

Краткое сообщение

УДК 546.881'261:542.913-977

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-2(56)-84-88

ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКА КАРБИДА ВАНАДИЯ КАЛЬЦИЕТЕРМИЧЕСКИМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИМСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ СИНТЕЗОМ

© 2026 г. Б. Ш. Браверман, А. Н. Аврамчик, О. А. Шкода

Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук (Россия, 634055, Томск, Академический проспект 10/4)

Аннотация. Карбиды переходных металлов обладают сочетанием тугоплавкости, высокой твердости, химической инертности и электропроводности, что делает их незаменимыми материалами для современной промышленности и наукоемких технологий. Карбиды ванадия занимают среди них особое место, являясь ключевым компонентом износостойких покрытий режущего инструмента и легирующих добавок для высокопрочных сталей. Несмотря на разнообразие методов синтеза, наиболее перспективными для крупномасштабного производства остаются процессы, основанные на восстановлении оксидов активными металлами (Mg, Ca). Применение металлотермии позволяет реализовать реакцию в режиме горения, обеспечивая значительное сокращение энергозатрат и времени синтеза. Представлены результаты одностадийного синтеза карбида ванадия методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в системе $V_2O_5 - C - Ca$. Проведены прямые измерения температур горения, подтверждающие высокую экзотермичность процесса. Показана эффективность кислотной очистки продуктов синтеза, позволившая выделить однофазный порошок карбида ванадия V_6C_5 . При помощи методов рентгенофазового анализа и ультразвуковой лазерной дифракции установлены фазовый состав и дисперсионные характеристики полученных порошков. Выявлена закономерность, согласно которой содержание примесного кислорода коррелирует увеличение размера частиц порошка. Полученные результаты доказывают возможность формирования фазы карбида ванадия в одну стадию, что открывает широкие перспективы для их использования в функциональных материалах и энергетических устройствах.

Ключевые слова: карбид ванадия, углерод, кальций, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, кальциетермия, горение, рентгенофазовый анализ, фазовый состав

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ТНЦ СО РАН.

Для цитирования: Браверман Б.Ш., Аврамчик А.Н., Шкода О.А. Получение порошка карбида ванадия кальциетермическим самораспространяющимся высокотемпературным синтезом. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;2(56):84–88. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2\(56\)-84-88](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2(56)-84-88)

SYNTHESIS OF VANADIUM CARBIDE POWDER VIA CALCIUM-THERMIC SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS

© 2026 B. Sh. Braverman, A. N. Avramchik, O. A. Shkoda

Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (10/4, Akademicheskii Prospekt, Tomsk, 634055, Russian Federation)

Abstract. Transition metal carbides have a combination of refractory, high hardness, chemical inertia and electrical conductivity, which makes them indispensable materials for modern industry and high-tech technologies. Vanadium carbides occupy a special place among them, being a key component of wear-resistant coatings of cutting tools and alloying additives for high-strength steels. Despite the variety of synthesis methods, processes based on the reduction of oxides with active metals (Mg, Ca) remain the most promising for large-scale production. The use of metallothermy makes it possible to realize the reaction in gorenje mode, providing a significant reduction in energy consumption and synthesis time. The results of single-stage synthesis of vanadium carbide by self-propagating high-temperature synthesis in the $V_2O_5 - C - Ca$

system are presented. Direct measurements of gorenje temperatures have been carried out, confirming the high exothermicity of the process. The effectiveness of acid purification of synthesis products is shown, which made it possible to isolate a single-phase vanadium carbide powder V_6C_5 . Using the methods of X-ray phase analysis and ultrasonic laser diffraction, the phase composition and dispersion characteristics of the obtained powders were determined. A pattern has been revealed according to which the content of impurity oxygen correlates with an increase in the size of powder particles. The results obtained prove the possibility of forming a vanadium carbide phase in one stage, which opens up broad prospects for their use in functional materials and energy devices.

Keywords: vanadium carbide, carbon, calcium, self-propagating high-temperature synthesis, calciumthermy, combustion, X-ray phase analysis, phase composition

Funding. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Braverman B.Sh., Avramchik A.N., Shkoda O.A. Synthesis of Vanadium Carbide Powder via Calcium-Thermic Self-Propagating High-Temperature Synthesis. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;2(56):84–88. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2\(56\)-84-88](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2(56)-84-88)

Введение

Карбиды переходных металлов обладают хорошим сочетанием тугоплавкости, высокой твердости, химической инертности и электропроводности, что делает их критически важными материалами для современной промышленности [1; 2]. Карбид ванадия (VC) занимает среди них важное место благодаря востребованности в наукоемких технологиях: от производства режущего инструмента и защитных покрытий, эксплуатируемых при экстремальных нагрузках, до легирования сталей и микроэлектроники [3; 4]. Уникальные физико-химические характеристики карбидов ванадия открывают возможности его использования в катализе и перспективных энергетических устройствах, включая анодные материалы литий-ионных аккумуляторов и электроды суперконденсаторов [5 – 9]. В связи с прикладной значимостью карбида ванадия и критическим влиянием стехиометрического состава на его функциональные свойства актуальной задачей является поиск методов синтеза порошков карбида ванадия с контролируемыми структурно-фазовыми характеристиками.

Методы исследования

Порошки карбида ванадия получали методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) со стадией восстановления кальцием по следующей схеме: $V_2O_5 + 5Ca + 2C \rightarrow 2VC + 5CaO$. Использовали следующие исходные реагенты: гранулы кальция диаметром 0,5 – 2,0 мм; газ аргон высокой чистоты; оксид V_2O_5 (ч.д.а.) и ламповая сажа. Исходные материалы перемешивали в фарфоровой ступке в течение 5 мин, смесь засыпали в бумажный стаканчик (диаметром 23 мм), который помещали в герметичный реактор. Последний заполняли аргоном до давления 0,1 – 1,1 МПа. Температуры измеряли термopарами ВР 5/20, преобразовывали в цифровой вид (АЦП ЛА 20) и

записывали на компьютер. Охлажденный продукт отмывали от оксида CaO раствором соляной кислоты и промывали дистиллированной водой. Фазовый состав изучали на рентгеновском дифрактометре ДРОН-УМ (CoK α , база данных PDF-2). Дисперсный состав продуктов определяли на ультразвуковом анализаторе Resch AS200. Время обработки составляло 1 ч. Содержание кислорода в продуктах определяли на приборе LECO ONH836. Удельную поверхность измеряли методом тепловой десорбции азота по четырехточечной БЭТ-методике на приборе ОРБИ-М. Перед измерением проводили термическую «тренировку» порошка в течение 1 ч при температуре 200 °C для дегазации поверхности. Морфологию порошка изучали с помощью системы с электронным и сфокусированным ионным пучком Quanta 200 3D.

Основные результаты

Термограммные измерения температур, полученные при восстановлении оксида V_2O_5 , показали, что максимальная температура T находится в диапазоне 1800 – 1900 К, время нахождения продуктов при $T \geq 1500$ К составляет 90 с. Исследование распределения порошковых продуктов по размерам было соотнесено с анализом на содержание в них кислорода. При увеличении размера порошка от 10 до 200 мкм содержание кислорода увеличивается от 0,6 до 1,5 мас. %. В более крупных частицах продукта остается больше кислорода. Минимальное его количество содержится в порошках диаметром менее 40 мкм. Рентгенограмма типичного продукта дисперсностью менее 40 мкм после кислотной отмывки представлена на рис. 1.

На рис. 2 показан внешний вид полученной порошковой смеси при различном увеличении. Растровая электронная микроскопия синтезиро-

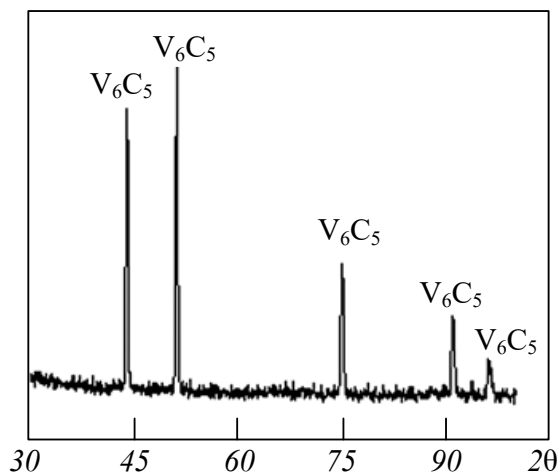


Рис. 1. Рентгенограмма порошка (дисперсность менее 40 мкм)
Fig. 1. Radiograph of the powder (dispersion less than 40 microns)

ванного порошка карбида ванадия при различных увеличениях выявила гетерогенную морфологию. На рис. 2, а видны крупные агломераты неправильной формы, которые имеют грубую, пористую поверхность, что может указывать на наличие межчастичных связей или включений. Между крупными скоплениями наблюдается значительное количество более мелких частиц, которые выглядят как отдельные кристаллиты или мелкие агрегаты. Их форма варьируется от более или менее сферической до угловатой. Гетерогенность порошка представлена рис. 2, б. Крупные агломераты состоят из множества мелких частиц. Наблюдается широкий диапазон размеров частиц: от субмикронных до нескольких микрометров.

Морфология порошка указывает на то, что синтез приводит к образованию как крупных агломератов, так и более мелких, индивидуальных

частиц. Присутствие выраженных агрегатов связано с их коагуляцией как в процессе механоактивации, так и на стадии охлаждения продуктов. Разнообразие размеров и форм частиц (от крупных агломератов неправильной формы до мелких кристаллитов) свидетельствует о неоднородности процесса синтеза или о наличии различных фракций в конечном продукте. Удельная поверхность полученного продукта составила $1,75 \text{ м}^2/\text{г}$, насыпная плотность – $1,19 \text{ г}/\text{см}^3$.

Выводы

В работе верифицирована возможность одностадийного синтеза карбида ванадия V_6C_5 посредством кальциетермического самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Измерены фактические температуры горения, что является важным параметром для масштабирования рассматриваемой технологии. Последующая кислотная очистка позволила выделить целевой однофазный продукт. Методами рентгенофазового анализа подтверждена преимущественная селективность процесса к формированию фазы карбида ванадия V_6C_5 . Установлена обратная корреляция между размером частиц порошка и содержанием остаточного кислорода. Синтезированный порошок обладает морфологией, характеризующейся наличием как крупных агломератов неправильной, пористой формы, так и более мелких, индивидуальных частиц с размерами от субмикронных до нескольких микрометров. Удельная поверхность ($1,75 \text{ м}^2/\text{г}$) и насыпная плотность ($1,19 \text{ г}/\text{см}^3$) полученного порошка являются относительно низкими, что связано с наличием крупных агломератов и их рыхлой структурой.

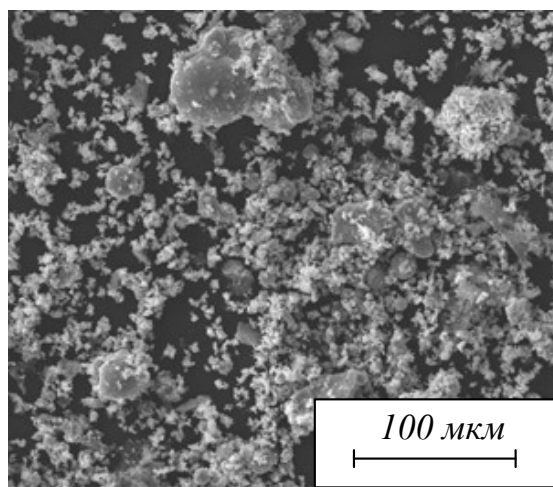
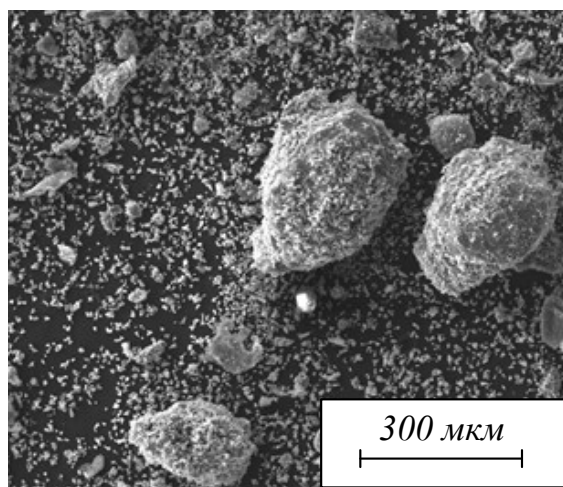


Рис. 2. РЭМ изображение полученной порошковой смеси карбида ванадия
Fig. 2. SEM image of synthesized vanadium carbide powder mixture

