

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЙ МЕТОД ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

А.Р. Ризун, Т.Д. Денисюк, В.Ю. Кононов, А.Н. Рачков

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, dpcd@iipr.com.ua*

Предложен новый способ селективной электроразрядной дезинтеграции металлургического кремния, обеспечивающий его измельчение на фракции, необходимые для производства чистого кремния.

УДК 537.525:622.73+669.78

ВВЕДЕНИЕ

В качестве альтернативного источника энергии в большинстве высокоразвитых стран мира значительное место отводится развитию солнечной энергетики. Наиболее перспективным видом преобразования солнечной энергии в электрическую являются фотоэлектрические элементы на основе кремния. Главным препятствием на пути их широкого внедрения в настоящее время является высокая стоимость кремния [1].

Процесс производства кремния включает в себя несколько стадий дезинтеграции: разрушение и дробление кремнеземов природного происхождения; дробление и измельчение металлургического кремния; дробление поликристаллического кремния. По существующим технологиям дробление и измельчение осуществляют в валковых, стержневых и шаровых мельницах, для которых характерно неуправляемое измельчение, при котором значительное количество материала переизмельчается, загрязняется аппаратным металлом и становится непригодным для использования в дальнейших технологических процессах получения кремния высокой чистоты.

Результаты ранее проведенных в ИИПТ исследований по разрушению, дроблению и измельчению природного и искусственного минерального сырья показали, что высоковольтные импульсные электроразрядные технологии дезинтеграции имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными механическими технологиями [2, 3].

Объект исследования – металлургический кремний, имеющий высокую прочность, по шкале классификации пород относящийся ко второй группе – очень прочные породы с максимальным пределом прочности на сжатие от 100 до 150 МПа, со сложной анизотропной структурой за счет неоднородности строения.

Цель работы – определение возможности использования высоковольтных импульсных электроразрядов для измельчения металлургического кремния.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- определены параметры электроразрядного нагружения, позволяющие получить тонкую дезинтеграцию металлургического кремния;
- определена оптимальная конструкция дезинтегратора для реализации процесса электроразрядного измельчения металлургического кремния;
- исследованы фракционный состав дезинтегрированного металлургического кремния и его пригодность для производства чистого кремния.

Для определения эффективных параметров электроразрядов, необходимых для дезинтеграции металлургического кремния, в каждом конкретном случае определялись его прочностные характеристики. Поскольку металлургический кремний имеет сложную анизотропную структуру, предел прочности на сжатие определен экспериментально при динамическом нагружении образцов металлургического кремния на стационарном стенде с помощью метода разрезного стержня Гопкинсона-Кольского по методике, изложенной в работе [4]. Согласно измерениям, предел прочности на сжатие ($\sigma_{сж}$) исследуемого металлургического кремния составил 142 МПа, предел прочности на растяжение ($\sigma_{раст}$) – 8,5 МПа.

Материал, обрабатываемый электроразрядами с целью дезинтеграции, сконцентрированный в поле давлений, достаточных для его разрушения, испытывает следующие деформирующие нагрузки:

- раздавливание при превышении напряжениями предела прочности на сжатие;
- раскалывание, наступающее в результате расклинивания трещин давлением жидкости, доводящим их до критического состояния;

- разрыв при превышении напряжениями предела прочности на растяжение создается в основном отраженной волной;
- излом в результате изгиба;
- истирание, возникающее в результате сдвига и среза.

Экспериментально определены необходимые условия для эффективного электроразрядного дробления и измельчения металлургического кремния, а именно:

- величина давления волны сжатия в пределах объема дезинтегратора не должна быть выше прочности стенок дезинтегратора;
- в свою очередь предел прочности материала на растяжение $\sigma_{\text{раст}}$ не должен превышать давление волн сжатия, то есть:

$$P_{\text{в.сж.}} \geq \sigma_{\text{раст.}} \quad (1)$$

или

$$P_{\text{в.сж.}} = k\sigma_{\text{раст.}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{в.сж.}}$ – давление волны сжатия, МПа; $\sigma_{\text{раст.}}$ – предел прочности на растяжение, МПа; k – безразмерный коэффициент пропорциональности, определяющий отношение давления волн сжатия к пределу прочности материала на разрыв, установлен экспериментально и равен для металлургического кремния 1,2.

