

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Кислиця Максим Валерійович**

УДК 666.77

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**НАНОКОМПОЗИЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ НА ОСНОВІ  $Al_2O_3$   
ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ, ОТРИМАНИЙ МЕТОДОМ  
ЕЛЕКТРОКОНСОЛІДАЦІЇ**

05.17.11 – технологія тугоплавких неметалічних матеріалів

161 – Хімічні технології та інженерія

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

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

  
\_\_\_\_\_ М.В. Кислиця

**Науковий керівник  
Геворкян Едвін Спартакович,  
доктор технічних наук, професор**

Харків – 2019

## АНОТАЦІЯ

**Кислиця М.В. Наноконструкційний матеріал на основі  $Al_2O_3$  інструментального призначення, отриманий методом електроконсолідації.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.11 – технологія тугоплавких неметалічних матеріалів (161 – Хімічні технології та інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2019.

Дисертація присвячена створенню нового високотвердого теплостійкого керамічного композиційного матеріалу з використанням технології електроконсолідації на основі мікродисперсного  $Al_2O_3$  і нанодисперсного SiC для виготовлення ріжучих пластин, призначених для обробки загартованих сталей і чавунів. В роботі теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість підвищення механічних властивостей керамічного матеріалу на основі  $Al_2O_3$  шляхом введення добавки наноструктурних матеріалів і теплофізичних властивостей отриманого композиту. Було показано позитивний вплив зниження дисперсності добавки на процеси ущільнення, склад і температуру консолідації, що підставою зниження вартості виробництва. Встановлено можливі способи підвищення теплофізичних властивостей композитів, що безпосередньо визначає їх працездатність в умовах високих температур та механічних навантажень, характерних для токарної обробки твердих металів і сплавів. Визначено технологічні параметри для системи  $Al_2O_3$ -SiC, що дозволяють отримати матеріал з високими механічними ( $H_V = 25.0$  ГПа,  $K_{IC} = 6.5$  МПа·м<sup>1/2</sup>) і теплофізичними ( $\lambda = 23.0$  Вт/м·К,  $\alpha = 9.4$  м<sup>2</sup>/с) характеристиками.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми та доцільність дисертаційної роботи, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, сформульовано основні результати роботи, визначено їх наукову новизну та практичну значущість, зазначено внесок здобувача,

наведено відомості про апробацію результатів роботи та публікації за темою дисертації.

У першому розділі **«Отримання інструментальних композиційних матеріалів з використанням нанопорошків»** міститься загальна інформація про технічні підходи при роботі з нанорозмірними порошковими матеріалами, методи змішування та де агломерації, спікання та формування їх структури. Проведено огляд ряду інноваційних методів консолідації порошкових керамічних матеріалів та порівняння їх з традиційними методами. У розділі викладено огляд основних типів керамічних матеріалів та областей їх застосування, особливо. Особлива увага приділяється керамічним матеріалам інструментального призначення. Проведено аналіз досліджень, які розкривають особливості механічної обробки металу ріжучим інструментом та способи підвищення зносостійкості керамічних матеріалів при високошвидкісному різанні. Показано доцільність дослідження теплофізичних властивостей матеріалу, який використовується для чистової та напівчистової обробки високотвердих сплавів.

У другому розділі **«Методи дослідження і вихідні матеріали»** представлена інформація щодо методів отримання керамічних композитів, які використовувались у ході досліджень, та вихідних матеріалів, з яких вони виготовлялись. У розділі описано методи дослідження основних фізичних та механічних властивостей отриманих зразків, їх структури та фазового складу. Описано будову обладнання, яке використовувалось для виготовлення дослідних зразків кераміки.

У третьому розділі **«Електроконсолідація композитів із нанопорошків  $Al_2O_3$  і  $SiC$ »** викладено результати досліджень механізмів ущільнення в процесі електроконсолідації з пропусканням високоамперного струму. Встановлено, що при спіканні порошкових сумішей  $Al_2O_3-SiC$  за температури  $T_{спік} \sim 1600 \div 1700$  °C основними механізмами масопереносу є перегрупування частинок (на початковому етапі) та міжзеренна дифузія (на заключному етапі), при зменшенні температури спікання та часу ізотермічної

витримки місце міжзеренної дифузії займають процеси поверхневої дифузії, які не можуть забезпечити утворення міцних зв'язків. Показано вплив дисперсності вихідних складових порошкової суміші на процес ущільнення при компактуванні та спіканні. Встановлено, що застосування добавки у вигляді нанопорошку підвищує максимальну швидкість усадки на 20%/хв.

В розділі приведено результати досліджень впливу умов консолідації та параметрів вихідної суміші  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$  на фазовий склад, відносну щільність та структуру отриманих композитів. При підвищенні температури спікання до  $T_{\text{спік}} > 1700\text{ }^\circ\text{C}$  в системі  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$  спостерігається утворення склофазы та побічних газів, що є небажаним.

