

НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР  
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Лобач Костянтин В'ячеславович

УДК 666.3.549.517.1:666.762.51

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**КЕРАМІЧНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ КАРБІДУ КРЕМНІЮ ДЛЯ  
АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

05.17.11 – технологія тугоплавких неметалічних матеріалів

16 – хімічна біоінженерія

Подається на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



*Дана дисертація містить результати досліджень з теми «Синтез керамічних матеріалів на основі карбиду кремнію».*  
*Вчений секретар спеціалізованої ради Д64.050.03*  
*проф. Шабонова Г.А.*  
*24.02.2021*

К.В. Лобач

Науковий керівник  
Саєнко Сергій Юрійович,  
док. техн. наук, ст. наук. спів.

Харків – 2021

## АНОТАЦІЇ

*Лобач К.В.* «Керамічні матеріали на основі карбіду кремнію для атомної енергетики».

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата (доктора філософії) технічних наук зі спеціальності 05.17.11 – технологія тугоплавких неметалічних матеріалів. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2021 р.

Дисертаційна робота спрямована на вдосконалення наявних і впровадження нових інноваційних технологій і матеріалів які б дозволили реакторам атомних станцій стати більш безпечними навіть у разі виникнення аварійних ситуацій.

Робота присвячена розробці технології отримання безпористого SiC-матеріалу з підвищеним коефіцієнтом тріщиностійкості та поліпшеною корозійною стійкістю в реакторних умовах, який може бути використаний як матеріал SiC-матриці в SiC/SiC композитах для виготовлення оболонок тепловиділяючих елементів (ТВЕЛ), а також у якості механічно міцного і стійкого до  $\gamma$ -опроміненню захисного матеріалу для контейнерів високоактивних відходів і відпрацьованого ядерного палива.

Актуальність теми та вагомість результатів дисертації підтверджується тим, що вона виконувалась в межах науково-дослідної тематики та проєктів Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України.

Достовірність та обґрунтованість одержаних результатів дисертаційної роботи досягається використанням сучасного обладнання; стандартних методик визначення властивостей; аналізом отриманих експериментальних даних та їх систематизацією.

В роботі методом високошвидкісного гарячого пресування отримано дослідні зразки для вивчення формування безпористої структури в чистій (без добавок) SiC-кераміці, в діапазоні температур ( $T = 1850 - 2100$ ) °C, часу витримки ( $t = 10 - 45$ ) хвилин, тиску  $P = 40$  МПа та швидкості нагрівання  $V = 200$  °C/хв. Встановлено, що SiC-кераміка, яка отримана при температурі спікання  $T = 2050$  °C, тиску  $P = 40$  МПа, швидкості  $V = 200$  °C/хв та часі витримки під тиском  $t = 30$  хвилин

сформована з безпористої, монолітної та однорідної структури з ознаками крихкого руйнування, має високу щільність (до 99,4 % від теоретичної), твердість –  $27,3 \pm 0,5$  ГПа та коефіцієнт тріщиностійкості  $4,3 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ .

Розглянута можливість поліпшення коефіцієнту тріщиностійкості шляхом введення невеликої кількості добавок та вивчення їхнього впливу на фізико-механічні властивості SiC-кераміки. Досліджено вплив добавок Cr (у діапазоні від 0,3 до 1,2 мас. %) на механічні властивості SiC-кераміки. Встановлена оптимальна кількість добавки хрому (0,5 мас. %), за якої SiC має найкраще співвідношення значень тріщиностійкості й мікротвердості ( $\text{HV}/\text{K}_{1c} = 4,5$ ). Показано, що додавання Cr призведе до підвищення тріщиностійкості на (25 – 30) % ( $\text{K}_{1c} = 6,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ), в порівнянні з SiC без добавок, при збереженні високого рівня твердості зі значенням 28,0 ГПа. Досліджено формування та розподіл Cr у структурі SiC. Вивчено механізми формування дрібнодисперсних карбідних сполук ( $\text{Cr}_x\text{C}_y$ ), які сприяють виникненню вторинних фаз та підвищенню тріщиностійкості матеріалів.

