



УДК 621.762.242

<https://doi.org/10.17073/1997-308X.2026.576P.1070>

Научная статья

Research article



Синтез порошков циркония из губки комбинацией самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и дегидрирования

Р. Д. Капустин, Н. П. Черезов[✉], А. О. Кириллов

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН
Россия 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 8

✉ cherezovnikita@gmail.com

Аннотация. Проведенные исследования были направлены на разработку нового энергоэффективного метода получения порошков циркония из дешевого полуфабриката (циркониевой губки) с применением процессов СВС-гидрирования и термического дегидрирования. Ключевая особенность СВС-гидрирования заключается в отсутствии необходимости внешнего нагрева: процесс инициируется и поддерживается исключительно за счет собственного тепловыделения экзотермической реакции. Особое внимание в работе уделено разработке схемы процесса и исследованию характеристик получаемых циркониевых порошков. Согласно предложенной схеме, циркониевая губка располагается в центральной части реактора и окружена по периферии более мелкой фракцией титановой губки (5–20 мм). Данное решение позволяет достичь требуемой теплопроводности засыпки и обеспечить протекание реакции послынного горения во всем объеме. Синтез гидрида циркония выполняли в герметичном реакторе объемом 2 л, заполненном водородом до начального давления 2 МПа. Дегидрирование полученного продукта проводили в вакуумной печи при остаточном давлении менее 10 Па. В результате исследований был синтезирован мелкодисперсный порошок циркония, частицы которого (порядка 80 %) имели характерный размер от 10 до 100 мкм и обладали преимущественно осколочной формой и морфологией поверхности. Установлено, что фазовый состав синтезированного гидрида циркония представлен преимущественно фазой ϵ -ZrH₂, характеризующейся повышенным содержанием водорода (более 1,8 мас. %). Рентгенофазовый анализ порошка, полученного термическим дегидрированием, выявил его многофазный состав с преобладанием равновесной низкотемпературной фазы α -Zr. Данный порошок имеет высокую востребованность в порошковой металлургии циркония, в том числе с применением аддитивных технологий.

Ключевые слова: цирконий, порошок, СВС-гидрирование, дегидрирование

Для цитирования: Капустин Р.Д., Черезов Н.П., Кириллов А.О. Синтез порошков циркония из губки комбинацией самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и дегидрирования. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2026;20(3):6–12. <https://doi.org/10.17073/1997-308X.2026.576P.1070>

Synthesis of zirconium powders from a sponge by a combination of self-propagating high-temperature synthesis and dehydrogenation

R. D. Kapustin, N. P. Cherezov[✉], A. O. Kirillov

Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of the Russian Academy of Sciences
8 Academician Osip'yan Str., Chernogolovka, Moscow Region 142432, Russia

✉ cherezovnikita@gmail.com

Abstract. The conducted research is aimed at developing a new energy-efficient method for producing zirconium powders from a cheap semi-finished product (zirconium sponge) using the processes of SHS-hydrogenation and thermal dehydrogenation. The key feature of SHS-hydrogenation is the absence of the need for external heating: the process is initiated and maintained solely by its own heat release of the exothermic reaction. Special attention is paid to the development of a scheme and the study

of the characteristics of the resulting zirconium powders. According to the proposed scheme, a zirconium sponge is located in the central part of the reactor and is surrounded on the periphery by a smaller fraction of a titanium sponge (5–20 mm). This solution makes it possible to achieve the required thermal conductivity of the filling and ensure the flow of the layered combustion reaction throughout the entire volume. The synthesis of zirconium hydride was performed in a sealed reactor with a volume of 2 L filled with hydrogen to an initial pressure of 2 MPa. The dehydrogenation of the resulting product was carried out in a vacuum furnace at a residual pressure of less than 10 Pa. As a result of the research, a finely dispersed zirconium powder was synthesized with characteristic particle sizes (about 80 %) from 10 to 100 μm , with a predominantly fragmented shape and surface morphology of the particles. It was found that the phase composition of the synthesized zirconium hydride is mainly represented by the $\epsilon\text{-ZrH}_2$ phase, characterized by an increased hydrogen content (more than 1.8 wt. %). X-ray phase analysis of the powder obtained by thermal dehydrogenation revealed its multiphase composition with a predominance of the equilibrium low-temperature $\alpha\text{-Zr}$ phase. This powder is in high demand in zirconium powder metallurgy, including using additive technologies.