Дослідження структури отриманих зразків кераміки показали, що відсутність добавок призводить до швидкого росту зерен, у той час, як додавання невеликої кількості мікропорошку карбиду кремнію зберігає мікроструктуру композиту при  $T_{\text{спік}} = 1400\text{ }^\circ\text{C}$ . Встановлено, що застосування добавки у вигляді нанопорошку є більш доцільним, так як це забезпечує більшу дисперсність зміцнюючої добавки і зберігає мікроструктуру композиту при підвищенні температури спікання до  $1700\text{ }^\circ\text{C}$ .

У розділі також викладено данні, отриманні при дослідженні механічних властивостей композитів на основі оксиду алюмінію та карбиду кремнію, та описано вплив на них параметрів консолідації та фазового складу вихідних сумішей. Встановлено оптимальні технологічні параметри виготовлення для композиту на основі  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з додаванням нано-SiC.

**Четвертий розділ «Теплофізичні та термомеханічні властивості нанокompозитів  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$ »** містить результати експериментальних досліджень теплопровідності отриманих композиційних матеріалів та апроксимацію отриманих температурних залежностей згідно з дебайвською моделлю фононного спектру, що показало вплив параметрів консолідації на структурні характеристики. Адекватність застосованої моделі підтверджується значеннями коефіцієнта детермінації та кореляцією результатів з результатами досліджень механічних властивостей. Завдяки

використанню добавки SiC, вдалося підвищити теплопровідність композиту до значень порядку 25 Вт/м/К, що на рівні з коефіцієнтом теплопровідності інструментальних сталей.

У розділі викладено результати математичного моделювання процесів розподілу температурного поля у об'ємі установки електроконсолідації та зоні пресування. Встановлено, що різниця температур в зоні пресування під час інтенсивного нагрівання не перевищує 12 %, та 2% – на ізотермічному етапі спікання. Достовірність використаної моделі підтверджена порівнянням її результатів з експериментальними вимірюваннями.

Також у розділі виконано порівняння отриманого композиційного матеріалу з існуючими аналогами – швидкоріжучою сталлю, оксидною та оксидно-карбідною керамікою. Для порівняльної оцінки запропоновано введення термомеханічного параметру, який відображає одночасно як механічні, так і теплофізичні властивості інструментального матеріалу. Отриманий у ході роботи наноконпозиційний матеріал за термомеханічними властивостями в 4 рази перевершує швидкоріжучі сталі, та в 2 рази – сучасні оксидно-карбідні кераміки зарубіжних виробників.

У п'ятому розділі «Експлуатаційні властивості та застосування розробленого композиційного матеріалу» містяться результати випробувань ріжучих властивостей отриманого композиційного матеріалу при точінні валків із термооброблених сталей та чавунів у порівнянні з оксидною, оксидно-карбідною і оксидно-нітридною керамікою. Встановлено, що ріжучі пластини з розробленої кераміки можуть ефективно застосовуватися при напівчистовому та чистовому точінні загартованих сталей і дозволяють підвищити продуктивність обробки в порівнянні з пластинами ВОК-60, ВОК-71 в 2 рази.

Також з використанням математичної обробки експериментальних даних по механічним властивостям отримані емпіричні математичні залежності основних характеристик міцності композиту  $Al_2O_3-SiC$  – мікротвердості і коефіцієнта тріщиностійкості.

У **додатках** наведено акти експлуатаційних випробувань розробленого наноконструкційного матеріалу та список публікацій за темою роботи.

*Ключові слова:* інструментальна кераміка, електроконсолідація, механічні властивості, теплофізичні властивості, усадка, спікання.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Кислиця М.В. Метод електроконсолідації (електроспекання) як високоєфективний метод для компактирования нанопорошків з метою отримання композиційних матеріалів інструментального і конструкційного призначення / Э.С. Геворкян, В.А. Чішкала, М.В. Кислиця // Сборник научных трудов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. – 2016 г. – №160. – С.75-80.

2. Кислиця М.В. Влияние нанодобавок на структуру и свойства карбида кремния при электроконсолідації / [Э.С. Геворкян, В.А. Чішкала, О.М. Мельник, М.В. Кислиця] // Вестник НТУ «ХПИ». – 2016 г. – №22(1194). – С. 39-45.

3. Kislitsa M. The problem of effective pressure on consolidation of zirconia nanopowders and its solution with spark-plasma sintering / [E. Gevorkyan, Yu. Gutsalenko, V. Chishkala, O. Melnik, M. Kislitsa] // Fiability & Durability. – №1. – 2016. – P. 10-21.