Отримані результати можуть бути враховані та значно вплинути на вибір матеріалів та технологію виробництва SiC-матриці в SiC/SiC композитах для виготовлення оболонок ТВЕЛів водо-водяних ядерних реакторів, оскільки існує проблема виготовлення тонкостінних трубок (оболонок) з крихкої кераміки SiC, яка має низькі значення коефіцієнта тріщиностійкості.

Досліджено можливість підвищення корозійної стійкості SiC-кераміки шляхом введення добавок Cr в умовах, що імітують внутрішнє середовище реактору ВВЕР-1000. Вивчені механізми впливу Cr на особливості корозійного процесу. Зафіксовано приріст маси SiC до  $3,27 \text{ мг/см}^2$  на початку корозійних випробуваннях, що покращує корозійну стійкість SiC у гідротермальних умовах. Встановлено, що введення 0,5 мас. % Cr призводить до формування структури поверхні SiC з поліпшеною корозійною стійкістю і є перспективним технологічним рішенням для досягнення необхідного рівня корозійної стійкості SiC у реакторних умовах.

Проведені радіаційні випробування керамічних зразків SiC(0,5%Cr), за допомогою гальмівного випромінювання  $\gamma$ -квантів до поглиненої дози  $2 \cdot 10^6$  Гр, що відповідає дозовому навантаженню на матеріал контейнера при зберіганні

радіоактивних відходів протягом 300 років, відповідно до вимог МАГАТЕ. Показано, що введення 0,5 мас. % Cr не призводить до зниження структурної цілісності та механічної міцності кераміки SiC після  $\gamma$ -опромінення до поглиненої дози  $2 \cdot 10^6$  Гр. Експериментально встановлено, що композит SiC(0,5Cr) може бути використаний як матеріал контейнеру для безпечного захоронення ВАВ та ВЯП.

Основні матеріали дисертації повною мірою викладені в 14 наукових працях. З них 7 статей та 7 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях. Усі зазначені статті опубліковані у фахових виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science.

1. Лобач К.В. Применение метода электроконсолидации для получения керамики на основе  $ZrO_2 - 3\% Y_2O_3$  / [Лобач К.В., Саенко С.Ю., Светличный Е.А., Сурков А.Е.] // Питання атомної науки і техніки. – Харків: ННЦ ХФТІ, 2011. – 76(6). – С. 99 – 102.

2. Лобач К.В. Установление оптимальных параметров процесса электроконсолидации для получения керамик  $HfB_2$  и  $ZrB_2$  / [Лобач К.В., Саенко С.Ю., Светличный Е.А., Сурков А.Е.] // Збірник наукових праць ВАТ «УКРНДІВогнетривів ім. А.С. Бережного». – Харків: Каравела, 2012. – No 112. – С. 141 – 146.

3. Lobach K. Improvement of Microstructure and Mechanical Properties of High Dense SiC Ceramics Manufactured By High-Speed Hot Pressing / [Voyevodin V., Sayenko S., Lobach K., Tarasov R., Zykova A., Svitlychnyi Ye., Surkov A., Abelentsev V., Ghaemi H., Szkodo M., Gajowiec G., Kmiec M., Antoszkiewicz M.] // Problems of Atomic Sciens and Technology. – Kharkiv: NSC KIPT, 2017. – 108(2). – S. 97 – 102.

4. Lobach K. Optimisation of Properties of Silicon Carbide Ceramics With the Use of Different Additives / [Lobach K., Kupriyanova Y., Kolodiy I., Sayenko S., Shkuropatenko V., Voyevodin V., Zykova A., Bykov A., Chunyayev O., Tovazhnyansky L.] // Functional Materials. – Kharkiv: Scientific and Technological Corporation “Institute for Single Crystals”, 2018. – 25(3). – S. 496 – 504.

5. Lobach K. Physical-Mechanical Properties of  $\gamma$ -irradiated SiC Ceramics for Radioactive Wastes Immobilization / [Lobach K., Sayenko S., Shkuropatenko V.,

Voyevodin V., Zykova A., Bereznyak E., Hodyreva Y., Bykov A., Bykanov S., Tovazhnyansky L.] // East European Journal of Physics. – Kharkiv: V.N. Karazin Kharkiv national university, 2018. – 5(4). – S. 40 – 47.