Keywords: zirconium, powder, SHS-hydrogenation, dehydrogenation

For citation: Kapustin R.D., Cherezov N.P., Kirillov A.O. Synthesis of zirconium powders from a sponge by a combination of self-propagating high-temperature synthesis and dehydrogenation. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2026;20(3):6–12. <https://doi.org/10.17073/1997-308X.2026.576P.1070>

Введение

Цирконий обладает высокой температурой плавления, хорошей пластичностью, отличной коррозионной стойкостью и низким поперечным сечением поглощения нейтронов [1], благодаря чему широко используется в атомной промышленности в качестве оболочки топливных стержней (ТВЭЛ) [2–4]. Применение циркония и соединений на его основе в атомной промышленности требует обеспечения высокой дисперсности и чистоты исходных порошков. Такие порошки могут быть получены с использованием различных методов изготовления, включая термическое восстановление металла, электролиз расплавленной соли, электродное окисление и гидрирование-дегидрирование (HDH) [5].

Метод HDH получил широкое распространение благодаря простоте технологической схемы, низкой стоимости производства и хорошей производительности [6; 7]. Процесс гидрирования-дегидрирования представляет собой твердофазный процесс, при котором цирконий поглощает водород при определенных температуре и давлении с последующим удалением водорода в процессе вакуумной термообработки гидрида [8]. В данном процессе есть три основных стадии: гидрирование, измельчение и дегидрирование. Во время гидрирования цирконий насыщается водородом, который изменяет кристаллическую структуру и механические свойства, образуя хрупкий гидрид циркония. Следующим шагом является измельчение гидрида циркония – полученные порошки просеивают и распределяют по размеру частиц. На последней стадии водород удаляют из циркония отжигом в вакууме при определенной температуре с получением чистого порошка циркония [9; 10].

Повысить эффективность технологии гидрирования-дегидрирования циркония можно с помощью метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [11; 12]. Особенностью

СВС является то, что процесс гидрирования протекает без внешних энергозатрат лишь за счет собственного тепла экзотермической реакции $\text{Zr} + \text{H}_2 \rightarrow \text{ZrH}_2 + Q$ (40 ккал/моль). Далее синтезированный гидрид циркония проходит те же операции, что и в процессе стандартной технологии: измельчение, рассев, дегидрирование [13; 14]. Процесс СВС для гидрирования порошков металлов, включая и цирконий [15], ранее применяли в Институте химической физики АН Армянской ССР (г. Ереван) и в Институте химической физики АН СССР (г. Черноголовка) [16]. В настоящее время критическую важность приобретает разработка научных основ технологии СВС-гидрирования и термического дегидрирования применительно к крупноразмерному циркониевому сырью.

В АО «Чепецкий механический завод» (ЧМЗ) впервые в России с нуля освоено производство циркониевой губки [17]. Производство губки включает в себя три крупных передела: хлорирование циркониевого рудного концентрата с получением технического тетрахлорида циркония, загрязненного железом, кремнием, титаном, углеродом и другими примесями; очистка технического тетрахлорида циркония от примесей, в том числе (наиболее сложный участок) очистка от гафния методом экстрактивной ректификации; получение циркониевой губки методом магнитермического восстановления очищенного циркония. По сравнению с фторидной технологией производства циркониевого порошка, производство губки содержит в два раза меньше технологических операций, требует меньше электроэнергии, сырья и материалов, значительно снижает объем отходов. При этом обеспечивается высокая чистота циркония в части содержания гафния, что принципиально важно для атомной промышленности. Внедренная на ЧМЗ технология ректификационного разделения хлоридов циркония и гафния позволила получить особо чистый тетрахлорид циркония – с содержанием гафния менее 0,01 %.

