

**Краткое сообщение**

УДК 621.7/544.463

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-59-62

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ  
СИЛИЦИДОВ НИОБИЯ**

© 2026 г. Н. Е. Беляев<sup>1</sup>, О. А. Шкода<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет (Россия, 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20)

<sup>2</sup>Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук (Россия, 634055, Томск, пр. Академический 10/4)

**Аннотация.** Силициды ниобия представляют научный и прикладной интерес для высокотемпературных композиционных материалов благодаря термической стабильности и механической прочности. Механическая активация (МА) является эффективным методом как для подготовки порошков, так и для получения материалов механохимическим синтезом. Этот процесс включает комплекс взаимосвязанных физико-химических явлений: интенсивная пластическая деформация, накопление дефектов, измельчение, формирование слоистых агломератов с увеличенной межфазной поверхностью. Все это позволяет управлять и контролировать кинетику реакций и формировать фазовый состав порошковой смеси. Изучена возможность синтеза силицидов ниобия из техногенных отходов: ниобиевой стружки и кремниевых пластин. Исследованы подготовка сырья, измельчение и удельная поверхность активированных смесей при различном времени механической активации. Рентгенофазовый анализ подтвердил формирование силицидов ниобия. Эксперименты показали возможность и целесообразность использования отходов в качестве исходного сырья. Были подобраны условия механической активации для получения кристаллической порошковой смеси с суммарным содержанием силицидов ниобия, достигающим 38 мас. %. Полученные результаты закладывают основу для дальнейшей оптимизации МА с целью направленного синтеза материалов для нового поколения высокотемпературных композитов.

**Ключевые слова:** ниобий, кремний, силициды ниобия, механическая активация, механохимический синтез, технологическая обработка, техногенные отходы

**Благодарности:** авторы выражают признательность Томскому региональному центру коллективного пользования и Центру коллективного пользования «Структура, механические и физические свойства материалов» Новосибирского государственного технического университета.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания ТНЦ СО РАН (проект № FWRF-2024-0009) и при поддержке проекта FSUN-2024-0005.

**Для цитирования:** Беляев Н.Е., Шкода О.А. Использование вторичного сырья для получения силицидов ниобия. Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2026;1(55):59–62. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1\(55\)-59-62](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-59-62)

**THE USE OF SECONDARY RAW MATERIALS FOR THE PRODUCTION  
OF NIOBIUM SILICIDES**

© 2026 N. E. Belyaev<sup>1</sup>, O. A. Shkoda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University (20 K. Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation)

<sup>2</sup>TOM Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (10/4 Akademicheskii Ave., Tomsk, 634055, Russian Federation)

**Abstract.** Niobium silicides are of scientific and applied interest for high-temperature composite materials due to their thermal stability and mechanical strength. Mechanical activation (MA) is an effective method both for the preparation of powders

and for the production of materials by mechanochemical synthesis. This process includes a complex of interrelated physico-chemical phenomena: intense plastic deformation, accumulation of defects, crushing, formation of layered agglomerates with an enlarged interfacial surface. All this allows you to control and control the kinetics of reactions and form the phase composition of the powder mixture. The possibility of synthesizing niobium silicides from technological waste: niobium chips and silicon wafers has been studied. The preparation of raw materials, grinding and specific surface area of activated mixtures at different times of mechanical activation are investigated. X-ray phase analysis confirmed the formation of niobium silicides. Experiments have shown the possibility and expediency of using waste as a feedstock. The conditions of mechanical activation were selected to obtain a crystalline powder mixture with a total content of niobium silicides reaching 38 % by weight. The results obtained lay the foundation for further optimization of the MA in order to synthesize materials for a new generation of high-temperature composites.

**Keywords:** niobium, silicon, niobium silicides, mechanical activation, mechanochemical synthesis, processing, man-made waste

**Acknowledgements:** The authors express gratitude to the Tomsk Regional Core Shared Research Facilities Centre of National Research Tomsk State University and the Center for Collective Use "Structure, Mechanical and Physical Properties of Materials" of NSTU.

**Funding:** The work was carried out within the framework of the state assignment of the TSC SB RAS (project No. FWRP-2024-0009) and with the support of project FSUN-2024-0005.