6. Lobach K.V. Corrosion resistance of ceramics based on SiC under hydrothermal conditions / [Lobach K.V., Sayenko S.Yu., Shkuropatenko V.A., Voyevodin V.M., Zykova A.V., Zuyok V.A., Bykov A.A., Tovazhnyansky L.L., Chunyayev O.M.] // Materials Science. – New York: Consultants Bureau Plenum Publishing Corporation, 2020. – 55(5). – S. 672 – 682.

7. Lobach K. Research and development of novel materials for accident tolerant fuel cladding of nuclear reactors / [Lobach K., Kuprin A., Sayenko S., Voyevodin V., Kolodiy I.] // East European Journal of Physics. – Kharkiv: V.N. Karazin Kharkiv national university, 2020. – 4. – S. 75 – 83.

8. Лобач К.В. Особоплотные керамические материалы на основе карбидов и боридов, полученные методом электроконсолидации / [Саенко С.Ю., Светличный Е.А., Лобач К.В., Грибов С.И.] // Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности: Междунар. науч.-техн. конф., 29 – 30 апреля 2014 г.: тезисы докл. – Харьков, 2014. – С. 56 – 57.

9. Lobach K. Determination of Optimal Parameters of High Density SiC Ceramics Manufactured by High-Speed Hot Pressing / [Lobach K., Voyevodin V., Sayenko S., Tarasov R., Svitlychnyi Ye., Surkov A., Abelentsev V., Zykova A., Ghaemi H., Szkodo M., Gajowiec G., Kmiec M., Antoszkiewicz M.] // Проблеми сучасної ядерної енергетики: XII Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених та фахівців, 16 – 18 листопада 2016 р.: тези доп. – Харків, 2016. – С. 7 – 8.

10. Лобач К.В. Исследование влияния активаторов на процесс спекания и свойства керамики на основе карбида кремния / [Лобач К.В., Саенко С.Ю., Светличный Е.А., Зыкова А.В., Чуняев О.Н., Быков А.А., Асриян А.А.] // Проблеми сучасної ядерної енергетики: XIII Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених та фахівців, 18 – 20 жовтня 2017 р.: тези доп. – Харків, 2017. – С. 18 – 19.

11. Lobach K. Improvement of Silicon Carbide Ceramics Mechanical Properties by Different Additives / [Lobach K., Sayenko S., Shkuropatenko V., Voyevodin V.,

Zykova A., Bykov A., Chunyayev O., Tovazhnyanskyu L.] // Advanced Materials and Technologies: From Idea to Market: 10-th International Conference, 24 – 26 October 2018: Book of abstracts. – Ningbo (China), 2018. – S. 68.

12. Lobach K. Studying the influence of  $\gamma$ -irradiation on physico-mechanical properties of hot-pressed SiC (Cr, Si) composites / [Lobach K., Sayenko S., Shkuropatenko V., Voyevodin V., Zykova A., Bereznyak E., Hodyreva Y., Bykov A., Chunyayev O., Tovazhnyanskyu L.] // Проблеми сучасної ядерної енергетики: XIV Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених та фахівців, 14 – 16 листопада 2018 р.: тези доп. – Харків, 2018. – С. 4 – 5.

13. Lobach K.V. The influence of Cr additives on corrosion resistance of SiC-based ceramics in hydrothermal conditions / [Lobach K.V., Zuyok V.A., Chunyayev O.M.] // Проблеми сучасної ядерної енергетики: XV Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених та фахівців, 13 – 15 листопада 2019 р.: тези доп. – Харків, 2019. – С. 15.

14. Lobach K. Corrosion resistance of SiC(Cr) ceramics composite in hydrothermal conditions / [Lobach K., Kolodiy I, Sayenko S., Voyevodin V., Zuyok V.] // Корозія – 2020: XV Міжнародна конференція, 15 – 16 жовтня 2020 р.: тези доп. – Львів, 2020. – С. 57.