4. Kislitsa M. V. Synthesis by method of electro consolidation of SiC and WC, ZrO<sub>2</sub> nanocomposite materials with the high mechanical properties / [E.S. Gevorkyan, G.D. Semchenko, M.V. Kislitsa, V.A. Chishkala, R.V. Vovk] // Вісник ХНУ, серія «Фізика». – 2016. – Вип. 24.– С. 30-35.

5. Kislitsa M. Ceramic cutting tools out of nanostructured refractory compounds / [Edwin Gevorkyan, Sergiy Lavrynenko, Mirosław Rucki, Zbigniew Siemiatkowski, Maksim Kislitsa] // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. – 2017. – No 68. – P. 142–144.

6. Кислиця М.В. Вплив електроспікання на структуру і властивості кераміки на основі карбіду кремнію / Е.С. Геворкян, М.В. Кислиця // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2017. – вип. 169. – С. 136-137.

7. Kislitsa M.V. Investigation of structure and properties of composite material  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$  obtained by electroconsolidation process / R.V. Vovk, N.M. Prokopiv, V.A. Chishkala, M.V. Kislitsa // *Functional Material*. – 2018. – № 25 (1). – P. 43-47.

8. Кислиця М.В. Электро- и теплопроводность МАХ-фазы  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  при низких температурах / Г.Я. Хаджай, Р.В. Вовк, Т.А. Прихна, Э.С. Геворкян, М.В. Кислиця, А.Л. Соловьев // *Физика низких температур*. – 2018. – т. 44. – № 5. – С. 589–591.

9. Kislitsa M. V. Charge and heat transfer of the  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  MAX phase / [R. V. Vovk, G. Ya. Khadzhai, T. A. Prikhna, E. S. Gevorkyan, M. V. Kislitsa, A. L. Soloviev, I. L. Goulatis, A. Chroneos] // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. Published online: 21 May 2018. – P. 1-4.

10. Kislitsa M.V. Effect of nano addition on the structure and properties of silicon carbide during electroconsolidation / R.V. Vovk, V.A. Chishkala, N.M. Prokopiv, M.V. Kislitsa, I.M. Chursina // *Вісник ХНУ, серія «Фізика»*. – 2017. – Вип. 27. – С. 49-52.

11. Кислиця М.В. Теплопроводность нанокompозитов  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$ , изготовленных методом электроконсолидации / М. В. Кислиця, Г. Я. Хаджай, Э. С. Геворкян, Р. В. Вовк // *Фізика низьких температур*. – 2019. – т. 45. № 4. – С. 484–487.

12. Kislitsa M.V. Phase formation in the  $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  system during hot pressing by the method of electroconsolidation / R. V. Vovk, M.V. Kislitsa, M. Rucki // *Functional Materials*. – 2019. – № 26 (1). – P. – 78-82.

13. Пат. на корисну модель №121894 Україна, МПК С04В 35/565 (2006.1) Композиційний матеріал з добавкою карбіду кремнію з високими термомеханічними властивостями / Р.В. Вовк, Е.С. Геворкян, Л.А. Тимофеева, С.В. Панченко, В.О. Чишкала, С.В. Литовченко, М.В. Кислиця; заявник та

власник патенту УкрДУЗТ – № и 201704231; заявл. 28.04.2017; опубл. 26.12.2017, Бюл. №24.

14. Пат. на винахід №117981 Україна, МПК С04В 35/565 (2006.1), С04В 35/58 (2006.01). Композиційний матеріал з добавкою карбіду кремнію з високими термомеханічними властивостями / Р.В. Вовк, Е.С. Геворкян, Л.А. Тимофеева, С.В. Панченко, В.О. Чишкала, С.В. Литовченко, М.В. Кислиця; заявник та власник патенту УкрДУЗТ – № а 201704197; заявл. 27.04.2017; опубл. 02.08.2018, Бюл. №20.

15. Пат. на винахід №118974 Україна, МПК С04В 35/10 (2006.01), С04В 35/103 (2006.01), С04В 35/106 (2006.01), С04В 35/565 (2006.01) Композиційний керамічний матеріал  $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  та спосіб його отримання / Е. С. Геворкян, В. О. Чишкала, О. М. Мельник, М. В. Кислиця, С. В. Литовченко, В. П. Нерубацький; заявник та власник патенту УкрДУЗТ – № а 201607301; заявл. 05.07.2016; Бюл. №7.

16. Кислиця М.В. Создание муллитокорундовых матриц, модифицированных наночастицами  $\beta$  – SiC / Г.Д. Семченко, Э.С. Геворкян, И.Ю. Шутеева, М.В. Кислиця, М.А. Панасенко // Междунар. конф. огнеупорщиков и металлургов, 7-8 апреля 2016: тез. докл. – НИТУ «МИСиС». – 2016. – С. 68-69.