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yang X.H., Wang K.F., Zhang G.H., Chou K.C. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2022;109:105982. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.105982>
2. Крутский Ю.Л., Гудыма Т.С., Кучумова И.Д., Хабиров Р.Р., Антропова К.А. Карбиды некоторых переходных металлов. свойства, области применения и методы получения. Часть 1. Карбиды титана и ванадия (обзор). *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022;65(5):305–322. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-305-322>
3. Курлов А.С. Взаимосвязь пикнометрической плотности и удельной поверхности нанокристаллических порошков VC_y. *Неорганические материалы*. 2019;55(3):249–256. <https://doi.org/10.1134/S0002337X19030126>
4. Jing Wan, Congcong Wang, Qian Tang, Xiao Gu Mingquan He. *RSC Advances*. 2019;9:37467. <https://doi.org/10.1039/c9ra06539c>
5. Qingmin Shan, Xinpeng Mu, Mohamed Alhabeib, et al. *Electrochemistry Communications*, 2018;96:103–107. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2018.10.012>
6. Wang B., Wang Z., Yin Z., Yuan J., Jia J. Preparation and properties of the VC/Cr₃C₂/TaC doped ultrafine WC-Co tool material by spark plasma sintering. *J. Alloys Compd.* 2020;816:52598. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152598>
7. Курлов А.С., Ремпель А.А. Влияние размера наночастиц на температуру спекания, плотность и микротвердость сплавов WC с Co (8 мас. %). *Неорганические материалы*. 2009;45(4):428–433. EDN: KZY MAD
8. Липатников В.Н., Гусев А.И. *Упорядочение в карбидах титана и ванадия*. Екатеринбург: УрО РАН, 2000:263.
9. Yong Pan, Zhujia Tian, Lirong Xu. Unveiling the structural, hardness, elastic and thermodynamic properties of V – C carbides for high-temperature applications *Journal of Alloys and Compounds*. 2026;1056:186634. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2026.186634>
10. Chernaya metallurgiya. 2022;65(5):305–322. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-305-322>
11. Kurllov A.S. The relationship between the pycnometric density and specific surface area of nanocrystalline powders VC_y. *Neorganicheskie materialy*. 2019;55(3):249–256. <https://doi.org/10.1134/S0002337X19030126>
12. Jing Wan, Congcong Wang, Qian Tang, Xiao Gu Mingquan He. *RSC Advances*. 2019;9:37467. (In Russ.). <https://doi.org/10.1039/c9ra06539c>
13. Qingmin Shan, Xinpeng Mu, Mohamed Alhabeib, et al. *Electrochemistry Communications*, 2018;96:103–107. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2018.10.012>
14. Wang B., Wang Z., Yin Z., Yuan J., Jia J. Preparation and properties of the VC/Cr₃C₂/TaC doped ultrafine WC-Co tool material by spark plasma sintering. *J. Alloys Compd.* 2020;816:52598. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152598>
15. Kurllov A.S., Rempel' A.A. Influence of nanoparticle size on sintering temperature, density and microhardness of WC – Co alloys (8 wt. %). *Neorganicheskie materialy*. 2009;45(4):428–433. (In Russ.). EDN: KZY MAD
16. Lipatnikov V.N., Gusev A.I. *Ordering in titanium and vanadium carbides*. Yekaterinburg: UrO RAN, 2000:263. (In Russ.).
17. Yong Pan, Zhujia Tian, Lirong Xu. Unveiling the structural, hardness, elastic and thermodynamic properties of V – C carbides for high-temperature applications *Journal of Alloys and Compounds*. 2026;1056:186634. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2026.186634>

REFERENCES

1. Yang X.H., Wang K.F., Zhang G.H., Chou K.C. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2022;109:105982. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.105982>
2. Krutskii YU.L., Gudyma T.S., Kuchumova I.D., Khabirov R.R., Antropova K.A. Carbides of some transition metals. properties, applications, and production methods. Part 1. Carbides of titanium and vanadium (review). *Izvestiya vuzov*.

Сведения об авторах

Борис Шулевиц Браверман, к.т.н., научный сотрудник лаборатории функциональных керамических материалов, Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук

E-mail: bbraverman@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-8844-8752

SPIN-код: 5501-6153

Александр Николаевич Аврамчик, ведущий инженер лаборатории функциональных керамических материалов, Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук

E-mail: avran111@yandex.ru

ORCID: 0009-0008-5716-5670

SPIN-код: 8939-7463

Ольга Александровна Шкода, к.т.н., старший научный сотрудник Лаборатории функциональных керамических материалов, Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук

E-mail: Caryll@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-6068-4817

SPIN-код: 4753-7608

Information about the authors:

Boris Sh. Braverman, *Cand. Sci. (Eng.), researcher at the Laboratory of Functional Ceramic Materials, Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*

E-mail: bbraverman@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-8844-8752

SPIN-код: 5501-6153

Alexander N. Avramchik, *leading engineer of the Laboratory of Functional Ceramic Materials, Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*

E-mail: avran111@yandex.ru

ORCID: 0009-0008-5716-5670

SPIN-код: 8939-7463

Olga A. Shkoda, *Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Functional Ceramic Materials, Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*

E-mail: Caryll@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-6068-4817

SPIN-код: 4753-7608

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 06.04.2026

После доработки 27.04.2026

Принята к публикации 06.05.2026

Received 06.04.2026

Revised 27.04.2026

Accepted 06.05.2026