*Ключові слова:* толерантне ядерне паливо, аварія з утратою теплоносія, тепловиділяючий елемент (ТВЕЛ), карбід кремнію (SiC), металевий хром (Cr), SiC-матриця, SiC/SiC композит, реактор ВВЕР-1000, гідротермальна корозія, радіоактивні відходи.

## ABSTRACT

Lobach K.V. "Ceramic materials based on silicon carbide for nuclear energy.

PhD thesis on the manuscript rights.

This thesis is devoted to the scientific degree of the candidate of technical sciences (PhD) on a specialty 05.17.11 – technology of refractory nonmetallic materials. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2021.

This dissertation is dedicated to the improving of the existing and implementation of the new innovative technologies and materials that could allow nuclear power plant reactors to be safer even at the of emergency events.

This thesis is devoted to the development of technology for obtaining non-porous SiC-based material with high fracture toughness and improved corrosion resistance in reactor conditions, which can be used as a material SiC-matrix in SiC/SiC composites for the manufacturing of fuel elements (TVEL), as well as mechanically strength and  $\gamma$ -irradiated protective material for containers of high-activated and spent nuclear fuel.

The relevance and the importance of the dissertation results is confirmed by the fact that it was performed within the R&D projects of the National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology" of the NAS of Ukraine.

The reliability and validity of the dissertation results of is achieved through the usage of modern equipment: methods for estimating properties; analysis of the obtained experimental data and their systematization.

Experimental samples were obtained by high-speed hot pressing and studied for the nonporous structure formation in pure SiC-ceramics (without additives) in the temperature range of  $(T = 1850 - 2100)^\circ \text{C}$  and holding time of  $(t = 10 - 45)$  minutes, pressure of  $P = 40 \text{ MPa}$  and heating rate of  $V = 200^\circ \text{C/min}$ . It was established that SiC-ceramics, obtained at sintering temperature of  $T = 2050^\circ \text{C}$ , pressure of  $P = 40 \text{ MPa}$  and speed of  $V = 200^\circ \text{C/min}$  and holding time under pressure  $t = 30$  minutes is formed from a non-porous, monolithic and homogeneous structure and with features of brittle fracture, has a high density, hardness –  $27,3 \pm 0,5 \text{ GPa}$  (up to 99,4% of theoretical) and a coefficient of crack resistance of  $4,3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

The possibility of the improvement of the crack resistance coefficient by alloying with a small number of additives and studying their effect on the physical and mechanical properties of SiC-ceramics is considered. The effect of Cr additives (in the range of 0,3 to 1,2 wt. %) on the mechanical properties of SiC-ceramics was studied. The optimal amount of chromium additive (0,5 wt. %), At which SiC has the best ratio of crack resistance and microhardness ( $HV/K_{1c} = 4,5$ ). It is shown that the addition of Cr leads to an increase in crack resistance by (25 – 30) % ( $K_{1c} = 6,2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ), in comparison with SiC without additives, while maintaining a high level of hardness with a value of 28,0 GPa. The formation and distribution of Cr in the SiC structure have been studied. The mechanisms of formation of fine carbide compounds ( $\text{Cr}_x\text{C}_y$ ), which contribute to the emergence of secondary phases and increase the crack resistance of materials, have been studied.

The obtained results can be taken into account and significantly affect the choice of materials and technology of SiC-matrix in SiC/SiC composites production for the manufacturing of fuel elements for WWR reactors, as there is a problem of manufacturing thin-walled tubes (shells) of brittle SiC ceramics which have low crack resistance coefficient.

The possibility of increasing of the corrosion resistance of SiC-ceramics by addition of Cr additives under conditions simulated the internal environment of the WWER-1000 reactor was investigated. The mechanisms of Cr influence on the features of the corrosion process are studied. The mass gain of SiC to  $3,27 \text{ mg/cm}^2$  at the beginning of corrosion tests was recorded, which improves the corrosion resistance of SiC in hydrothermal conditions. It is established that addition of 0,5 wt. % Cr leads to the formation of the SiC surface structure with improved corrosion resistance and this is a promising technological solution to achieve the required SiC corrosion resistance in reactor conditions.

