

химическая активность и антибактериальный эффект позволяют эффективно использовать ZnO в оптоэлектронике, биомедицине и экологических технологиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Özgür, Ü., Alivov, YI, Liu, C., Teke, A., Reshchikov, MA, Dogan, S., Avrutin, V., Cho, SJ, and Morkoç, H.. A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 98(4), 2005. – 041301.
2. Klingshirn, C. (2007). ZnO: From Fundamentals to Applications. *Physica Status Solidi (b)*, 244 (9), – P. 3027–3073.
3. See DC (2001). Recent advances in ZnO materials and devices. *Materials Science and Engineering: B*, 80(1–3). – P. 383–387.
4. Zhang, L., Jiang, Y., Ding, Y., Daskalakis, N., Jeuken, L., Povey, M., & O'Neill, AJ, & York, DW (2010). Mechanistic investigation of the antibacterial activity of ZnO nanoparticle suspensions against *E. coli*. *Journal of Nanoparticle Research*, 12 (5). – P. 1625-1636.
5. Janotti, A. and Van de Wall, CG (2009). Basics of zinc oxide as a semiconductor. *Progress Reports in Physics*, 72(12), 126501.
6. Wang, ZL (2004). Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 16(25). – P. 829–858.

УДК 669.053.4

Д.Б. Холикулов, д-р техн. наук, проф., зам. директора
по научной работе и инновациям;
И.И. Шайманов, докторант кафедры «Металлургия»;
Ш.Т. Хожиев, Ph.D., доц. кафедры «Металлургия»;
(Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического
университета им. Ислама Каримова, г. Алмалык, Узбекистан)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ АМОРФНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ИЗ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Диоксид кремния (SiO_2) на сегодняшний день является одним из важнейших материалов, широко используемых в различных отраслях промышленности. Его аморфная разновидность обладает высокими характеристиками и играет значительную роль в производстве электроники, оптики, резиновой техники, химической промышленности и строительных материалов. Разработка технологии получения аморфного диоксида кремния из металлургических отходов, содержащих кремний, в настоящее время считается актуальной задачей, так как

она одновременно связана с защитой окружающей среды, переработкой отходов и производством высококачественной продукции.

На сегодняшний день основную часть отходов, образующихся на промышленных предприятиях, составляют соединения кремния. Например, в отходах, образующихся в процессе металлургического производства (шлаки, шламы, хвосты, пыли и др.), содержится значительное количество диоксида кремния. Не переработка этих отходов приводит не только к потере экономических ресурсов, но и к экологическим проблемам. Поэтому переработка отходов, содержащих диоксид кремния, и разработка технологий получения из них ценного продукта – аморфного диоксида кремния – является одной из актуальных тем.

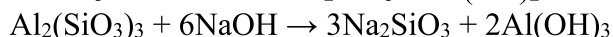
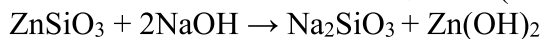
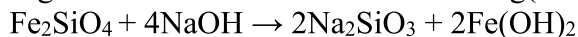
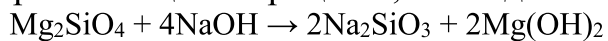
В последние годы исследования по извлечению соединений кремния из металлургических отходов получили широкое распространение. Из-за экологической и экономической значимости переработки металлургических отходов данная технология остается в центре внимания исследователей. Анализ литературы показывает, что высокая концентрация диоксида кремния в отходах образуется в результате промышленных процессов, и для их переработки применяются различные металлургические методы (обжиг, плавка, селективное плавление, обогащение, нейтрализация и др.).

В некоторых источниках предложены методы извлечения диоксида кремния путем сублимации кремния в виде соединений [1]. Вместе с тем, многие исследователи уделяют внимание переработке отходов, содержащих кремний, с использованием гидротермальных методов. В частности, гидротермальные процессы позволяют выделять аморфный диоксид кремния в высокой степени чистоты [2–3]. Кроме того, технологии плазменной переработки обеспечивают высокую степень очистки диоксида кремния [4].

В настоящее время переработка металлургических отходов, содержащих кремний, на территории Узбекистана связана с рядом сложностей. Основная причина заключается в том, что помимо диоксида кремния в составе металлургических отходов присутствуют железо, алюминий, оксиды кальция и другие примеси, которые в процессе металлургического производства образуют соединения с диоксидом кремния. Эти отходы обладают высокой химической стойкостью, что затрудняет их растворение или переработку в реакционной среде.