17. Кислиця М.В. Композиты с тонкой структурой на основе корунда и карбида кремния / Э.С. Геворкян, Д.О. Московских, М.В. Кислиця, К.С. Торосян // Новые огнеупоры: тез. докл. Междунар. конф. огнеупорщиков и металлургов – 2016 г. – №3. – С. 10-11.

18. Кислиця М.В. Некоторые особенности получения бимодальных композиционных материалов оксид алюминия – карбид кремния при электроспекания / Э.С. Геворкян, Н.М. Прокопив, В.А. Чишкала, М.В. Кислиця // 16-й Международная научно-технической конференция, 30 мая – 03 июня 2016 г.: тез. докл. — Киев: АТМ України. – 2016. – С. 18-19.

19. Kislitsa M. Preparation of nanostructured materials by electrical sintering / [Edwin Gevorkyan, Sergiy Lavrynenko, Mirosław Rucki, Zbigniew

Siemiątkowski, Maksim Kislitsa] // 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design, 11-15 June 2017. – INEGI/FEUP, 2017. – P. 663-666.

20. Кислица М.В. Перспективы применения композиционного материала  $Al_2O_3-SiC$  в качестве инструментального / Э.С. Геворкян, М.В. Кислица, С.Н. Лавриненко, М. Руцкий, В.А. Чишкала // XXV міжнародна науково-практична конференція «MicroCAD-2017», 17-19 травня 2017 р.: тез. доп. – Харків: НТУ «ХП», 2017. – С. 175.

21. Кислица М.В. Высокоэффективное компактирование нанопорошков электроконсолидацией / М.В. Кислица, Э.С. Геворкян, В.А. Чишкала // 3-я Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием «Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы», 18-20 мая 2017 г.: тез. докл.: БНЦ СО РАН. – 2017. – С. 103-105.

22. Кислица М.В. Формирование структуры и свойств композиционного материала  $Al_2O_3-SiC$  в процессе электроконсолидации / [М.В. Кислица, Э.С. Геворкян, Н.М. Прокопив, В.А. Чишкала] // 17-я Международная научно-техническая конференция, 29 мая – 02 июня 2017 г.: тез. докл.: – Киев: АТМ України. – 2017. – С. 55-56.

23. Кислица М.В. Новый керамический материал на основе микро  $Al_2O_3$  и  $SiC$  (нано) инструментального назначения / Э.С. Геворкян, М.В. Кислица, Н.М. Прокопив // 18-й Международный научно-технический семинар, 10–16 февраля 2018 г.: тез. докл. – Киев: АТМ України. – 2018. – С. 37-39.

## ABSTRACT

***Kislitsa M.V.* Nanocomposite material based on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  instrumental assignment, obtained by electroconsolidation.** – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.17.11 – technology of refractory nonmetallic materials (161 – Chemical technologies and engineering). – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2019.

The dissertation is devoted to creation of a new high-temperature heat-resistant ceramic composite material using the technology of electroconsolidation on the basis of microdisperse  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and nanodisperse SiC for the manufacture of cutting plates designed for treatment of tempered steels and cast iron. In the work the theoretically justified and experimentally confirmed the possibility of increasing the mechanical properties of ceramic material on the basis of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  by introducing the addition of nanostructured materials and the thermophysical properties of the resulting composite. The positive influence of reducing the dispersion of the additive on the processes of sealing, the composition and temperature of consolidation, which leading to the reduction of the cost of production, was shown. Possible ways of increasing the thermophysical properties of composites are determined, which directly determines their efficiency in conditions of high temperatures and mechanical loads which is typical for turning of solid metals and alloys. The technological parameters for the  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SiC system are determined, which allow to obtain material with high mechanical properties ( $H_V = 25.0$  GPa,  $K_{IC} = 6.5$  MPa·m<sup>1/2</sup>) and thermophysical ( $\lambda = 23.0$  W/m/K,  $\alpha = 9.4$  m<sup>2</sup>/s) characteristics.

The **introduction** substantiates the relevance of the topic and the expediency of the dissertation, its purpose and objectives are formulated, the object, subject and methods of the research are determined, the main results of the work are formulated, their scientific novelty and practical significance are determined, the

contribution of the applicant is specified, information on the testing of the results of work and publications on the topic of the dissertation.

The **first section, “Obtaining tool composite materials using nanopowders”** contains general information on technical approaches to working with nanosized powder materials, mixing techniques and where agglomeration, sintering and shaping their structure. The review of a number of innovative methods of consolidation of powder ceramic materials and comparison with traditional methods. The section provides an overview of the main types of ceramic materials and their applications, especially. Particular attention is paid to ceramic materials of instrumental designation. The analysis of researches revealing features of mechanical processing of metal by a cutting tool and methods of increase of wear resistance of ceramic materials at high speed cutting are carried out. The expediency of the study of the thermophysical properties of the material, which is used for the finishing and semi-processing of high-strength alloys, is shown.