Radiation tests of ceramic SiC(0,5%Cr) samples were performed using braking  $\gamma$ -irradiation to an exposed dose of  $2 \cdot 10^6 \text{ Gy}$ , which corresponds to the dose of the container material during storage of radioactive waste for 300 years, in accordance with IAEA requirements. It is shown that addition of 0,5 wt. % Cr does not reduce the structural integrity and mechanical strength of SiC ceramics after  $\gamma$ -irradiation to exposure dose of



$2 \cdot 10^6$  Gy. It was experimentally established that the SiC composite (0,5Cr) can be used as a container material for the safe disposal of high radioactive and nuclear wastes.

The main dissertation materials are fully presented in 14 scientific papers. Among of them there is 7 articles and 7 abstracts at international scientific conferences. All these articles are published in professional journals included in the international scientific databases Scopus and Web of Science.

1. Лобач К.В. Применение метода электроконсолидации для получения керамики на основе  $ZrO_2 - 3\% Y_2O_3$  / [Лобач К.В., Саенко С.Ю., Светличный Е.А., Сурков А.Е.] // Питання атомної науки і техніки. – Харків: ННЦ ХФТІ, 2011. – 76(6). – С. 99 – 102.

2. Лобач К.В. Установление оптимальных параметров процесса электроконсолидации для получения керамик  $HfB_2$  и  $ZrB_2$  / [Лобач К.В., Саенко С.Ю., Светличный Е.А., Сурков А.Е.] // Збірник наукових праць ВАТ «УКРНДІВогнетривів ім. А.С. Бережного». – Харків: Каравела, 2012. – No 112. – С. 141 – 146.

3. Lobach K. Improvement of Microstructure and Mechanical Properties of High Dense SiC Ceramics Manufactured By High-Speed Hot Pressing / [Voyevodin V., Sayenko S., Lobach K., Tarasov R., Zykova A., Svitlychnyi Ye., Surkov A., Abelentsev V., Ghaemi H., Szkodo M., Gajowiec G., Kmiec M., Antoszkiewicz M.] // Problems of Atomic Sciens and Technology. – Kharkiv: NSC KIPT, 2017. – 108(2). – S. 97 – 102.

4. Lobach K. Optimisation of Properties of Silicon Carbide Ceramics With the Use of Different Additives / [Lobach K., Kupriyanova Y., Kolodiy I., Sayenko S., Shkuropatenko V., Voyevodin V., Zykova A., Bykov A., Chunyayev O., Tovazhnyansky L.] // Functional Materials. – Kharkiv: Scientific and Technological Corporation “Institute for Single Crystals”, 2018. – 25(3). – S. 496 – 504.

5. Lobach K. Physical-Mechanical Properties of  $\gamma$ -irradiated SiC Ceramics for Radioactive Wastes Immobilization / [Lobach K., Sayenko S., Shkuropatenko V., Voyevodin V., Zykova A., Bereznyak E., Hodyreva Y., Bykov A., Bykanov S., Tovazhnyansky L.] // East European Journal of Physics. – Kharkiv: V.N. Karazin Kharkiv national university, 2018. – 5(4). – S. 40 – 47.

6. Lobach K.V. Corrosion resistance of ceramics based on SiC under hydrothermal conditions / [Lobach K.V., Sayenko S.Yu., Shkuropatenko V.A., Voyevodin V.M., Zykova A.V., Zuyok V.A., Bykov A.A., Tovazhnyanskyu L.L., Chunyayev O.M.] // Materials Science. – New York: Consultants Bureau Plenum Publishing Corporation, 2020. – 55(5). – S. 672 – 682.

7. Lobach K. Research and development of novel materials for accident tolerant fuel cladding of nuclear reactors / [Lobach K., Kuprin A., Sayenko S., Voyevodin V., Kolodiy I.] // East European Journal of Physics. – Kharkiv: V.N. Karazin Kharkiv national university, 2020. – 4. – S. 75 – 83.

