

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»МРНТИ 31.06.01
УДК: 669.168DOI [10.53002/026](https://doi.org/10.53002/026)А.Г. Бурумбаев¹, Е.Н. Махамбетов¹, С.К. Кабылканов², А.М. Жақан²¹ *Карагандинский индустриальный университет, Караганда, Казахстан
(E-mail: burumbayev.azamat@mail.ru, m.ye.n@mail.ru)*² *Химико-металлургический институт им. Ж.Абишева, Караганда, Казахстан
(E-mail: kabyl_96@mail.ru; armat.01.01@mail.ru)***Использование техногенных и природных отходов в синтезе карбида кремния:
инновационные подходы, решения и технологические аспекты**

Статья посвящена использованию техногенных и природных отходов, таких как микрокремнезем и рисовая шелуха, в синтезе карбида кремния (SiC) – ключевого материала, востребованного в различных отраслях. Рассматриваются традиционные и альтернативные методы производства SiC, включая переработку отходов для создания экологически безопасных и экономичных технологий. Особое внимание уделено улучшению качества синтеза через предварительную обработку исходных материалов и оптимизацию реакции. Полученные результаты показывают высокую эффективность и перспективность применения отходов в промышленности, что способствует снижению экологической нагрузки и повышению устойчивости металлургической отрасли.

Ключевые слова: карбид кремния, синтез, микрокремнезем, рисовая шелуха, переработка отходов, экология, металлургия, устойчивые технологии, абразивные материалы, экологическая безопасность.

Введение

Современная металлургическая отрасль сталкивается с проблемами, связанными с экстракцией ресурсов, улучшением качества продукции и адаптацией к экологическим требованиям. Одним из ключевых материалов, который активно используется в различных отраслях, является карбид кремния (SiC). Этот материал востребован благодаря своей химической стабильности, высокой термостойкости и устойчивости к воздействию ионизирующих излучений.

Процесс получения SiC традиционно используется в технологии Ачесона, но существует потребность в поиске альтернативных и экологически безопасных материалов, которые могут заменить традиционные сырьевые компоненты, такие как кварцевый песок и углеродистые восстановители.

Методы и материалы

Карбид кремния обладает уникальными свойствами, которые делают его незаменимым материалом в экстремальных условиях эксплуатации. Он используется как абразивный и полупроводниковый материал, предназначенный для работы в условиях высоких температур, высоких плотностей тока и агрессивных химических сред. SiC применяется в аэрокосмической, энергетической, электронной и других отраслях. Его высокая химическая стойкость, прочность и термостойкость обеспечивают надежную работу в жестких эксплуатационных условиях [1].

Традиционно карбид кремния получают методом Ачесона в печах сопротивления, где используются высокочистые кварцевые пески и углеродистые восстановители. Однако этот метод требует высококачественного сырья, что увеличивает стоимость производства, а также связано с большими энергетическими затратами. В ходе реакции кремний диоксид (SiO₂) взаимодействует с углеродом, что приводит к образованию карбида кремния (SiC) и выделению углекислого газа. [2].

Альтернативные сырьевые материалы: микрокремнезем и рисовая шелуха

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

Микрокремнезем – это техногенный отход, который образуется при производстве кремниевых сплавов и технического кремния.