The **second section “Research methods and initial materials”** provides information on how to obtain ceramic composites used in the course of research and the source materials from which they were made. The chapter describes the methods of studying the basic physical and mechanical properties of the samples obtained, their structure and phase composition. The structure of the equipment used for the production of prototype ceramics is described.

The **third section “Electroconsolidation of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and SiC nanopowders composites”** presents the results of investigations of sealing mechanisms in the process of electroconsolidation with the passage of high current. It was discovered that when the  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SiC powder mixtures are sintered at a temperature of  $T_{\text{sint}} \sim 1600\text{-}1700^\circ \text{C}$ , the main mechanisms of mass transfer are the rearrangement of the particles (at the initial stage) and intergranular diffusion (in the final stage), with the decrease of the temperature of the sintering and the time of isothermal aging, the place of intergranular diffusion occupies processes of superficial diffusion, which can not provide the formation of strong bonds. The influence of the dispersion of the initial components of the powder mixture on the sealing process

during compaction and sintering is shown. It has been established that the use of an additive in the form of nanopowder increases the maximum rate of shrinkage by 20%/min.

The section presents the results of researches of consolidation conditions and parameters of the initial mixture of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SiC on the phase composition, relative density and structure of the resulting composites. When the sintering temperature increases to 1700 °C in the  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SiC system, it is observed that the formation of the glass phase and the side gases is undesirable.

The research of the structure of the obtained ceramic samples showed that the absence of additives leads to rapid growth of grains, while the addition of a small amount of microdisperse silicon carbide retains the microstructure of the composite at  $T_{\text{sint}} = 1400$  °C. It has been found that the use of the additive in the form of nanopowder is more appropriate as it provides greater dispersion of the strengthening additive and retains the microstructure of the composite with an increase in the sintering temperature to 1700 °C.

The section also presents the data obtained in the research of the mechanical properties of composites on the basis of aluminum oxide and silicon carbide, and describes the effect on them of the parameters of consolidation and phase composition of the initial mixtures. The optimal manufacturing parameters for the composite based on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  with the addition of nano-SiC have been established.

The **fourth section “Thermophysical and thermomechanical properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SiC nanocomposites”** contains the results of experimental studies of the thermal conductivity of the composite materials obtained and the approximation of the obtained temperature dependences according to the Debye model of the phonon spectrum, which showed the effect of the consolidation parameters on the structural characteristics. The adequacy of the applied model is confirmed by the values of the determination coefficient and the correlation of the results with the results of studies of mechanical properties. Thanks to the use of the SiC additive, it was possible to increase the thermal conductivity of the composite to the order of 25 W/m/K, which is equal to the thermal conductivity coefficient of the tool steels.

The section presents the results of mathematical modeling of the temperature field distribution processes in the volume of the installation of electroconsolidation and the compression zone. It was established that the temperature difference in the compression zone during intensive heating does not exceed 12% and 2% – at the isothermal stage of sintering. Reliability of the used model is confirmed by comparing its results with experimental measurements.

Also in the section a comparison of the obtained composite material with existing analogues – high-speed steel, oxide and oxide-carbide ceramics has been made. For a comparative evaluation, the introduction of a thermomechanical parameter, which reflects both mechanical and thermophysical properties of the instrumental material, is proposed. The nanocomposite material received during the work on thermomechanical properties is 4 times higher than high-speed cutting steels, and in 2 times – than modern oxide-carbide ceramics of foreign manufacturers.

In the **fifth section “Operational properties and application of the developed composite material”** the results of testing the cutting properties of the composite material obtained at the alignment of rolls from heat-treated steels and cast iron in comparison with oxide, oxide-carbide and oxide-nitride ceramics are presented. It has been established that the cutting plates of the developed ceramics can be effectively applied at half-finished and finished finishing of tempered steels and allow to improve the processing efficiency compared with plates VOC-60, VOC-71 in 2 times.

Also, using mathematical processing of experimental data on mechanical properties empirical mathematical dependences of the basic characteristics of strength of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$  composite – microhardness and coefficient of crack resistance were obtained.

The **applications** contain acts of exploitation testing of the developed nanocomposite material and a list of publications on the topic of work.

*Keywords:* instrumental ceramics, electroconsolidation, mechanical properties, thermophysical properties, shrinkage, sintering.