Амплитуда давления в канале разряда связана с электрическими параметрами и определяется следующим выражением [5]:

$$P_k = 0,17 \cdot \left(\frac{\rho \cdot U_0^2}{L \cdot l_{\text{pn}}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где P_k – давление в канале разряда, МПа; ρ – плотность разрядной среды (вода + кремний в соотношении 9:1), кг/м³; U_0 – напряжение на обкладках конденсатора, кВ; L – индуктивность разрядного контура, мкГн; l_{pn} – величина разрядного промежутка, м.

Под действием давления P_k образуется волна сжатия, фронт которой в момент распространения отдаляется от канала разряда. Амплитуда P_k снижается пропорционально квадратному корню расстояния до канала разряда, то есть давление на фронте волны сжатия можно представить следующим образом:

$$P_{\text{в.сж.}} = P_k \cdot \sqrt{\frac{a_m}{r}}, \quad (4)$$

где a_m – фиксированный радиус канала разряда в момент отрыва волны сжатия не превышает 0,001 м [6]; r – расстояние от фронта волны сжатия до канала разряда, м.

Тогда:

$$P_{\text{в.сж.}} = 0,17 \cdot \left(\frac{\rho_0 \cdot U_0^2}{L \cdot l_{\text{pn}}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{a_m}{r} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Учитывая необходимые условия электроразрядной дезинтеграции (1), выражение (5) можно представить в следующем виде:

$$P_{\text{в.сж.}} = 0,17 \cdot \left(\frac{\rho_0 \cdot U_0^2}{L \cdot l_{\text{pn}}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{a_m}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \geq \sigma_{\text{раст.}} \quad (6)$$

Используя выражения (2), (4), (6), получим выражение:

$$P_{\text{в.сж.}} = 0,005 \left(\frac{\rho U_0^2}{L \cdot l_{\text{pn}} \cdot r} \right)^{\frac{1}{2}} = k\sigma_{\text{раст.}} \quad (7)$$

Для электроразрядной дезинтеграции высокопрочных материалов использованы следующие параметры электроразряда:

- напряжение разрядного контура $U_0 = 50$ кВ;
- индуктивность лабораторного устройства $L = 6 \cdot 10^{-6}$ Гн;
- величина разрядного промежутка l_{pn} и плотность разрядной среды ρ устанавливались экспериментально для достижения максимальной амплитуды давления в канале разряда.

Расчетным путем по формуле (7) определена форма волны сжатия в зависимости от расстояния до канала разряда (рис. 1).

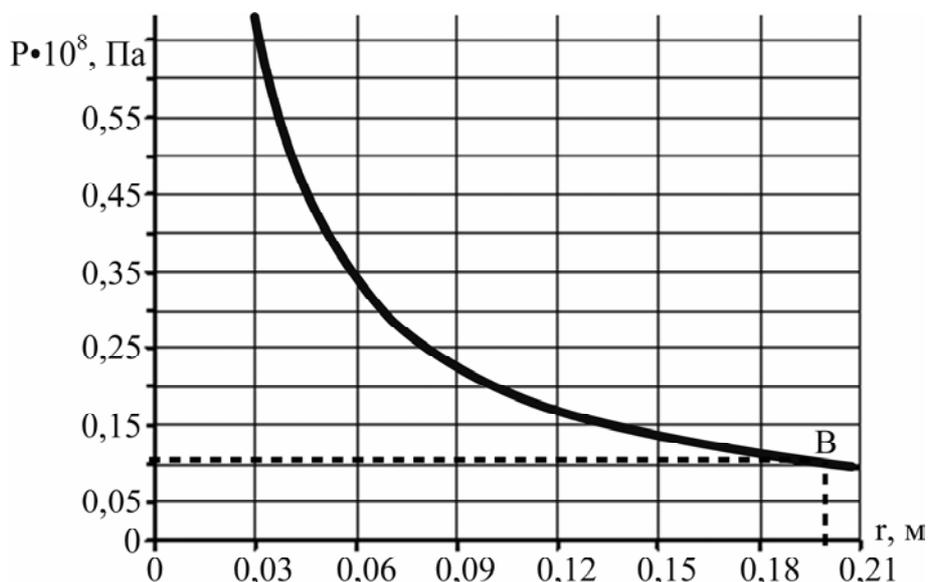


Рис. 1. Зависимость давления на фронте волны сжатия от расстояния до канала разряда

Точка В определяет максимальную величину радиуса дезинтегратора, исходя из соотношения (2). Для выполнения данного условия радиус электроразрядного дезинтегратора металлургического кремния не должен превышать 0,2 м.