Таким образом, впервые в России есть доступ к очищенному от гафния относительно недорогому циркониевому полуфабрикату (губке), который можно применять для получения высокочистых циркониевых порошков. Использование этих порошков с пониженным содержанием гафния в сочетании с указанными методами порошковой металлургии и аддитивными технологиями [18–20] открывает возможность производства для атомной промышленности сложнопрофильных изделий (включая детали с внутренними полостями и облегченной конструкцией за счет топологической оптимизации) [21; 22]. Но прежде всего необходимо получить из циркониевой губки порошок, что в силу высокой прочности и пластичности циркония механическими методами измельчения затруднено, а часто и невозможно.

Целью данной работы являлась разработка нового энергоэффективного метода получения порошков циркония из циркониевой губки с применением процессов СВС-гидрирования и термического дегидрирования. Для достижения поставленной цели требовалось разработать схему СВС-гидрирования циркониевой губки, обеспечивающую получение гидрида циркония во всем объеме засыпки, и исследовать характеристики синтезированных циркониевых порошков.

Методика исследований

В качестве исходного сырья использовали циркониевую губку, титановую губку и газообразный водород марки А (99,99 %). Химический состав (мас. %) исходной циркониевой губки представлен ниже:

Zr + Hf	≥99,2	C	≤0,05
Hf	≤4,5	N ₂	≤0,025
Fe + Cr	≤0,2	O ₂	≤0,16
H ₂	≤0,025		

Применение крупной циркониевой губки (фракция 20–40 мм) потребовало разработки специальной схемы СВС-гидрирования (рис. 1) для обеспечения устойчивости процесса. В этой схеме циркониевая губка размещается в центре реактора, а по периферии обсыпается более дисперсной титановой губкой (фракция 5–20 мм), что является ключевой особенностью данной системы. В таком случае обеспечивается необходимая теплопроводность засыпки, и реакция послойного горения проходит по всему объему.

Согласно разработанной схеме, циркониевая и титановая губки были помещены в реактор высокого давления объемом 2000 см³. После герметизации реактора в систему подавали водород до достижения давления 2 МПа. Инициирование реакции осуществ-

ляли посредством нагрева металлической спирали, которая была в контакте с порошком для поджига. В процессе горения водород поглощался, в результате чего давление в реакторе падало; для поддержания стабильности горения давление в реакторе сохраняли на уровне не менее 1 МПа.

Процесс гидрирования протекает в твердофазном режиме, поэтому между титаном и цирконием не образуется прочного соединения. Благодаря этому после завершения СВС-гидрирования и охлаждения полученные продукты легко отделяются друг от друга. Для дальнейших экспериментов были отобраны образцы гидрида циркония, которые затем измельчались в порошок в керамической ступке.

На следующем этапе полученный порошок гидрида циркония подвергали дегидрированию. Для этого его размещали на молибденовой подложке в вакуумной печи, после герметизации которой проводили откачку воздуха вакуумным насосом. Вакуумирование осуществляли до остаточного давления <10 Па, после чего включали нагрев до максимальной заданной температуры 750 °С с выдержкой в течение 2 ч. Охлаждение проводили вместе с печью [23].