**For citation:** Belyaev N.E., Shkoda O.A. The use of secondary raw materials for the production of niobium silicides. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):59–62. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1\(55\)-59-62](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-59-62)

## Введение

Силициды ниобия используются в машиностроении для создания высокотемпературных композиционных материалов благодаря высокой стойкости к окислению и термическим ударам, сохранением механических свойств при повышенных температурах, хорошей электропроводностью, химической совместимостью [1 – 5]. Механическая активация (МА) применяется как самостоятельный метод синтеза, так и как эффективный инструмент обработки и подготовки материалов. В связи с тем, что система Nb – Si является низкоэнергетической, необходимо провести самораспространяющийся высокотемпературный синтез невозможно без МА [6 – 10].

В настоящей работе использовали техногенные отходы в виде металлической стружки ниобия и пластин кремния, это позволяет решать экологические проблемы и снизить затраты на сырье. Целью настоящей работы является изучение возможности синтеза силицидов ниобия методом механохимической обработки с использованием доступных техногенных отходов (ниобиевой стружки и кремниевых пластин), подбор условия приготовления вторичного сырья и механической активации для получения кристаллической порошковой смеси, содержащей силициды ниобия.

## Методы исследования

Механическую активацию кремния и ниобия проводили в планетарной мельнице Активатор 2SL. Соотношение массы шаров (диаметром 5 мм) к

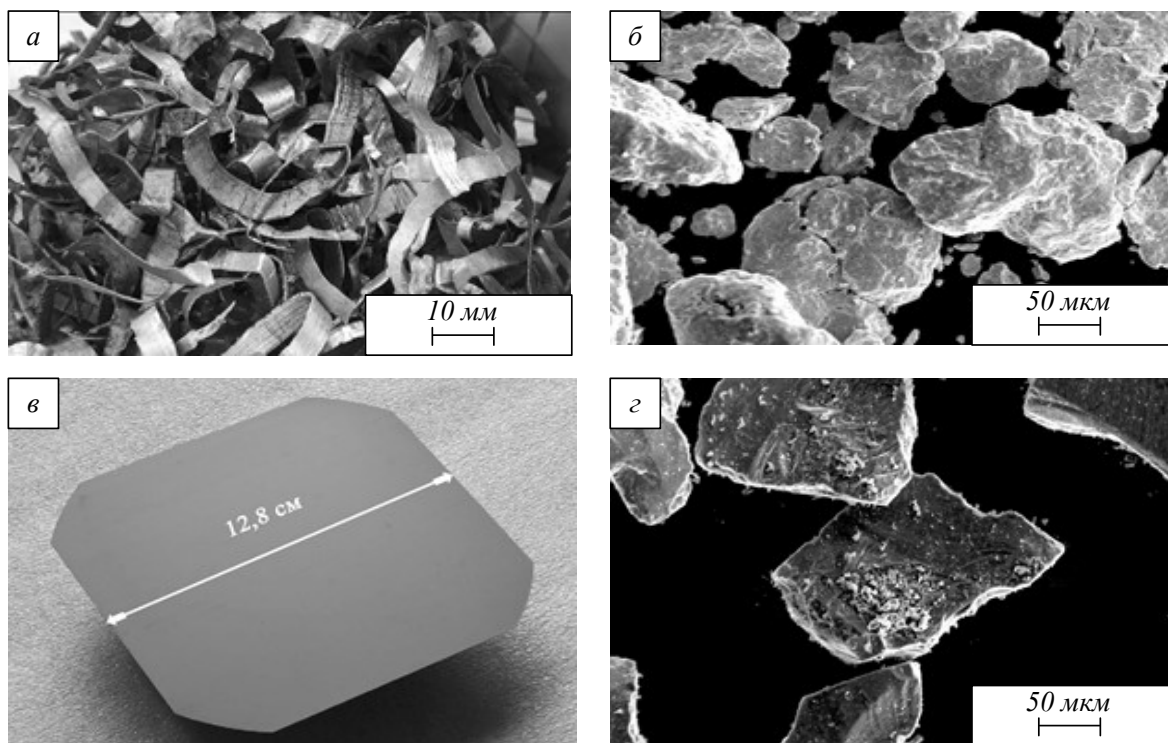
порошку ( $\text{Nb}_5\text{Si}_3$ ) было 6,3 : 1. Время МА составляло 300, 600, 900 и 1800 с. Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре XRD-6000 (базы PDF 4+, POWDER CELL 2.4).