8. Лобач К.В. Особоплотные керамические материалы на основе карбидов и боридов, полученные методом электроконсолидации / [Саенко С.Ю., Светличный Е.А., Лобач К.В., Грибов С.И.] // Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности: Междунар. науч.-техн. конф., 29 – 30 апреля 2014 г.: тезисы докл. – Харьков, 2014. – С. 56 – 57.

9. Lobach K. Determination of Optimal Parameters of High Density SiC Ceramics Manufactured by High-Speed Hot Pressing / [Lobach K., Voyevodin V., Sayenko S., Tarasov R., Svitlychnyi Ye., Surkov A., Abelentsev V., Zykova A., Ghaemi H., Szkodo M., Gajowiec G., Kmiec M., Antoszkiewicz M.] // Проблеми сучасної ядерної енергетики: XII Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених та фахівців, 16 – 18 листопада 2016 р.: тези доп. – Харків, 2016. – С. 7 – 8.

10. Лобач К.В. Исследование влияния активаторов на процесс спекания и свойства керамики на основе карбида кремния / [Лобач К.В., Саенко С.Ю., Светличный Е.А., Зыкова А.В., Чуняев О.Н., Быков А.А., Асриян А.А.] // Проблеми сучасної ядерної енергетики: XIII Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених та фахівців, 18 – 20 жовтня 2017 р.: тези доп. – Харків, 2017. – С. 18 – 19.

11. Lobach K. Improvement of Silicon Carbide Ceramics Mechanical Properties by Different Additives / [Lobach K., Sayenko S., Shkuropatenko V., Voyevodin V., Zykova A., Bykov A., Chunyayev O., Tovazhnyanskyu L.] // Advanced Materials and Technologies: From Idea to Market: 10-th International Conference, 24 – 26 October 2018: Book of abstracts. – Ningbo (China), 2018. – S. 68.

12. Lobach K. Studying the influence of  $\gamma$ -irradiation on physico-mechanical properties of hot-pressed SiC (Cr, Si) composites / [Lobach K., Sayenko S., Shkuropatenko V., Voyevodin V., Zykova A., Bereznyak E., Hodyreva Y., Bykov A., Chunyaev O., Tovazhnyanskyu L.] // Проблеми сучасної ядерної енергетики: XIV Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених та фахівців, 14 – 16 листопада 2018 р.: тези доп. – Харків, 2018. – С. 4 – 5.

13. Lobach K.V. The influence of Cr additives on corrosion resistance of SiC-based ceramics in hydrothermal conditions / [Lobach K.V., Zuyok V.A., Chunyaev O.M.] // Проблеми сучасної ядерної енергетики: XV Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених та фахівців, 13 – 15 листопада 2019 р.: тези доп. – Харків, 2019. – С. 15.

14. Lobach K. Corrosion resistance of SiC(Cr) ceramics composite in hydrothermal conditions / [Lobach K., Kolodiy I, Sayenko S., Voyevodin V., Zuyok V.] // Корозія – 2020: XV Міжнародна конференція, 15 – 16 жовтня 2020 р.: тези доп. – Львів, 2020. – С. 57.