Фазовый состав полученных порошков определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре «Дрон-3» с использованием CuK_α-излучения. Размер частиц полученных порош-

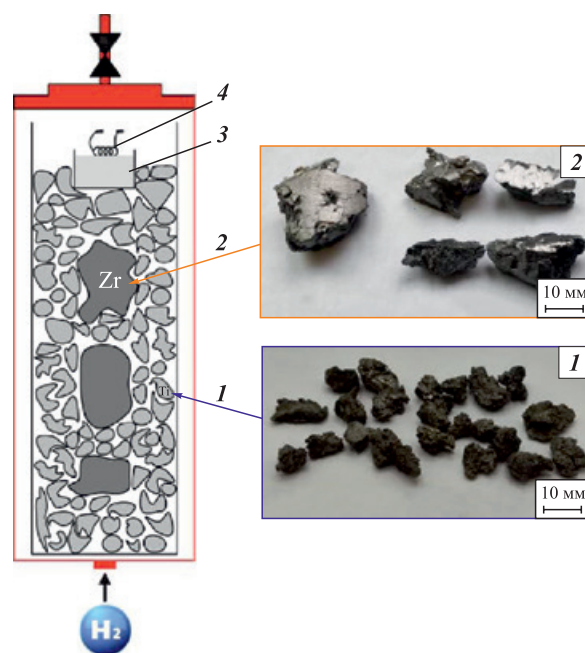


Рис. 1. Схема СВС-гидрирования

1 – титановая губка; 2 – циркониевая губка;
3 – порошок титана для поджига; 4 – иницирующая спираль

Fig. 1. Scheme of SHS-hydrogenation

1 – titanium sponge; 2 – zirconium sponge;
3 – titanium powder for ignition; 4 – initiating spiral

ков исследовали на лазерном анализаторе частиц «MicroSizer 201». Погрешность измерений не превышала 1,2 %. Морфологию частиц изучали на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) сверхвысокого разрешения «Zeiss Ultra plus» на базе «Ultra 55».

Результаты и их обсуждение

По предложенной схеме (см. рис. 1) был проведен процесс СВС-гидрирования циркониевой губки с последующим измельчением, в результате чего был получен порошок гидроксида циркония. Рентгенофазовый анализ исходной циркониевой губки (рис. 2, а) показал, что исходный цирконий является однофазным и соответствует α -Zr (ГПУ-решетка). На рентгенограмме зафиксирована текстура, связанная с особенностями подготовки поверхности образца (шлиф). Фазовый состав синтезированного гидроксида циркония представлен преимущественно фазой ε -ZrH₂ с тетрагональной кристаллической решеткой (рис. 2, б). На основании диаграммы состояния Zr–H (рис. 2, в) можно отметить, что полученная ε -фаза гидроксида циркония обладает высоким содержанием водорода, что свидетельствует об эффективности процесса гидрирования по предложенной схеме, позволяющей получать гидрид циркония, близкий к стехиометрическому составу ZrH₂ [24].

Далее полученный гидрид циркония был подвергнут измельчению и термическому дегидрированию в вакууме, что обеспечило получение мелкодисперсного циркониевого порошка. Его морфология и гранулометрический состав показаны на рис. 3.

Согласно результатам исследования гранулометрического состава порошка, он характеризуется практически мономодальным распределением частиц с основным пиком в интервале 10–100 мкм (~80 мас. %) и незначительной примесью субмикронных частиц. При этом общий разброс размеров частиц был от 0,5 до свыше 100 мкм. Наибольший выход продукта составил 10–80 мкм, что делает данный порошок пригодным для изготовления циркониевых изделий с требуемыми эксплуатационными характеристиками методами как порошковой металлургии, так и аддитивных технологий.

Анализ морфологии циркониевого порошка методом СЭМ выявил осколочную структуру частиц, что подтверждается их неправильной формой и сложным фактором поверхности. Такая структура напрямую обусловлена способом получения порошка и указывает на преобладание хрупкого механизма разрушения при измельчении по границам зерен и дефектам кристаллической решетки.