Была разработана методика предварительной обработки исходного вторичного сырья (кремниевые пластины и ниобиевая стружка). Стружку ниобия измельчали гильотинными ножницами до размеров пластинок  $5 \times 5 \times 2$  мм. Далее их подвергали измельчению в шаровой мельнице Активатор 2SL в течение 10 мин. Полученный порошок просеивали через сито с ячейкой 150 мкм. Порошок кремния готовили из пластин технического кремния размерами  $100 \times 100 \times 5$  мм. Измельчение пластин проводили в дезинтеграторе Desi-11. Полученный материал просеивали через сито с ячейкой 150 мкм. Фракцию, оставшуюся на сите, в дальнейших экспериментах не использовали.

## Основные результаты

Внешний вид исходного вторичного сырья и образцов после обработки представлены на рисунке.

В процессе МА удельная поверхность рассматриваемой смеси после 900 с МА достигла  $1,25 \text{ м}^2/\text{г}$ , что показывает хорошую степень измельчения. После 1800 с она увеличилась до  $1,36 \text{ м}^2/\text{г}$ , что свидетельствует об образовании слоистых агломератов. Поведение механоактивированной смеси, приготовленной из техногенных отходов, качественно не отличается от поведения подобной смеси, изготовленной из исходных



Внешний вид металлической стружки технического ниобия (а), образцов после обработки в механоактиваторе в течение 10 мин и отделения фракции до 150 мкм (б), пластин технического кремния (в), материал после обработки пластин в лабораторном дезинтеграторе и отделения фракции до 150 мкм (г)

The appearance of technical niobium metal shavings (a), samples after treatment in a mechanical activator for 10 minutes and separation of a fraction up to 150 microns (б), technical silicon wafers (в), material after treatment of wafers in a laboratory disintegrator and separation of a fraction up to 150 microns (г)

промышленных порошков [2]. Рентгенофазовый анализ показал, что на протяжении всего времени МА порошковая смесь остается в кристаллическом состоянии, хотя часто при использовании механической активации происходит переход в аморфное [9] формирование соединения  $\text{Nb}_5\text{Si}_2$  (6 мас. %) после 300 с МА. После 1800 с МА содержание силицидов ( $\text{Nb}_5\text{Si}_3 + \text{NbSi}_2$ ) выросло до 38 мас. %.

### Выводы

Исследование подтвердило целесообразность применения ниобиевых и кремниевых отходов в качестве сырья. Подобраны условия механической активации для получения кристаллической порошковой смеси с суммарным содержанием силицидов ниобия 38 мас. %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sankar M., Satya Prasad V.V., Baligidad R.G., Alam M.Z., Das D.K., Gokhale A.A. Microstructure, Oxidation Resistance and Tensile Properties of Silicide Coated Nb-alloy C-103. *Mater. Sci. Eng. A*. 2015;645:339–346. <https://doi.org/j.msea.2015.07.063>
2. Shkoda O.A., Tereckova O.G. SHS in the Nb – Si System: Influence of Mechanical Alloying. *J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* 2016;25(14). <https://doi.org/10.3103/S106138621601012X>
3. Knittel S., Mathieu S., Portebois L., Drawin S., Vilasi M. Development of silicide coatings to ensure the protection of Nb and silicide composites against high temperature oxidation. *Surface and Coatings Technology*. 2013;235:401–406. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.07.053>
4. Cardozo E.P., D'Oliveira A.S.C.M. Niobium silicide multilayers processed by in situ synthesis during deposition of powder mixtures. *J. of Mater Eng and Perform.* 2022;31:3998–4005. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06460-2>
5. Goncharov I.S., Hisamova L.V., Saubanova L.Yu., Polozov I.A., Wang Q.S. Synthesis of the In Situ Nb – Si Composites by Binder Jetting Additive Manufacturing Technology. *KEM*. 2019;822:311. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.822.311>
6. Ling X., Liu F., Zhang M., Liu Q. Shock synthesis of niobium silicide ( $\text{Nb}_5\text{Si}_3$ ) via the flyer plate impact technique with high impact velocities. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;740:1032–1036. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.089>
7. Hafs A., Hafs T., Berdjane D. et al. Synthesis of Fe90Nb10 via wet mechanical milling method and

its structural, magnetic and thermal characterization. *Bull Mater Sci.* 2025;48(14). <https://doi.org/10.1007/s12034-024-03372-4>