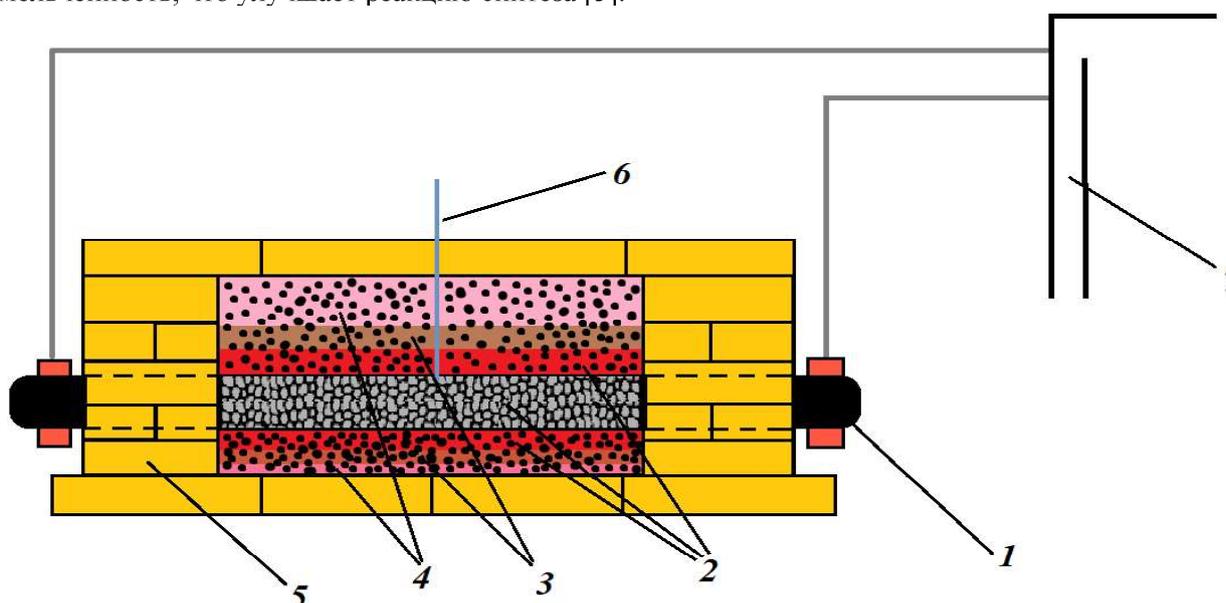
Содержание аморфного диоксида кремния в микрокремнеземе составляет более 92%, и его накопление создает серьезные экологические проблемы. В последние годы внимание исследователей привлекло использование микрокремнезема как альтернативного сырья для синтеза SiC. Это решение позволяет не только снизить затраты на сырье, но и уменьшить воздействие на окружающую среду за счет переработки отходов [3].

Рисовая шелуха, являющаяся отходом рисоперерабатывающих предприятий, также рассматривается как потенциальное сырье для производства SiC. Примерно 160-170 кг рисовой шелухи образуется на каждую тонну переработанного риса. Она содержит кремний в виде силикатных соединений, что делает ее пригодной для термической переработки в кремнеуглеродистый материал, который можно использовать для синтеза SiC [4].

Процесс синтеза карбида кремния

Синтез карбида кремния из микрокремнезема и углеродных восстановителей осуществляется через восстановительную реакцию SiO_2 с углеродом, при которой образуется SiC и углекислый газ. Этот процесс происходит на высоких температурах в печах сопротивления, что позволяет получить чистый карбид кремния.

Взаимодействие кремнезема с углеродом происходит по нескольким стадиям, в ходе которых образуются промежуточные продукты, такие как газообразный монооксид кремния (SiO) и углекислый газ (CO). Важно отметить, что на эффективность этого процесса влияет качество сырья, а также его измельченность, что улучшает реакцию синтеза [5].



1 – графитовый электрод; 2 – реакционные зоны; 3 – зоны спекания, 4- зоны оборотный шихты, 5 – шамотные кирпичи, 6 – термопара ВР-5/20; 7 – пачный трансформатор

Рисунок 1 – Схема лабораторной печи для получения карбида кремния

Использование микрокремнезема и рисовой шелухи в синтезе SiC

Для улучшения качества синтеза и повышения скорости реакции, сырьевые материалы проходят предварительную обработку. Микрокремнезем и рисовая шелуха подвергаются тщательному измельчению в планетарно-центробежных мельницах, что позволяет достичь необходимой степени дисперсности. Это улучшает контакт между частицами исходных материалов, ускоряет диффузионные процессы и повышает эффективность синтеза SiC.

В случае рисовой шелухи, процесс начинается с пиролиза – термической обработки при высоких температурах (около 900°C) в условиях отсутствия кислорода. В результате пиролиза органические вещества шелухи распадаются на углеродистые и кремнеземистые остатки, которые затем

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

используются в процессе восстановления кремния. Этот метод позволяет перерабатывать отходы сельского хозяйства, превращая их в полезное сырье для промышленности.

Результаты и обсуждение

Образцы проб SiC после полного охлаждения были извлечены из лабораторной печи для дальнейшего исследования. Образцы были рассмотрены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), для оценки морфологии, структуры и распределения компонентов карбида кремния, полученного из микрокремнезема с нефтекоксом и рисовой шелухой. Снимок СЭМ SiC из отходов показан на рисунке 2.