При РФА-исследовании порошка, синтезированного термическим дегидрированием (рис. 4), уста-

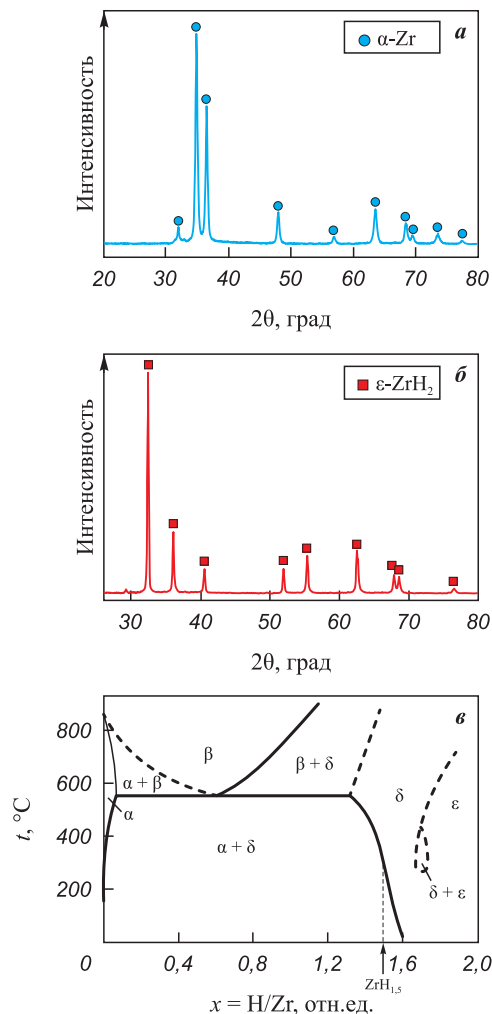


Рис. 2. РФА исходной циркониевой губки (а), гидроксида циркония после СВС-гидрирования и измельчения губки (б), диаграмма состояния Zr–H (в)

Fig. 2. X-ray diffraction of the initial zirconium sponge (a), zirconium hydride after SHS-hydrogenation and grinding of the sponge (b), Zr–H system phase diagram (c)

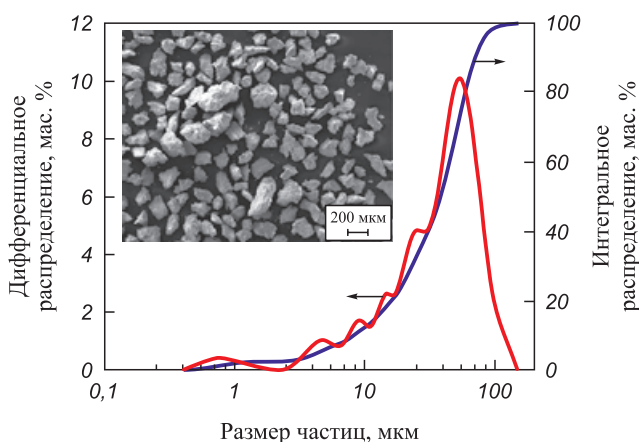


Рис. 3. Морфология и гранулометрический состав порошка циркония

Fig. 3. Morphology and granulometric composition of zirconium powder

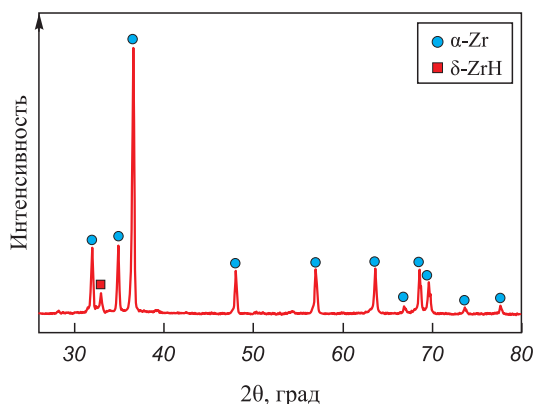


Рис. 4. РФА порошка циркония после дегидрирования

Fig. 4. X-ray diffraction of zirconium powder after dehydrogenation

новлен его многофазный состав. Преобладающей является равновесная низкотемпературная фаза α -Zr с ГПУ-решеткой, которая обеспечивает ключевые для применения в атомной промышленности свойства – такие, как низкое сечение захвата тепловых нейтронов, высокая коррозионная стойкость и высокие механические характеристики. Помимо этого, обнаружена небольшая доля фазы δ -ZrH с кубической решеткой, отличающейся пониженным содержанием водорода относительно гидрида ϵ -ZrH₂ [25].

