear materials // Handbook of Materials Modeling: Applications: Current and Emerging Materials. – 2020. – P. 2243–2271.

Поступило в редакцию 30.01.24.

Поступило с исправлениями 06.02.24.

Принято в печать 01.03.24.

*А. К. Алина¹, *К. К. Кадыржанов¹, Д. И. Шлимас¹,
А. Н. Бергузинов²*

¹Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

²Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
30.01.24 ж. баспаға түсті.

06.02.24ж.түзетулерімен түсті.

01.03.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

(1-Х)WO₃ –ХZnO КЕРАМИКАДАҒЫ РАДИАЦИЯЛЫҚ МОДИФИКАЦИЯНЫҢ КҮШЕЙТУГЕ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл жұмыста 10^{14} -тен 10^{16} ион/см²-ге дейінгі флюменті төмен энергиялы He^{2+} иондарымен сәулеленудің әсерін зерттеуге байланысты зерттеулердің нәтижелері берілген, олардың таңдауы туындаған беткі қабатқа құрылымдық бұрмаланулар енгізу мүмкіндігіне байланысты. Имплантацияланған гелийдің жоғары концентрациясында сәулеленген материалдарда пайда болатын гелий көпіршіктерінің пайда болу әсерін жоққа шығара отырып, иондардың кристалдық құрылыммен әрекеттесу нәтижелері бойынша. Зерттеу нысандары ретінде микрокомпозиттік керамика таңдалды, олардың таңдауы оларды атом энергетикасы үшін құрылымдық материалдар ретінде пайдалану перспективаларына байланысты. Сондай-ақ салыстыру үшін WO_3 керамикасының үлгілері таңдалды, ұнтақталды және $(1-x)WO_3 - xZnO$ керамикалары сияқты термиялық күйдіру жағдайында күйдірілді. Сәулеленудің беріктік сипаттамаларының өзгеруіне

әсерін анықтау кезінде максималды қатаю әсеріне әкелетін ең оңтайлы сәулелену флюенциясы 5×10^{15} ион/см² екендігі анықталды. Бұл ретте сәулелену флюстілігіне байланысты құрылымдық сипаттамалардың өзгерістерін талдау 10^{14} - 5×10^{15} ион/см² сәулелену флюстері кезінде созылу типті деформация-бұрмалаушы кернеулердің басым болуымен байланысты өзгерудің екі факторлы механизмін орнатуға мүмкіндік берді және сәулелену флюенциясы 10^{16} ион/см² кезінде жұмсартуға кері әсерін тигізетін ақаулы фракцияның жинақталуының үлесінің артуы.

Кілтті сөздер: радиациялық ақаулар, қатаю, қаттылық, тұрақтылық, атом энергетикасына арналған материалдар, вольфрамдар, иондық модификация.

A. K. Alina¹, *K. K. Kadyrzhanov¹, D. I. Shlimas¹, A. N. Berguzinov²

¹L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana;

²Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 30.01.24.

Received in revised form 06.02.24.

Accepted for publication 01.03.24.

STUDY OF THE EFFECT OF RADIATION MODIFICATION ON STRENGTHENING IN (1-X)WO₃–XZNO CERAMICS

This paper presents the results of studies related to the study of the effect of irradiation with low-energy He²⁺ ions with fluences from 10^{14} to 10^{16} ions/cm², the choice of which is due to the possibility of introducing structural distortions into the surface layer caused by the results of the interaction of ions with the crystal structure, while excluding the effect of the formation of helium bubbles arising in irradiated materials at high concentrations of implanted helium. Microcomposite ceramics were selected as objects for research, the choice of which is determined by the prospects of their use as structural materials for nuclear energy. Also for comparison, samples of WO₃ ceramics were selected, ground and annealed under the same thermal annealing conditions as (1-x)WO₃ –

xZnO ceramics. In determining the effect of irradiation on changes in strength characteristics, it was found that the most optimal irradiation fluence leading to the maximum hardening effect is 5×10^{15} ions/cm². At the same time, the analysis of changes in structural characteristics depending on the irradiation fluence made it possible to establish a two-factor mechanism of change associated with the dominance of tensile-type deformation-distorting stresses at irradiation fluences of $10^{14} - 5 \times 10^{15}$ ions/cm², and an increase in the contribution of the accumulation of the defective fraction, which has a negative effect on softening at irradiation fluence 10^{16} ions/cm².

Keywords: radiation defects, hardening, hardness, stability, materials for nuclear energy, tungstates, ionic modification.

Теруге 06.03.2024 ж. жіберілді. Басуға 29.03.2024 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс №4204

Сдано в набор 06.03.2024 г. Подписано в печать 29.03.2024 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова

Заказ № 4204

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz