

УДК 669.168.3

## Современное состояние производства кремния и ферросилиция в России и за рубежом

© А.А. Тютрин, А.Д. Горохов, Я.О. Копылова

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

В работе рассмотрены вопросы мирового производства и потребления кристаллического кремния и ферросилиция. Общий объем производства ферросилиция в России за 2016 г. составил 570,8 тыс. т. И в России, и за рубежом большая часть ферросилиция используется для производства стали. Ведущими странами по производству ферросилиция являются Китай, Россия и Норвегия, по производству металлического кремния – Китай, Норвегия и Бразилия. Ожидается, что мировое потребление ферросилиция будет точно соответствовать тенденциям производства стали. Потребление же металлургического кремния, используемого в основном в алюминиевой и химической промышленности, будет расти в связи с его применением в солнечных фотоэлектрических модулях.

*Ключевые слова:* кремний, ферросилиций, производство, потребление, мировой рынок

## Current State of Silicon Production and Ferrosilicon in Russia and Abroad

© Andrey A. Tyutrin, Andrey D. Gorokhov, Yana O. Kopylova

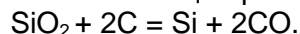
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

The article considers the issues of world production and consumption of crystalline silicon and ferrosilicon. The total production of ferrosilicon in Russia in 2016 amounted to 570.8 thousand tons. Both in Russia and abroad, most of the ferrosilicon is used for steel production. The leading countries for the production of ferrosilicon are China, Russia and Norway, for the production of metallic silicon are China, Norway and Brazil. Global ferrosilicon consumption is expected to closely match steel production trends. The consumption of metallurgical silicon, used mainly in the aluminum and chemical industries, will increase due to its use in solar photovoltaic modules.

*Keywords:* silicon, ferrosilicon, production, consumption, world market

Кремний является легким химическим элементом с металлическими и неметаллическими свойствами. Кремний редко встречается в природе в свободном состоянии, в основном он соединяется с кислородом и другими элементами, образуя силикаты, которые составляют более 90% земной коры [1]. Кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ) в виде кварца или кварцита используется для производства кремниевых ферросплавов в черной металлургии и металлургического кремния в алюминиевой и химической промышленности. Металлургический кремний может быть далее переработан в полупроводниковые или солнечные сорта сверхвысокой чистоты, которые содержат более 99,9% кремния.

Для выплавки кремния и его сплавов используют руднотермические печи (РТП) различных конструкций и мощности, работающие на самоспекающихся и угольных электродах. Шихта для производства металлургического кремния состоит из кварцита и восстановителя, для производства ферросилиция также добавляется железная стружка. Процесс получения кремния и ферросилиция может быть описан общей реакцией [2–4]:



Однако восстановление кремния углеродом – многостадийный сложный процесс, сопровождающийся образованием карборунда по реакции:  $\text{SiO}_2 + 3\text{C} = \text{SiC} + 2\text{CO}$ , и газообразного монооксида –  $\text{SiO}_2 + \text{C} = \text{SiO} + \text{CO}$ .

Производство металлургического кремния в России представлено двумя предприятиями общей производительностью 69 тыс. т/год [5]. Первая в нашей стране печь для выплавки кремния – двухэлектродная однофазная электропечь мощностью 5,5 МВ·А – появилась в 1938 г. и действует в настоящее время на предприятии «Кремний-Урал» объединенной компании «РУСАЛ» (г. Каменск-Уральский, Свердловская обл.). Производимый на предприятии кремний (около 27 тыс. т/год [5]) реализуется практически полностью в алюминиевой промышленности. Крупнейшим в России предприятием по производству металлургического

кремния является АО «Кремний» объединенной компании «РУСАЛ» (г. Шелехов, Иркутская обл.) с годовой производительностью 42 тыс. т кремния [5]. Предприятие оснащено трехфазными руднотермическими печами мощностью 16,5 и 25 МВ·А, работающими на переменном токе [1, 6]. Получаемый в печах кремний подвергается операции окислительного рафинирования в ковше, которая направлена на снижение содержания в нем основных примесей (Al, Ca, Ti), а также удаление включений шлака [7]. Основными потребителями продукции являются алюминиевая и химическая промышленность, а также производимый рафинированный кремний является сырьем для производства полупроводникового и «солнечного» кремния.

Для производства ферросилиция применяют круглые РТП с вращающейся ванной печи, в последнее время – закрытые печи мощностью 16,5–39 и даже 75 МВ·А [2]. Основными производителями ферросилиция являются: АО «Кузнецкие ферросплавы» (КФ) – г. Новокузнецк Кемеровской обл., АО «Челябинский электрометаллургический комбинат» (ЧЭМК) – г. Челябинск, ООО «Братский завод ферросплавов» (БЗФ) – г. Братск Иркутской обл., ООО «Серовский завод ферросплавов» (СЗФ) – г. Серов Свердловской обл., ОСП «Юргинский ферросплавный завод» (ЮЗФ) филиал АО «Кузнецкие ферросплавы» – г. Юрга Кемеровской обл. Общий объем производства ферросилиция в России за 2016 г. составил 570,8 тыс. т (рис. 1) [8]. Большая часть ферросилиция используется для производства стали в России и за рубежом (Нидерланды, Япония, Южная Корея, Турция) (рис. 2, 3).

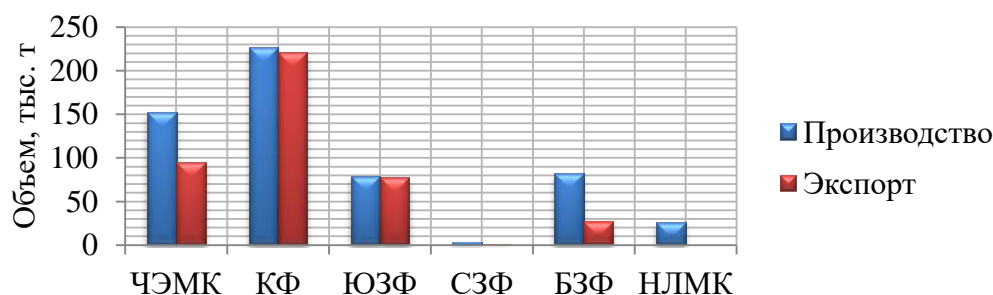


Рис. 1. Производство и экспорт ферросилиция России (данные за 2016 г.)

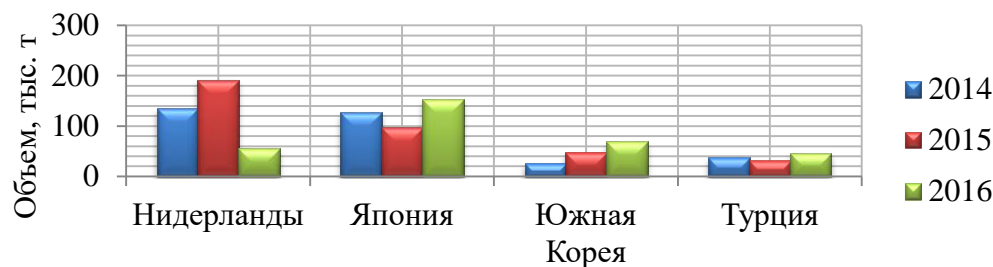


Рис. 2. Экспорт ферросилиция из России по странам

Ведущими странами по производству ферросилиция являются Китай, Россия и Норвегия, металлического кремния – Китай, Норвегия и Бразилия (рис. 3, 4). В Китае насчитывается около 200 отдельных производителей кремния и 1000 производителей ферросилиция с общей производственной мощностью около 4 млн [9]. Таким образом, на долю китайских предприятий приходится почти 60% всего произведенного ферросилиция. В Китае производство ферросилиция сосредоточено в северо-западной и юго-западной частях страны: на эти регионы приходится 80–90% произведенной продукции. Общей тенденцией китайской ферросплавной отрасли является консолидация и укрупнение предприятий. В настоящее время наиболее крупными производителями ферросилиция в Китае являются Erdos Metallurgy Group (мощность 50 тыс. т ферросилиция), Dragon Northwest Ferroalloy Company (25 тыс. т), Qinghai Wutong Group (20 тыс. т), Qinghai Huadian Ferroalloy Company (15 тыс. т), Ningxia Jinjing Metallurgicals and Minerals (14 тыс. т).

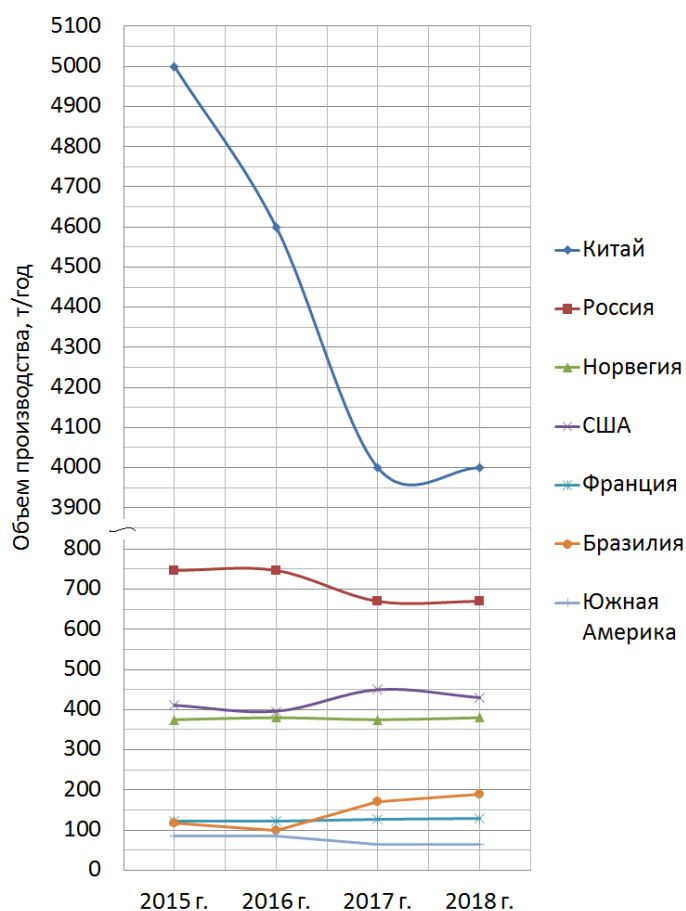


Рис. 3. Мировое производство кремния и ферросилиция по странам за 2015–2018 гг. [10]

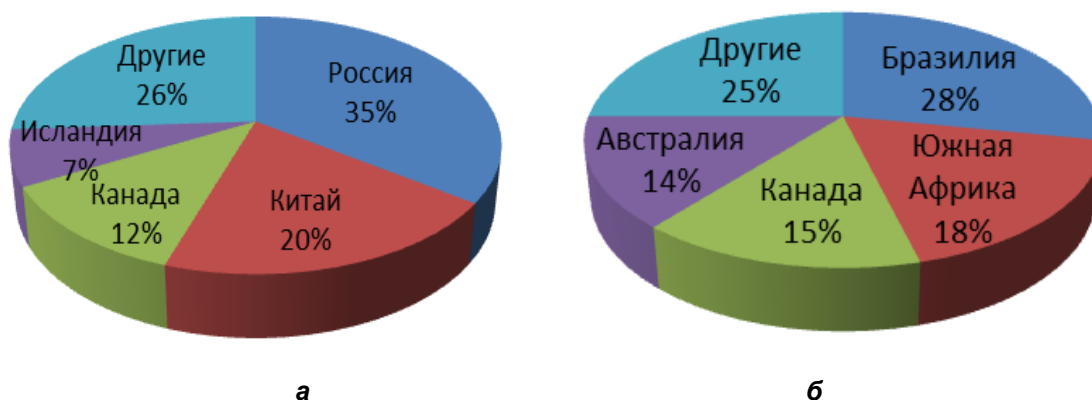


Рис. 4. Мировой импорт ферросилиция (а) и кремния (б)

В США в настоящее время ферросилиций выпускают два предприятия, одним из которых является Globe Speciality Metals, имеющее штаб-квартиру в Майами, производит ферросилиций на 4 заводах, расположенных в Огайо, Западной Вирджинии, Алабаме и штате Нью-Йорк. После приобретения в 2013 г. Silicon Technology Ltd компания увеличила мощность производства ферросилиция на 30% (до 120 тыс. т.). Второй производитель ферросилиция в Соединенных Штатах – SS Metals and Alloys, имеющий мощность 100 тыс. т в год, расположен в г. Калверте, штат Кентукки. В Норвегии выпуск ферросилиция осуществляют Elkem Foundry Producers, Finnjord, Fesil. Заводы компании Elkem расположены в Норвегии (Bjolvefossen и Bremanger), Канаде, Китае и Исландии. Производство ферросилиция компанией Finnjord (мощность 100 тыс. т в год) считается наиболее энергоэффективным [9].

Основное применение кремния в мире (почти 80%) остается традиционным – он служит лигатурой при производстве специальных сталей (электротехнических, жаростойких,

конструкционных, коррозионно-стойких и др.) и различных сплавов (силумины, кремнистые бронзы и т.д.) [10]. Значительная часть кремния и его сплавов применяется в алюминиевой промышленности для производства силуминов. Кремний используют для производства карбида кремния (карбидокремниевые огнеупоры, абразивы на основе карбида кремния). Также кремний используется для производства широкого спектра кремнийорганических соединений. Все более увеличивается применение чистого кремния и его соединений в химической промышленности – прирост составляет около 8% прироста в год. Одна из перспективных областей применения кремния – его использование в качестве основы целого ряда полупроводников – от солнечных батарей до компьютерных процессоров. Тоннаж мирового производства высокочистого полупроводникового кремния увеличивается на протяжении уже несколько десятилетий со средними темпами до 20% в год и аналогов среди других редких металлов не имеет. Однако общее количество производимого в мире высокочистого кремния только недавно превысило 20 тыс. т в год. По тоннажу это только 5% мирового производства технического кремния и около 0,2% производства ферросплавов на его основе [11].

Более 75% металлического кремния, потребляемого в США, использовалось для производства химических веществ, таких как силаны, силиконы и другие. Ферросилиций может заменить карбид кремния металлургического качества, особенно в литейных цехах. В 2015 г. в США видимое потребление кремниевых материалов (ферросилиций, прочие кремниевые сплавы и металлургический кремний) составило 661000 т. По оценкам CRU International Ltd., глобальное видимое потребление ферросилиция в 2015 г. сократилось приблизительно на 17% – до 4,61 млн т (с содержанием кремния) с 5,54 млн т в 2014 г. Предполагаемое потребление металлургического кремния, согласно оценкам, увеличилось примерно на 3% – до 2,49 млн т в 2015 г. с 2,42 млн т в 2014 году. Страной с наибольшим годовым снижением видимого потребления ферросилиция в тоннаже является Китай (28%). Даже при таком снижении на Китай приходилось 53% мирового видимого потребления ферросилиция в 2015 г. И, наоборот, в Китае наблюдалось самое большое в годовом исчислении увеличение видимого потребления металлургического кремния с точки зрения тоннажа – на 12%, и на его долю приходилось 33% мирового объема [12, 13].

Таким образом, ожидается, что мировое потребление ферросилиция будет точно соответствовать тенденции производства стали. Металлургический кремний потребляется в основном алюминиевой и химической промышленностью. По оценкам Ferroglobe, мировое потребление металлического кремния будет разделено между рынками силикона (50%), алюминия (40%) и солнечной энергии (10%) [14]. Потребление поликристаллического кремния преимущественно приходится на конечное использование солнечного (90%) и полупроводникового (10%) [15]. В течение следующих нескольких лет ожидается дальнейший рост мирового спроса на солнечную энергию, и, по оценкам специалистов, глобальные производственные мощности по производству поликристаллических кристаллов возрастут на 5% – с 289 000 т в год в 2015 г. до 304 800 т в год в 2016 г. [16, 17].