С учетом этого на изготовленном дезинтеграторе проведено несколько серий опытов электроразрядного дробления и измельчения кусков металлургического кремния начальных размеров от 30 до 50 мм. Выходная фракция контролировалась размерами щелей классификатора и величиной удельных затрат энергии. Управляя процессом дезинтеграции посредством изменения величин этих двух характеристик, достигнут максимальный выход годного продукта (измельченного кремния с фракционным составом, необходимым для дальнейших операций производства чистого поли- и монокристаллического кремния, без переизмельчения) относительно объема загрузки. На рис. 2 показана зависимость фракционного состава измельченного металлургического кремния от удельных затрат энергии при использовании классификатора с размером щелей от 2 мм и ниже.

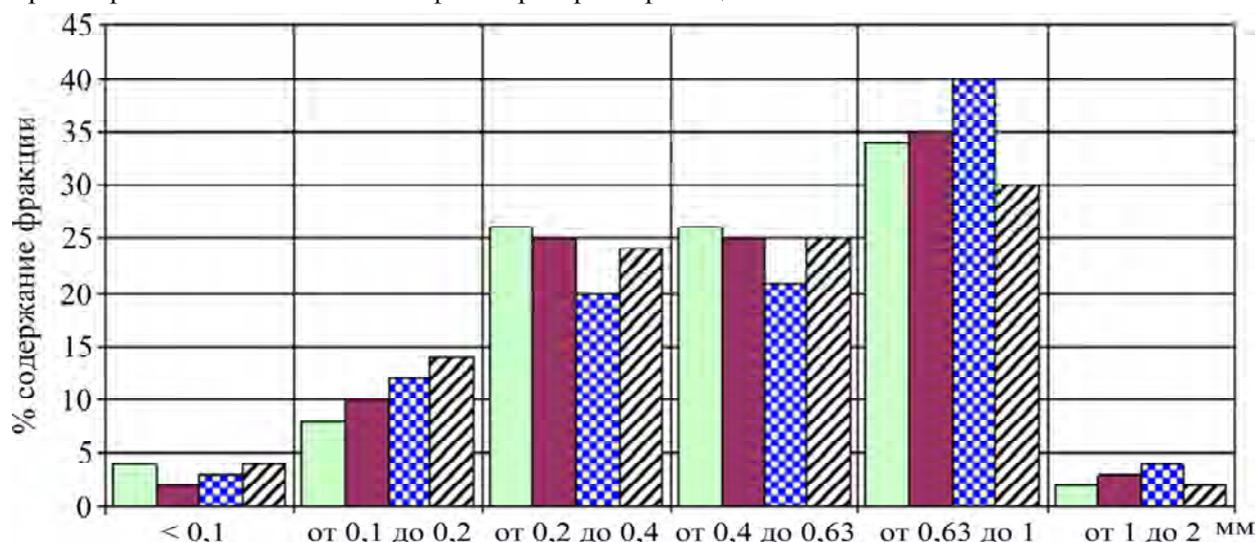


Рис. 2. Фракционный состав кремния после электроразрядной обработки в зависимости от энергии в импульсе

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований определена принципиальная возможность применения электроразряда как способа селективной дезинтеграции металлургического кремния на фракции, необходимые для последующих технологических операций. Определены размеры дезинтегратора, обеспечивающего при использовании щелевого классификатора и изменении удельных затрат энергии измельчение металлургического кремния на фракции, необходимые для производства чистого кремния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райский В. Кремний для солнечных батарей. Энергетика и промышленность России. <http://www.eprussia.ru/>
2. Ризун А.Р., Косенков В.М. К вопросу об определении производительности электроразрядного разрушения хрупких неметаллических материалов. *Электронная обработка материалов*. 2001, **37**(1), 45–50.
3. Ризун А.Р., Цуркин В.Н. Электроразрядное разрушение неметаллических материалов. *Электронная обработка материалов*. 2002, **38**(1), 83–85.
4. Kosenkov V.M. and Rizun A.R. Characterization of the Pulse Destruction of Black Coal Using the Kolsky Method. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011, **47**(2), 189–195.
5. Кривицкий Е.В. *Динамика электровзрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
6. Жекул В.Г. *Экспериментальные исследования начальных характеристик канальной стадии разряда в воде. Подводный электровзрыв: Сб. науч. тр.* Киев: Наукова думка, 1985. 3–7.

Поступила 05.12.11

Summary

A new route to selective electrical discharge decomposition of metallurgical silicon is proposed that ensures its grinding to fractions required in order to make pure silicon.