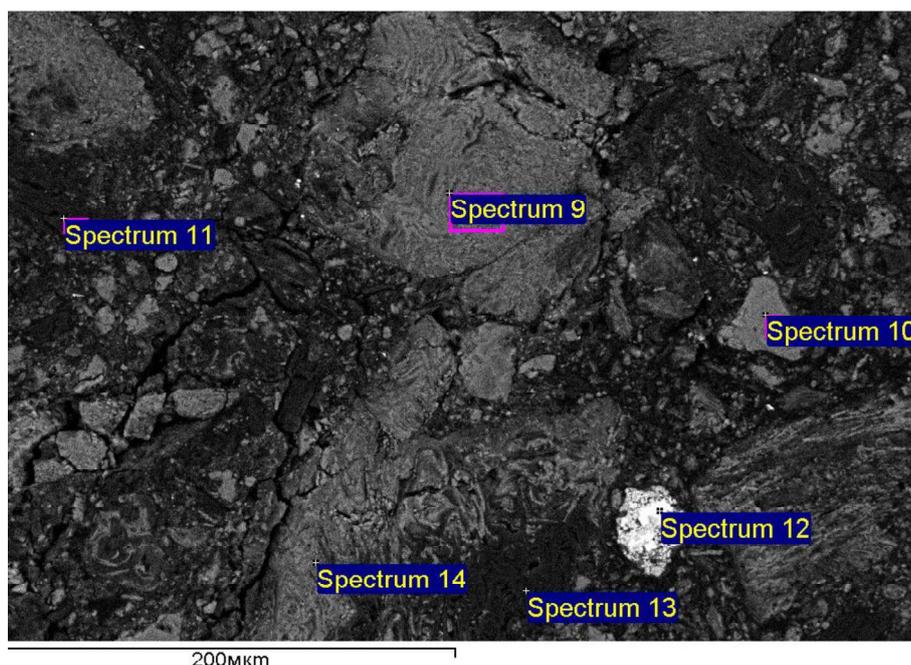


Рисунок 2 – СЭМ изображение морфологии частиц SiC
Результаты в весовых % представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты в весовых % SiC

Спектры	C	O	Al	Si	Ca	Ti	Cr	Fe
Спектр 9	51.5			48.5				
Спектр 10		45.1	2.8	49.9	2.2			
Спектр 11	97.0			3.0				
Спектр 12	14.1			12.9		2.7	2.1	68.3
Спектр 13	100.0							
Спектр 14	54.7			45.3				

СЭМ исследования помогли всесторонне оценить морфологические и структурные особенности карбида кремния, а также подтвердить его соответствие заявленным требованиям для дальнейшего применения в различных отраслях.

Синтез карбида кремния из микрокремнезема с нефтекоксом и рисовой шелухой - это интересный и перспективный подход, который может быть реализован в различных промышленных масштабах, особенно в контексте устойчивых и экологически безопасных технологий.

Использование микрокремнезема и рисовой шелухи в качестве альтернативных сырьевых материалов для синтеза карбида кремния представляет собой не только экономически выгодный, но и экологически устойчивый подход.

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

Выводы

Переработка этих отходов позволяет снизить экологическое воздействие производства, а также улучшить эффективность синтеза SiC, что открывает новые возможности для применения этих материалов в различных отраслях.

Дальнейшее совершенствование технологий переработки отходов и оптимизация процессов синтеза будут способствовать устойчивому развитию металлургической и других отраслей промышленности.

Список литературы

1. Лебедев А.С., В. Е. Еремяшев, А. В. Суздальцев, В. Н. Анфилогов. Упрочнение легких металлов и сплавов ультрадисперсным волокнистым карбидом кремния β -модификации // ЭлектроМеталлургия. – 2020 – № 1 – С. 17–24.
2. Семейко К.В., Малиновский А.И., Гребеньков А.Ж., Саенко С.Ю., Лобач К.В., Кустовская А.Д., Ляпощенко А.А., Склабинский В.И. // Разработки технологий получения карбида кремния (обзор) / Вестник НЯЦ РК 2021 - №2 – С. 30-41.
3. Andresen B. The metallurgical silicon process revisited // Silicon for the chemical and solar industry X: Proc. Intern. conf. (Alesund-Geiranger, 28 June-02 July 2010). Trondheim: NTNU, 2010. P. 11-23.
4. G. Akhmetova, G. Ulyeva, K. Tuyskhan, I. Volokitina. // Application of spark plasma sintering as a method for producing new ceramic materials from silicon production waste / Journal of Chemical Technology and Metallurgy – 2024 – Vol. 59, №3 – P. 605-611.
5. Rohani, A.B. Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk / A.B. Rohani, Y. Rosiyah, N.G. Seng // Procedia Chemistry. – 2016. –V. 19. – P. 189 – 195.