8. Zhang Y.-H., Wu L.-R., Ma J., Cui G. Nanotechnology in solid state batteries, what's next? *Next Nanotechnology.* 2023;2:100011. <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2023.100011>
9. Li B., Liu L., Ma X.M. Amorphization in the Nb – Si system by mechanical alloying. *Journal of alloys and compounds.* 2002;161–163.
10. Trevino R., Maguregui E., Perez F., Shafirovich E. Mechanically activated SHS of Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> and Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>/Nb composites. *Journal of Alloys and Compounds.* 2020;826:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154228>

## REFERENCES

1. Sankar M., Satya Prasad V.V., Baligidad R.G., Alam M.Z., Das D.K., Gokhale A.A. Microstructure, Oxidation Resistance and Tensile Properties of Silicide Coated Nb-alloy C-103. *Mater. Sci. Eng. A.* 2015;645:339–346. <https://doi.org/j.msea.2015.07.063>
2. Shkoda O.A., Tereckova O.G. SHS in the Nb – Si System: Influence of Mechanical Alloying. *J Self-Propag. High-Temp. Synth.* 2016;25(14). <https://doi.org/10.3103/S106138621601012X>
3. Knittel S., Mathieu S., Portebois L., Drawin S., Vilasi M. Development of silicide coatings to ensure the protection of Nb and silicide composites against high temperature oxidation. *Surface and Coatings Technology.* 2013;235:401–406. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.07.053>
4. Cardozo E.P., D'Oliveira A.S.C.M. Niobium silicide multilayers processed by in situ synthesis during deposition of powder mixtures. *J. of Materi Eng and Perform.* 2022;31:3998–4005. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06460-2>
5. Goncharov I.S., Hisamova L.V., Saubanova L.Yu., Polozov I.A., Wang Q.S. Synthesis of the in situ Nb – Si composites by binder jetting additive manufacturing technology. *KEM.* 2019;822:311. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.822.311>
6. Ling X., Liu F., Zhang M., Liu Q. Shock synthesis of niobium silicide (Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>) via the flyer plate impact technique with high impact velocities. *Journal of Alloys and Compounds.* 2018;740:1032–1036. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.089>
7. Hafs A., Hafs T., Berdjane D. et al. Synthesis of Fe<sub>90</sub>Nb<sub>10</sub> via wet mechanical milling method and

its structural, magnetic and thermal characterization. *Bull Mater Sci.* 2025;48(14). <https://doi.org/10.1007/s12034-024-03372-4>

8. Zhang Y.-H., Wu L.-R., Ma J., Cui G. Nanotechnology in solid state batteries, what's next? *Next Nanotechnology.* 2023;2:100011. <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2023.100011>
9. Li B., Liu L., Ma X.M. Amorphization in the Nb – Si system by mechanical alloying. *Journal of alloys and compounds.* 2002;161–163.
10. Trevino R., Maguregui E., Perez F., Shafirovich E. Mechanically activated SHS of Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> and Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>/Nb composites. *Journal of Alloys and Compounds.* 2020;826:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154228>

## Сведения об авторах

**Никита Евгеньевич Беляев**, аспирант, Новосибирский государственный технический университет

**E-mail:** N.E.Belyaev@yandex.ru

**ORCID:** 0000-0002-7371-7905

**Ольга Александровна Шкода**, к.т.н., старший научный сотрудник отдела структурной макрокинетики, Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук

**E-mail:** O.Shkoda@dsm.tsc.ru

**ORCID:** 0000-0002-6068-4817

**SPIN-код:** 4753-7608

## Information about the authors:

**Nikita E. Belyaev**, postgraduate student, Novosibirsk State Technical University

**E-mail:** N.E.Belyaev@yandex.ru

**ORCID:** 0000-0002-7371-7905

**Olga A. Shkoda**, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher, Department of Structural Macrokinetics, Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

**E-mail:** O.Shkoda@dsm.tsc.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 11.12.2025

После доработки 02.02.2026

Принята к публикации 11.02.2026

Received 11.12.2025

Revised 02.02.2026

Accepted 11.02.2026