Key words: tolerant fuel, loss of coolant accident, silicon carbide (SiC), metallic chromium (Cr), SiC-matrix, SiC/SiC composite, WWER-1000 reactor, hydrothermal corrosion, radioactive waste.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
ГЛАВА 1. ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ SiC І ПЕРСПЕКТИВА ВИКОРИСТАННЯ ЇХ В ЯДЕРНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ	
1.1. Основні характеристики, методи отримання та область використання керамічних матеріалів на основі карбїду кремнію.....	12
1.2. Карбїд кремнію – перспективний матеріал для ядерної енергетики .....	15
1.2.1. Огляд методів і технологій отримання SiC.....	15
1.2.2. Методи високошвидкісного нагрівання для отримання кераміки на основі SiC.....	17
1.2.3. Фізико-механічні властивості $\alpha$ та $\beta$ SiC.....	19
1.2.4. Сучасний стан світового ринку SiC.....	19
1.2.5. Застосування SiC для виготовлення паливних елементів ВТГР.....	19
1.2.6. Конструкції на основі SiC для потреб термоядерних установок.....	21
1.3. Концепція створення стійкого до аварій палива (ATF – Accident Tolerant Fuel).....	25
1.3.1. Основні фізичні та технологічні положення концепції.....	25
1.3.2. Композит на основі тверда матриця/волокно складу SiC/SiC – матеріал оболонки ТВЕЛ.....	30
1.4. Розробка технологій отримання високощільного спеченого SiC для виготовлення елементів контейнерів зберігання радіоактивних відходів.....	32
1.5. Поведінка керамічних матеріалів на основі SiC в умовах радіаційного впливу та водного середовища, шляхи підвищення фізико-механічних властивостей та корозійної стійкості.....	38
1.6. Висновки й постановка задач досліджень.....	43
ГЛАВА 2. МАТЕРІАЛИ Й МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
2.1. Матеріали досліджень .....	45
2.2. Експериментальне обладнання.....	53
2.3. Методики досліджень.....	57
2.3.1. Змішування й сушка вихідних порошкових компонентів .....	57

2.3.2. Компактування порошкових сумішей і їх пресування .....	58
2.3.3. Визначення щільності та закритої пористості.....	58
2.3.4. Визначення структури матеріалів методом рентгенофазового аналізу.....	58
2.3.5. Диференційно-термічний аналіз .....	58
2.3.6. ІЧ-спектрометрія .....	59
2.3.7. Визначення мікротвердості і коефіцієнта інтенсивності напружень ( $K_{Ic}$ ).....	59
2.3.8. Металографічні дослідження .....	59
2.4. Методи випробування.....	60
2.4.1. Корозійні випробування.....	60
2.4.2. Радіаційні випробування.....	60
<b>ГЛАВА 3. ФОРМУВАННЯ БЕЗПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ SiC-КЕРАМІКИ МЕТОДОМ ВГП І ДОСЛІДЖЕННЯ ЇЇ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ</b>	
3.1. Оптимізація технологічних параметрів методу ВГП для отримання SiC-кераміки.....	61
3.2. Дослідження впливу температури й часу витримки під тиском на формування безпористої структури в SiC-кераміці.....	63
3.3. Формування структури в SiC-кераміці.....	67
3.4. Рентгеноструктурний аналіз SiC-кераміки.....	70
3.5. Визначення максимального порогового навантаження.....	71
3.6. Вплив температури й часу витримки під тиском на мікротвердість і тріщиностійкість SiC-кераміки.....	77
3.7. Висновки.....	80
<b>ГЛАВА 4. ПІДВИЩЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ SiC- КЕРАМІКИ ШЛЯХОМ ВВЕДЕННЯ ДОБАВОК</b>	
4.1. Вплив добавок на фізико-механічні властивості SiC-кераміки.....	82
4.2. Формування структури в SiC-кераміці з добавками.....	88
4.3. Визначення оптимального вмісту Cr в SiC-кераміці для підвищення тріщиностійкості.....	92

4.4. Дослідження розподілу добавок Cr і формування сполук у структурі SiC кераміки.....	93
4.5. Висновки.....	98
ГЛАВА 5. АНАЛІЗ ПОВЕДІНКИ ЗРАЗКІВ SiC (Cr) ПРИ КОРОЗІЙНИХ ВИПРОБУВАННЯХ	
5.1. Умови проведення випробувань на корозійну стійкість .....	99
5.2. Вивчення корозійного процесу в зразках SiC (Cr).....	99
5.3. Висновки .....	109
ГЛАВА 6. ВПЛИВ $\gamma$ -ОПРОМІНЕННЯ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗРАЗКІВ SiC (Cr)	
6.1. Умови проведення випробувань на радіаційну стійкість .....	111
6.2. Оцінка фактору введення Cr на радіаційну стійкість SiC .....	112
6.3. Висновки.....	117
ВИСНОВКИ.....	118
СПИСОК ДЖЕРЕЛ.....	120
ДОДАТОК 1.....	136
ДОДАТОК 2.....	139