## REFERENCES

1. Kislitsa M.V. Metod elektrokonsolidatsii (elektrospiekaniya) kak vysokoeffektivnyy metod dlya kompaktirovaniya nanoporoshkov s tselyu polucheniya kompozitsionnykh materialov instrumentalnogo i konstruktsionnogo naznacheniya / E.S. Gevorkyan. V.A. Chishkala. M.V. Kislitsa // Sbornik nauchnykh trudov Ukrainskogo gosudarstvennogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta. – 2016. – №160. – S.75-80.
2. Kislitsa M.V. Vliyanie nanodobavok na strukturu i svoystva karbida kremniya pri elektrokonsolidatsii / [E.S. Gevorkyan. V.A. Chishkala. O.M. Melnik. M.V. Kislitsa] // Vestnik NTU «KhPI». – 2016. – №22(1194). – S. 39-45.
3. Kislitsa M. The problem of effective pressure on consolidation of zirconia nanopowders and its solution with spark-plasma sintering / [E. Gevorkyan. Yu. Gutsalenko. V. Chishkala. O. Melnik. M. Kislitsa] // Fiability & Durability. – №1. – 2016. – P. 10-21.
4. Kislitsa M. V. Synthesis by method of electro consolidation of SiC and WC. ZrO<sub>2</sub> nanocomposite materials with the high mechanical properties / [E.S. Gevorkyan. G.D. Semchenko. M.V. Kislitsa. V.A. Chishkala. R.V. Vovk] // Visnik KhNU. seriya «Fizika». – 2016. – Vip. 24. – S. 30-35.
5. Kislitsa M. Ceramic cutting tools out of nanostructured refractory compounds / [Edwin Gevorkyan. Sergiy Lavrynenko. Mirosław Ruckic. Zbigniew Siemiatkowskic. Maksim Kislitsa] // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. – 2017. – № 68. – P. 142–144.
6. Kislitsya M.V. Vpliv elektrospikannya na strukturu i vlastivosti keramiki na osnovi karbidu kremniyu / E.S. Gevorkyan. M.V. Kislitsya // Zbirnik naukovikh prats UkrDUZT. – 2017. – vip. 169. – S. 136-137.
7. Kislitsa M.V. Investigation of structure and properties of composite material Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiC obtained by electroconsolidation process / R.V. Vovk. N.M. Prokopiv. V.A. Chishkala. M.V. Kislitsa // Functional Material. – 2018. – № 25 (1). – P. 43-47.

8. Kislitsa M.V. Elektro- i teploprovodnost MAX-fazy  $Ti_3AlC_2$  pri nizkikh temperaturakh / G.Ya. Khadzhay. R.V. Vovk. T.A. Prikhna. E.S. Gevorkyan. M.V. Kislitsa. A.L. Solovyev // Fizika nizkikh temperatur. – 2018. – t. 44. – № 5. – S. 589–591.

9. Kislitsa M. V. Charge and heat transfer of the  $Ti_3AlC_2$  MAX phase / [R. V. Vovk. G. Ya. Khadzhai. T. A. Prikhna. E. S. Gevorkyan. M. V. Kislitsa. A. L. Soloviev. I. L. Goulatis. A. Chroneos] // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. Published online: 21 May 2018. – P. 1-4.

10. Kislitsa M.V. Effect of nano addinion on the structure and properties of silicon carbide during electroconsolidation / R.V. Vovk. V.A. Chishkala. N.M. Prokopiv. M.V. Kislitsa. I.M. Chursina // Visnik KhNU. seriya «Fizika». – 2017. – Vip. 27. – S. 49-52.

11. Kislitsa M.V. Teploprovodnost nanokompozitov  $Al_2O_3$ -SiC. izgotovlennykh metodom elektrokonsolidatsii / M. V. Kislitsa. G. Ya. Khadzhay. E. S. Gevorkyan. R. V. Vovk // Fizika nizkikh temperatur. – 2019. – t. 45. № 4.– S. 484–487.

12. Kislitsa M.V. Phase formation in the  $SiC-Al_2O_3-ZrO_2$  system during hot pressing by the method of electroconsolidation / R. V. Vovk. M.V. Kislitsa. M. Rucki // Functional Materials. – 2019. – № 26 (1). – P. – 78-82.

13. Pat. na korisnu model №121894 Ukraina. MPK S04V 35/565 (2006.1) Kompozitsiynyi material z dobavkoyu karbidu kremniyu z visokimi termomekhanichnimi vlastivostyami / R.V. Vovk. E.S. Gevorkyan. L.A. Timofeeva. S.V. Panchenko. V.O. Chishkala. S.V. Litovchenko. M.V. Kislitsya; zayavnik ta vlasnik patentu UkrDUZT – № u 201704231; zayavl. 28.04.2017; opubl. 26.12.2017. Byul. №24.