Образование в процессе синтеза циркониевого порошка побочной фазы гидрида (ZrH) свидетельствует о неполном протекании дегидрирования и, соответственно, необходимости оптимизации режима дегидрирования.

Заключение

Предложен новый перспективный метод гидрирования крупнофракционной циркониевой губки, позволяющий произвести эффективное гидрирование на всю глубину материала с получением ϵ -фазы гидрида циркония, обладающей высоким содержанием водорода, что свидетельствует об эффективности процесса гидрирования. В результате термического дегидрирования полученного гидрида в вакууме был синтезирован мелкодисперсный порошок циркония с характерными размерами частиц (порядка 80 %) от 10 до 100 мкм и преимущественно осколочной их формой. Образование в процессе синтеза циркониевого порошка побочных фаз гидрида циркония (ZrH) обуславливает необходимость дальнейших исследований в выбранном перспективном направлении для оптимизации процесса и улучшения качества получаемых порошков на основе дешевого полуфабриката (циркониевой губки) энергоэффективными методами СВС-гидрирования и термического дегидрирования.

Список литературы / References

1. Agrawal Y.K., Sudhakar S. Extraction, separation and pre-concentration of zirconium. *Separation and Purification Technology*. 2002;27(2):111–119.
[https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(01\)00203-9](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(01)00203-9)
2. Федоров П.П., Яроцкая Е.Г. Дioxid циркония. Обзор. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(2):169–187.
<https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3427>
Fedorov P.P., Yarotskaya E.G. Zirconium dioxide. Review. *Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(2):169–187. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3427>
3. Savchenko A.M., Vatulin A.V., Morozov A.V., Kulakov G.V., Ershov S.A., Laushkin A.V., Maranchak S.V., Konovalov Y.V., Malamanova E.K. Zirconium alloys matrix as innovative material for composite fuel. *Progress in Nuclear Energy*. 2012;57:138–144.
<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.10.016>
4. Suman S., Khan M.K., Pathak M., Singh R.N., Chakravarty J.K. Hydrogen in Zircaloy: Mechanism and its impacts. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015;40(17):5976–5994.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.049>
5. Kalavathi V., Kumar Bhuyan R.K. A detailed study on zirconium and its applications in manufacturing process with combinations of other metals, oxides and alloys – A review. *Materials Today: Proceedings*. 2019;19:781–786.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.130>
6. Amelichkin I.V., Knyazeva E.M., Medvedev R., Muslimova A.V., Nefedov R.A., Orlov V.V., Sachkov V.I., Sachkova A.S., Stepanova O.B., Zhukov I.A. Hydride-dehydride fine zirconium powders for pyrotechnics. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*. 2021;20(1):31–43.
<https://doi.org/10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2020035408>
7. Park K.-T., Nersisyan H.H., Lee H.-H., Hong S.-I., Cho N.-C., Lee J.-H. Low-temperature synthesis of zirconium metal using ZrC₄-2Mg reactive mixtures. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2012;33:33–37.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2012.02.004>
8. Бережко П.Г., Тарасова А.И., Кузнецов А.А., Анфилов Н.В., Кремзуков И.К., Лещинская А.Г. Гидрирование титана и циркония и термическое разложение их гидридов. *Альтернативная энергетика и экология*. 2006;11(43):47–56.
Berezhko P.G., Tarasova A.I., Kuznetsov A.A., Anfilov N.V., Kremzakov I.K., Leshchinskaya A.G. Hydriding of titanium and zirconium and thermal decomposition of its hydrides. *Alternative Energy and Ecology*. 2006;11(43):47–56. (In Russ.).
9. Ma M., Liang L., Tang B., Xiang W., Wang Y., Cheng Y., Tan X. Decomposition kinetics study of zirconium hydride by interrupted thermal desorption spectroscopy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015;645:S217–S220.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.054>
10. Liu H., Lian L., Liu Y. Vacuum activation assisted hydrogenation-dehydrogenation for preparing high-quality zir-