#### Библиографический список

1. Немчинова Н.В., Клёц В.Э. Кремний: свойства, получение, применение: учеб. пособие. Иркутск, 2008. 272 с.
2. Гасик М.И., Гасик М.М. Электротермия кремния. Днепропетровск: Изд-во Национальной металлургической академии Украины, 2011. 487 с.
3. Ringdalen E., Tangstad M. Reaction Mechanisms in Carbothermic Production of Silicon, Study of Selected Reactions // The Minerals, Metals & Materials Society (TMS). 2012. P. 195–203.
4. Vangskåsen J. Metal-producing Mechanisms in the Carbothermic Silicon Process, NTNU-Trondheim, 2012.
5. ОК РУСАЛ. URL: [www.rusal.ru](http://www.rusal.ru) (23.04.2019).
6. Технология выплавки технического кремния / под ред. О.М. Каткова. Иркутск: Кремний, 1999. 244 с.
7. Немчинова Н.В., Тютрин А.А. Кислотно-ультразвуковое рафинирование кремния: монография. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2017. 160 с.
8. Ферросплавы Восточной Европы 2017 // Справочно-информационные карты компании «Бренд Сервис. Специальные проекты».
9. Minerals Yearbook – 2016: Silicon // U.S. Geological Survey, 2018.
10. Mineral commodity summaries – 2019 // U.S. Geological Survey, 2019, 200 p.

11. Информационное агентство Metaltorg. URL: [www.metaltorg.ru/analytics/color/?id=196](http://www.metaltorg.ru/analytics/color/?id=196) (23.04.2019).
12. CRU Bulk Ferroalloys Monitor, 2016a, Ferrosilicon–Ferrosilicon supply/demand balance: CRU Bulk Ferroalloys Monitor, May.
13. CRU Bulk Ferroalloys Monitor, 2015b, Silicon metal–Silicon metal supply/demand balance: CRU Bulk Ferroalloys Monitor, May.
14. Ferroglobe PLC, 2016, Ferroglobe–Investor presentation: London, United Kingdom, Ferroglobe PLC, May 9, 35 p.
15. GTM Research, 2014, Polysilicon 2015–2018–Supply, demand, cost and pricing: Boston, MA, GTM Research, October. URL: <https://www.greentechmedia.com/research/report/polysilicon-2015-2018> (23.04.2019).
16. PR Newswire, 2016, Polysilicon market by end-use industry and electronics, and region–Global forecast to 2021: New York, NY, PR Newswire, October 25. URL: <http://www.prnewswire.com/news-releases/polysilicon-market-by-end-use-industry-and-electronics-and-region---global-forecast-to-2021-300351307.html> (23.04.2019).
17. REC Silicon ASA, 2016, REC Silicon–Fourth quarter 2015 presentation: Moses Lake, WA, REC Silicon ASA, February 12, 39 p. URL: <http://www.recsilicon.com/downloads/corporate-downloads?category=all&year=2016> (23.04.2019).

### Сведения об авторах / Information about the Authors

**Тютрин Андрей Александрович,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры металлургии цветных металлов,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: [an.tu@inbox.ru](mailto:an.tu@inbox.ru)

**Andrey A. Tyutrin,**

Cand. Sci. (Technics),  
Associate Professor, Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: [an.tu@inbox.ru](mailto:an.tu@inbox.ru)

**Горохов Андрей Дмитриевич,**

магистрант,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: [gorokhov-95@list.ru](mailto:gorokhov-95@list.ru)

**Andrey D. Gorokhov,**

Undergraduate,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: [gorokhov-95@list.ru](mailto:gorokhov-95@list.ru)

**Копылова Яна Олеговна,**

студентка группы МЦб-15-1,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: [yana.kopylova00@yandex.ru](mailto:yana.kopylova00@yandex.ru)

**Yana O. Kopylova,**

Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: [yana.kopylova00@yandex.ru](mailto:yana.kopylova00@yandex.ru)