14. Pat. na vinakhid №117981 Ukraina. MPK S04V 35/565 (2006.1). C04B 35/58 (2006.01). Kompozitsiynyi material z dobavkoyu karbidu kremniyu z visokimi termomekhanichnimi vlastivostyami / R.V. Vovk. E.S. Gevorkyan. L.A. Timofeeva. S.V. Panchenko. V.O. Chishkala. S.V. Litovchenko. M.V. Kislitsya;

zayavnik ta vlasnik patentu UkrDUZT – № a 201704197; zayavl. 27.04.2017; opubl. 02.08.2018. Byul. №20.

15. Pat. na vinakhid №118974 Ukraïna. MPK C04B 35/10 (2006.01). C04B 35/103 (2006.01). C04B 35/106 (2006.01). C04B 35/565 (2006.01) Kompozitsiynyi keramichniy material SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> ta sposib yogo otrimannya / E. S. Gevorkyan. V. O. Chishkala. O. M. Melnik. M. V. Kislitsya. S. V. Litovchenko. V. P. Nerubatskiy; zayavnik ta vlasnik patentu UkrDUZT – № a 201607301; zayavl. 05.07.2016; Byul. №7.

16. Kislitsa M.V. Sozdaniye mullitokorundovykh matrits. modifitsirovannykh nanochastitsami  $\beta$  – SiC / G.D. Semchenko. E.S. Gevorkyan. I.Yu. Shuteyeva. M.V. Kislitsa. M.A. Panasenko // Mezhdunar. konf. ogneuporshchikov i metallurgov. 7-8 aprelya 2016: tez. dokl. – NITU «MISiS». – 2016. – S. 68-69.

17. Kislitsa M.V. Kompozity c tonkoy strukturoy na osnove korunda i karbida kremniya / E.S. Gevorkyan. D.O. Moskovskikh. M.V. Kislitsa. K.S. Torosyan // Novyye ogneupory: tez. dokl. Mezhdunar. konf. ogneuporshchikov i metallurgov – 2016. – №3. – S. 10-11.

18. Kislitsa M.V. Nekotoryye osobennosti polucheniya bimodalnykh kompozitsionnykh materialov oksid alyuminiya – karbid kremniya pri elektrospekaniya / E.S. Gevorkyan. N.M. Prokopiv. V.A. Chishkala. M.V. Kislitsa // 16-y Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskoy konferentsiya. 30 maya – 03 iyunya 2016: tez. dokl. — Kiyev: ATM Ukrainy. – 2016. – S. 18-19.

19. Kislitsa M. Preparation of nanostructured materials by electrical sintering / [Edwin Gevorkyan. Sergiy Lavrynenko. Mirosław Rucki. Zbigniew Siemiętkowski. Maksim Kislitsa] // 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design. 11-15 June 2017. – INEGI/FEUP. 2017. – P. 663-666.

20. Kislitsa M.V. Perspektivy primeneniya kompozitsionnogo materiala Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC v kachestve instrumentalnogo / E.S. Gevorkyan. M.V. Kislitsa. S.N. Lavrinenko. M. Rutskiy. V.A. Chishkala // KhXV mizhnarodna naukovo-

praktichna konferentsiya «MicroCAD-2017». 17-19 travnya 2017 r.: tez. dop. – Kharkiv: NTU «KhPI». 2017. – S. 175.

21. Kislitsa M.V. Vysokoeffektivnoye kompaktirovaniye nanoporoshkov elektrokonsolidatsiyey / M.V. Kislitsa. E.S. Gevorkyan. V.A. Chishkala // 3-ya Vserossiyskaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem «Ekologobezopasnyye i resursosberegayushchiye tekhnologii i materialy». 18-20 maya 2017 g.: tez. dokl.: BNTs SO RAN. – 2017. – S. 103-105.

22. Kislitsa M.V. Formirovaniye struktury i svoystv kompozitsionnogo materiala  $Al_2O_3-SiC$  v protsesse elektrokonsolidatsii / [M.V. Kislitsa. E.S. Gevorkyan. N.M. Prokopiv. V.A. Chishkala] // 17-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya. 29 maya – 02 iyunya 2017 g.: tez. dokl.: – Kiyev: ATM Ukrainy. – 2017. – S. 55-56.

23. Kislitsa M.V. Novyy keramicheskyy material na osnove mikro  $Al_2O_3$  i  $SiC$  (nano) instrumentalnogo naznacheniya / E.S. Gevorkyan. M.V. Kislitsa. N.M. Prokopiv // 18-y Mezhdunarodnyy nauchno-tekhnicheskyy seminar. 10–16 fevralya 2018 g.: tez. dokl. – Kiyev: ATM Ukrainy. – 2018. – S. 37-39.