- conium powder. *Materials and Manufacturing Processes*. 2019;34(6):630–636.
<https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1566610>
11. Мержанов А.Г., Боровинская И.П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез тугоплавких неорганических соединений. *Доклады Академии наук СССР. Химия*. 1972;204(2):366–369.
 Merzhanov A.G., Borovinskaya I.P. Self-propagating high-temperature synthesis of refractory melting inorganic compounds. *Doklady Akademii Nauk SSSR. Khimiya*. 1972;204(2):366–369. (In Russ.).
 12. Subrahmanyam J., Vijayakumar M. Self-propagating high-temperature synthesis. *Journal of Materials Science*. 1992;27(23):6249–6273.
<https://doi.org/10.1007/BF00576271>
 13. Su X., Fu F., Yan Y., Zheng G., Liang T., Zhang Q., Cheng X., Yang D., Chi H., Tang X., Zhang Q., Uher C. Self-propagating high-temperature synthesis for compound thermoelectrics and new criterion for combustion processing. *Nature Communications*. 2014;5(1):4908.
<https://doi.org/10.1038/ncomms5908>
 14. Kim H.L., Yun C.G., Ju J.H., Jun H.-J., Lee H.J., Ha H. Deoxidation behavior of Zr powder manufactured by using self-propagating high-temperature synthesis with Mg reducing agent. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2020;51(3):1070–1078.
<https://doi.org/10.1007/s11663-020-01815-x>
 15. Bugdayci M., Baslayici S., Coban O., Kaya F. Self-propagating high temperature synthesis (SHS) of ZrC–TiC nanocomposites: Comparison of Mg and Al reductant usage and process optimization. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2024;60(5):1541–1555.
<https://doi.org/10.1007/s41779-024-01062-2>
 16. Долуханян С.К., Нерсисян М.Д., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Способ получения гидридов переходных металлов: Патент 552293 (СССР). 1977.
 17. Путина О.А., Путин А.А., Гулякин А.И., Нечаев Н.П., Рождественский В.В., Филиппов В.Б., Лосицкий А.Ф., Черемных Г.С., Науман В.А., Емельховский В.Е., Штутца М.Г., Дорохов И.Т., Чинейкин С.В., Лубнин В.А. Магнито-термический способ получения губчатого циркония и устройство для его осуществления: Патент 2261286 (РФ). 2005.
 18. Ianko T., Panov S., Sushchynsky O., Pylypenko M., Dmytrenko O. Zirconium alloy powders for manufacture of 3D printed articles used in nuclear power industry. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2018;1(113):148–153.
 19. Vompe T., Goviazin G.G., Dolev O., Rudnik L., Katz-Demyanetz A. Sintering of additively manufactured zirconium by MoldJet technology. *Powder Technology*. 2024;436:119494.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119494>
 20. Sahasrabudhe H., Bandyopadhyay A. Laser-based additive manufacturing of zirconium. *Applied Sciences*. 2018;8(3):393. <https://doi.org/10.3390/app8030393>
 21. Sasi A., Srivastava M., Dash K. Role of additive manufacturing in developing functionally graded materials for nuclear applications. *Frontiers in Nuclear Engineering*. 2025;4:1–16. <https://doi.org/10.3389/fnue.2025.1603437>
 22. Nelson A.T. Prospects for additive manufacturing of nuclear fuel forms. *Progress in Nuclear Energy*. 2023;155:104493. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104493>
 23. Черезов Н.П., Алымов М.И. Исследование физических, химических и технологических свойств порошка титана, полученного термическим дегидрированием в вакууме. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2023;17(4):5–15.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-4-5-15>
 Cherezov N.P., Alymov M.I. Investigation of physical, chemical, and technological properties of titanium powder obtained by thermal dehydrogenation in vacuum. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2023;17(4):5–15.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-4-5-15>
 24. Maimaitiyili T., Blomqvist J., Steuwer A., Bjerkén C., Zanellato O., Blackmur M.S., Jerome A., Ribeiro F. In situ hydrogen loading on zirconium powder. *Journal of Synchrotron Radiation*. 2015;22(4):995–1000.
<https://doi.org/10.1107/S1600577515009054>
 25. Domain C., Besson R., Legris A. Atomic-scale Ab-initio study of the Zr–H system: I. Bulk properties. *Acta Materialia*. 2002;50(13):3513–3526.
[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00173-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00173-8)