Для переработки металлургических отходов, содержащих кремний, требуется использование высоких температур, давления или специальных реагентов, что увеличивает энергетические и экономические затраты. Кроме того, в процессе переработки существует вероятность образования вредных газов и твердых отходов, что требует принятия мер по обеспечению экологической безопасности.

Предлагаемая технология основана на переработке кремния, содержащегося в металлургических отходах, с использованием гидроксида натрия (NaOH). В этом процессе сложные соединения кремния с другими металлами разрушаются, и кремний переводится в растворимую в воде форму – натриевый силикат (Na₂SiO₃). Химические реакции, протекающие в процессе, выглядят следующим образом:



В дальнейшем полученный водный раствор натриевого силиката перерабатывается с использованием специальных процессов. В результате переработки из натриевого силиката выделяется аморфный диоксид кремния (SiO₂). Данная технология позволяет преобразовать диоксид кремния из отходов в полезный продукт, повышая экономическую эффективность и снижая вредное воздействие на окружающую среду.

Анализ литературы показывает, что технология переработки металлургических отходов, содержащих диоксид кремния, с использованием гидроксида натрия имеет определённые преимущества перед сублимационной технологией. Например, процесс обработки гидроксидом натрия может осуществляться при более низких температурах, что значительно снижает энергозатраты [5]. Кроме того, в процессе переработки с использованием гидроксида натрия образуется меньше загрязняющих веществ, а воздействие на окружающую среду минимизируется [6]. Несмотря на преимущества сублимационной технологии, её применение ограничивается высоким требованием к температурным условиям и технологической сложностью [7].

В заключение следует отметить, что технология переработки металлургических отходов, содержащих диоксид кремния, с использованием гидроксида натрия (NaOH) обладает высокой эффективностью, экологической безопасностью и экономическими преимуществами. Данная технология позволяет в процессе переработки отходов выделять водорастворимый натриевый силикат, из которого впоследствии можно получить аморфный диоксид кремния. Метод обработки гидроксидом натрия отличается более низкими энергозатратами и повышенной экологической безопасностью технологического процесса по сравнению с сублимационной технологией. Сублимационный метод требует высоких температур, что увеличивает энергозатраты, а также сопровождается значительными выбросами в атмосферу.

Однако у технологии переработки с использованием гидроксида натрия также есть некоторые недостатки. Процесс создает коррозион-

ную среду, что может привести к износу металлического оборудования, увеличивая затраты на внедрение и эксплуатацию технологии. Кроме того, необходимость утилизации больших объемов используемого гидроксида натрия и побочных продуктов усложняет процесс.

Сублимационная технология, хотя и эффективна для получения высокочистого кремния, не получила широкого применения из-за высокой энергоемкости и экологических проблем. Поэтому метод переработки с использованием гидроксида натрия рассматривается как технологическая альтернатива, объединяющая экологическую безопасность и экономическую эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Uhlmann, D. R., Kreidl, N. J. Sublimation of silicon compounds in silica extraction processes // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 1980. – Т. 42, № 2. – С. 131–146.
2. Byrappa, K., Yoshimura, M. *Handbook of Hydrothermal Technology: A Technology for Crystal Growth and Materials Processing*. – New York: William Andrew Publishing, 2001. – 772 с.
3. Iler, R. K. *The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry*. – New York: Wiley-Interscience, 1979. – 896 с.
4. Andrievski, R. A. Plasma-chemical synthesis and processing of high-purity materials // *Materials Science and Engineering: A*. – 2003. – Т. 356, № 1–2. – С. 1–18.
5. Hassan, M., et al. Chemical processes for silicon extraction from metallurgical waste // *Journal of Environmental Chemistry and Engineering*. – 2018. – Т. 6, № 1. – С. 102–112.
6. Lee, S., et al. Environmental impact and efficiency of silicon extraction methods // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2020. – Т. 3, № 1. – С. 89–95.
7. Gupta, P., et al. Sublimation and its applications in metal extraction // *Minerals Engineering*. – 2014. – Т. 62. – С. 13–21.