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
Актуальність теми	6
Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами	7
Мета й завдання дослідження	7
Методи	8
Наукова новизна отриманих результатів	9
Практичне значення отриманих результатів	10
Особистий внесок здобувача	11
Апробація результатів роботи	11
Публікації	12
Структура та обсяг дисертації	12
РОЗДІЛ 1	
ОТРИМАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ	
МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НАНОПОРОШКІВ	
1.1 Речовини в нано- и мікродисперсному стані	13
1.1.1 Особливості структури і властивостей наноматеріалів	13
1.1.2 Методи змішування нанопорошків	16
1.1.3 Методи деагломерації нанопорошків	19
1.2 Способи компактування кераміки	22
1.2.1 Основні закономірності спікання керамічних матеріалів	22
1.2.2 Гаряче пресування керамічних матеріалів	28
1.2.3 FAST-методи – інноваційні технології спікання	25
1.3 Двокомпонентна кераміка	29
1.3.1 Огляд основних видів керамічних матеріалів та областей їх застосування	31
1.3.2 Властивості та перспективність застосування кераміки на основі Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> для виготовлення ріжучого інструмента	36

1.3.3	Виробництво сировини для виготовлення керамічних різців в Україні	38
1.4	Механічна обробка ріжучим керамічним інструментом	40
1.4.1	Теплові процеси при механічній обробці	40
1.5.	Висновки та постановка задач досліджень	43

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИХІДНІ МАТЕРІАЛИ

2.1.	Вихідні порошки та їх підготовка	46
2.2.	Компактування порошків	48
2.2.1.	Установка електроконсолідації	48
2.2.2.	Вимірювання та реєстрація параметрів консолідації	50
2.3.	Дослідження структури, механічних та фізичних властивостей	52
2.3.1.	Дослідження структури нанокомпозитів	52
2.3.2.	Дослідження механічних властивостей нанокомпозитов	53
2.3.3.	Дослідження фізичних властивостей нанокомпозитів	54
2.4.	Методи моделювання теплових процесів при електроконсолідації	56
2.4.1.	Рівняння стану для описання електричних і теплових процесів	56
2.4.2.	Початкові і граничні умови	57
2.4.3.	Умови контакту	61
2.4.4.	Комп'ютерна реалізація математичної моделі	62
2.5.	Обробка результатів повного факторного експерименту	65

## РОЗДІЛ 3

### ЕЛЕКТРОКОНСОЛІДАЦІЯ КОМПОЗИТІВ З

#### НАНОПОРОШКІВ $Al_2O_3$ І $SiC$

3.1.	Консолідація порошків $Al_2O_3$ та $SiC$	69
3.1.1.	Механізми та етапи спікання	70

3.1.2. Моделювання та апроксимація процесів ущільнення	75
3.2. Вплив електроконсолідації на властивості матеріалу	79
3.2.1. Фазовий склад вихідних порошків $Al_2O_3$ -SiC	79
3.2.2. Вплив температури електроконсолідації на фазовий склад	81
3.2.3. Вплив складу шихти на щільність кераміки	85
3.2.4. Вплив дисперсності добавок та тривалості ізотермічної витримки на ріст зерна матриці	86
3.3. Механічні властивості композита $Al_2O_3$ -SiC(нано)	89
3.3.1. Твердість композитів $Al_2O_3$ -SiC	89
3.3.2. Тріщиностійкість композитів $Al_2O_3$ -SiC	91
3.4. Планування повного факторного експерименту	93
3.5. Висновки	96

## РОЗДІЛ 4

### ТЕПЛОФІЗИЧНІ ТА ТЕРМОМЕХАНІЧНІ

### ВЛАСТИВОСТІ НАНОКОМПОЗИТА $Al_2O_3$ -SiC

4.1. Механізми переносу тепла	97
4.2. Механізми розсіювання	98
4.2.1. Розсіювання на границях	98
4.2.2. Розсіювання на дефектах	99
4.2.3. Процеси перекидання	100
4.3. Апроксимація експериментальних даних по теплопровідності	101
4.3.1. Математична модель	101
4.3.2. Результати апроксимації	102
4.4. Термомеханічні властивості матеріалів інструментального призначення	106
4.5. Теплові процеси та їх динаміка при електроконсолідації	109
4.5.1. Температурні поля елементів установки	112
4.6. Висновки	118

## РОЗДІЛ 5

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ЗАСТОСУВАННЯ  
РОЗРОБЛЕНОГО КОМПОЗИЦІОННОГО МАТЕРІАЛА

5.1. Технологічний процес виготовлення ріжучих пластин з композиційного матеріалу (As15-6)	120
5.2. Дослідження ріжучих властивостей композиційного матеріалу As15-6	122
5.3. Прогнозування механічних властивостей композита $Al_2O_3$ -SiC за вихідними параметрам консолідації	129
5.4. Висновки	130
ВИСНОВКИ	132
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	136
ДОДАТКИ	153