Сведения об авторах



Information about the Authors

Никита Петрович Черезов – к.т.н., науч. сотрудник лаборатории высокотемпературных методов синтеза сверхвысокотемпературных керамических материалов Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН (ИСМАН)

 **ORCID:** 0000-0003-4942-5520

 **E-mail:** cherezovnikita@gmail.com

Роман Дмитриевич Капустин – к.т.н., ст. науч. сотрудник лаборатории ударно-волновых процессов ИСМАН

 **ORCID:** 0000-0002-8932-7709

 **E-mail:** kapustin-roman@mail.ru

Андрей Олегович Кириллов – мл. науч. сотрудник лаборатории высокотемпературных методов синтеза сверхвысокотемпературных керамических материалов ИСМАН

 **ORCID:** 0000-0002-0607-7346

 **E-mail:** kira@ism.ac.ru

Nikita P. Cherezov – Cand. Sci. (Eng.), Researcher of the Laboratory of high-energy methods of synthesis of ultrahigh-temperature ceramic materials, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (ISMAN)

 **ORCID:** 0000-0003-4942-5520

 **E-mail:** cherezovnikita@gmail.com

Roman D. Kapustin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of shock-wave processes, ISMAN

 **ORCID:** 0000-0002-8932-7709

 **E-mail:** kapustin-roman@mail.ru

Andrey O. Kirillov – Junior Researcher of the Laboratory of high-energy methods of synthesis of ultrahigh-temperature ceramic materials, ISMAN

 **ORCID:** 0000-0002-0607-7346

 **E-mail:** kira@ism.ac.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

Р.Д. Капустин – организация и общее руководство научно-исследовательской работой, постановка цели и задач исследования, анализ научной литературы по направлению исследования, анализ результатов исследования, подготовка текста статьи, формулировка выводов.

Н.П. Черезов – разработка экспериментальной схемы для проведения СВС-гидрирования, подготовка и проведение экспериментов по СВС-гидрированию, определение свойств полученных порошков, обработка полученных результатов, подготовка текста статьи.

А.О. Кириллов – анализ научной литературы по направлению исследования, подбор и подготовка исходных материалов для синтеза гидрида циркония, проведение экспериментов по измельчению и дегидрированию порошка циркония, анализ результатов исследования, подготовка текста статьи.

R. D. Kapustin – organization and general management of research work, formulation of research goals and objectives, analysis of scientific literature in the field of research, analysis of research results, preparation of the text, formulation of conclusions.

N. P. Cherezov – development of an experimental scheme for conducting SHS hydrogenation, preparation and conduct of experiments on SHS hydrogenation, definition properties of the obtained powders, processing of the obtained results, preparation of the text.

A. O. Kirillov – analysis of scientific literature in the field of research; selection and preparation of starting materials for the synthesis of zirconium hydride, experiments on grinding and dehydrogenation of zirconium powder, analysis of research results, preparation of the text of the article.

Статья поступила 27.01.2026 г.
Доработана 04.05.2026 г.
Принята к публикации 07.05.2026 г.

Received 27.01.2026
Revised 04.05.2026
Accepted 07.05.2026