А.Г. Бурумбаев, Е.Н. Махамбетов, С.К. Кабылканов, А.М. Жақан

Техногендік және табиғи қалдықтарды кремний карбидін синтездеуде пайдалану: инновациялық көзқарастар, шешімдер және технологиялық аспектілер

Мақала кремний карбиді (SiC) синтезінде техногендік және табиғи қалдықтарды, атап айтқанда, микрокремнезем мен күріш қабығын пайдалануға арналған. Бұл материал түрлі салаларда сұранысқа ие негізгі материал болып табылады. SiC өндірісінің дәстүрлі және альтернативті әдістері қарастырылып, қалдықтарды қайта өңдеу арқылы экологиялық қауіпсіз және экономикалық тиімді технологиялар жасау мүмкіндіктері талқыланады. Синтез сапасын жақсарту үшін бастапқы материалдарды алдын ала өңдеу және реакцияны оңтайландыруға ерекше назар аударылған. Алынған нәтижелер қалдықтарды өнеркәсіпте қолданудың жоғары тиімділігі мен перспективасын көрсетіп, экологиялық жүктемені азайту мен металлургия саласының тұрақтылығын арттыруға ықпал етеді.

Түйінді сөздер: кремний карбиді, синтез, микрокремнезем, күріш қабығы, қалдықтарды қайта өңдеу, экология, металлургия, тұрақты технологиялар, абразивті материалдар, экологиялық қауіпсіздік.

A.G. Burumbaev, E.N. Makhambetov, S.K. Kabyllkanov, A.M. Zhakan

The use of man-made and natural waste in the synthesis of silicon carbide: innovative approaches, solutions and technological aspects

The article is devoted to the use of man-made and natural waste, such as silica and rice husk, in the synthesis of silicon carbide (SiC), a key material in demand in various industries. Traditional and alternative methods of SiC production are considered, including waste recycling to create

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

environmentally safe and cost-effective technologies. Special attention is paid to improving the quality of synthesis through pretreatment of the starting materials and optimization of the reaction. The results obtained show the high efficiency and promising use of waste in industry, which helps to reduce the environmental burden and increase the sustainability of the metallurgical industry.

Keywords: silicon carbide, synthesis, microsilicon, rice husk, waste recycling, ecology, metallurgy, sustainable technologies, abrasives, environmental safety.

References

- 1 Lebedev A.S., V. E. Eremyashev, A. V. Suzdaltsev, V. N. Anfilogov. Uprochnenie legkikh metallov i splavov ultradispersnym voloknistym karbidom kremniya β -modifikatsii // ElektroMetallurgiya. – 2020 – № 1 – S. 17–24.
- 2 Semeiko K.V., Malinovskiy A.I., Greben'kov A.Zh., Saenko S.Yu., Lobač K.V., Kustovskaya A.D., Lyaposhenko A.A., Sklabinskiy V.I. // Razrabotki tekhnologiy polucheniya karbida kremniya (obzor) / Vestnik NYATS RK 2021 - №2 – S. 30-41.
- 3 Andresen B. The metallurgical silicon process revisited // Silicon for the chemical and solar industry X: Proc. Intern. conf. (Alesund-Geiranger, 28 June-02 July 2010). Trondheim: NTNU, 2010. P. 11-23.
- 4 G. Akhmetova, G. Ulyeva, K. Tuyskhan, I. Volokitina. // Application of spark plasma sintering as a method for producing new ceramic materials from silicon production waste / Journal of Chemical Technology and Metallurgy – 2024 – Vol. 59, №3 – P. 605-611.
- 5 Rohani, A.B. Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk / A.B. Rohani, Y. Rosiyah, N.G. Seng // Procedia Chemistry. – 2016. –V. 19. – P. 189 – 195.