

36. Isaeva L. A., Mikhalev Y. G., Zharinova N. Y. Dynamics of formation and properties of cryolite-aluminous crusts. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 8. pp. 56–61. DOI: 10.17580/tsm.2020.08.07.
37. Non-destructive testing systems: how they help to produce products in continuous machine operation. Available at: <https://habr.com/ru/company/severstal/blog/567516/> (Accessed: 15.01.2023).
38. Gusberti V., Severo D. S., Welch B. J., Skyllas-Kazacos M. Modelling the aluminium smelting cell mass and energy balance – a tool based on the 1st law of thermodynamics.
39. Kashin D. A., Kulchitskiy A. A. Image-based quality monitoring of metallurgical briquettes. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 9. pp. 92–98. DOI: 10.17580/tsm.2022.09.13.
40. Chen L. C., Papandreou G., Kokkinos I., Murphy K., Yuille A. L. DeepLab: semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2018. Vol. 40. pp. 834–848. DOI: 10.1109/tpami.2017.2699184.
41. Zakharov L., Martynushev D., Ponomareva I. N. Predicting dynamic formation pressure using artificial intelligence methods. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 253. pp. 23–32. DOI: 10.31897/pmi.2022.11.
42. Boikov A., Payor V., Savelev R., Kolesnikov A. Synthetic data generation for steel defect detection and classification using deep learning. *Symmetry*. 2021. Vol. 13. DOI: 10.3390/sym13071176.
43. Vasilyeva N. V., Boikov A. V., Erokhina O. O., Trifonov A. Y. Automated digitization of radial charts. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 247. pp. 82–87. DOI: 10.31897/pmi.2021.1.9.
44. Pshenin V., Liagova A., Razin A., Skorobogatov A., Komarovskiy M. Robot Crawler for surveying pipelines and metal structures of complex spatial configuration. *Infrastructures*. 2022. Vol. 7. p. 75. DOI: 10.3390/infrastructures7060075.
45. Chen C., Chen Q., Xu J., Koltun V. Learning to See in the Dark. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018. pp. 3291–3300. DOI: 10.1109/cvpr.2018.00347.
46. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2016. pp. 770–778. DOI: 10.1109/cvpr.2016.90.
47. Zhao S., Xie Y., Yue W., Chen X. A machine learning method for state identification of superheat degree with flame interference. *Minerals, Metals and Materials Series*. 2019. pp. 199–208. DOI: 10.1007/978-3-030-05955-2_19.
48. Töreyn B. U., Çetin A. E. Online detection of fire in video. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2007. DOI: 10.1109/cvpr.2007.383442.
49. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*. 2017. Vol. 60. pp. 84–90. DOI: 10.1145/3065386.
50. Paszke A., Gross S., Massa F., Lerer A., Bradbury J. et al. An imperative style, high-performance deep learning library. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2019. Vol. 32. pp. 8024–8035.

Автоматизированный контроль и управление балансом шихты при производстве металлургического кремния

УДК 681.518.5



В. Ю. Бажин,
заведующий кафедрой
металлургии,
профессор,
докт. техн. наук,
эл. почта:
bazhin_vyu@pers.spmi.ru



О. Н. Масько,
аспирант кафедры
автоматизации
технологических процессов
и производств (АТПП),
эл. почта:
olgamasko.17@gmail.com



С. А. Мартынов,
ассистент
кафедры АТПП,
канд. техн. наук,
эл. почта:
direktor062@mail.ru

Санкт-Петербургский горный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Производство металлургического кремния для Si-сплавов и силуминов является стратегическим и определяет развитие многих отраслей отечественной промышленности. Основной задачей ресурсосбережения при производстве кремния является снижение массы технического кремнезема, находящегося в расходной части баланса. В современных условиях разработка системы контроля и управления балансом шихты на основе кварца в производстве металлургического кремния необходима для решения проблем, связанных с использованием разных источников сырья при различном содержании примесей, снижающих энергетическую эффективность плавки и качество производимого кремния. В основе предлагаемой системы лежат математические расчеты и модели, разработанные с учетом физико-химических, полиморфных превращений кварцевого сырья во время плавки в рудно-термической печи. В работе использованы полученные ранее зависимости объема и характера выбросов микрокремнезема от химического и гранулометрического состава, строения кварцевого сырья, температуры ведения плавки. Для получения новых данных о пылегазовых выбросах была использована CFD-модель газоотводящего тракта печи. В результате разработан алгоритм системы, позволяющий анализировать влияние качества минерального сырья на объем и характер выбросов кремниевого производства. Реализован центральный модуль сбора и анализа данных, связывающий химический и гранулометрический состав отобранных с производства трех источников кварцевого сырья при их согласовании с ключевыми параметрами плавки (скорость, давление отходящих газов, электрический режим). Программа мониторинга и управления материальным балансом с учетом примесных элементов и соединений, переходных и фазовых состояний кремнезема на всех этапах плавки дает возможность контролировать выход отходов в виде микрокремнезема необходимой структуры для его переработки в материалы с высокой добавленной стоимостью. Предлагаемая система контроля и управления балансом позволит повысить эффективность процесса на 15–20 %.

Ключевые слова: металлургический кремний, карботермическое восстановление, рудно-термическая печь, примеси, контроль химического состава, баланс по кремнезему, полиморфизм микрокремнезема.

DOI: 10.17580/tsm.2023.04.07

Введение

Металлургический кремний широко используют для легирования алюминиевых сплавов. Такие сплавы, в частности силумины, наиболее распространены в металлургической, автомобильной и машиностроительной промышленности. Кварц — основной материал для плавки металлургического кремния, содержащий оксиды кремния, алюминия, железа и др. При сравнительно больших запасах кварцевого сырья в России доля отечественного кремния составляет 2–4 % общемирового выпуска. Это, в первую очередь, связано с неэффективным использованием кварцитов различного химического состава (во время плавки нередко используют несколько источников кварцевого сырья из различных месторождений) и большими потерями сырья во время плавки в виде выбросов пылегазовых смесей микрокремнезема (микросилики) и углерода.

Получение кремния в рудно-термической печи (РТП) — сложный высокотемпературный процесс, сопровождающийся протеканием различных химических реакций с образованием промежуточных соединений (SiC, SiO) и фазовых переходов, обусловленных полиморфизмом кремнезема. Причем переходные

структурные состояния могут изменяться в ходе всего технологического цикла в зависимости от условий плавки, качества кварцевого сырья [1–3]. Необходимо отметить, что определенные фазы образуются только при заданных условиях (температуре, давлении, содержании внутренней влаги), и этим процессом можно управлять и контролировать его на всех стадиях плавки.

В производстве кремния важнейшей информационной подсистемой в АСУ ТП должна являться система контроля и управления балансом кварцевого сырья (уровень контроля и управления), представляющая собой совокупность технических, технологических, организационных и методических средств [4, 5].

Контроль качества кварцевого сырья

Существует ряд исследований, посвященных влиянию углеродных восстановителей на выплавку кремния в РТП, на основе которых сформированы требования к их качеству [6–8].

В настоящее время нет единого стандарта, регламентирующего качество кремнеземсодержащего сырья. Некоторые ГОСТы регламентируют только единичные параметры, такие как содержание SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, а также гранулометрический состав [9]. Причины отсутствия стандартов по ряду других примесей, существенно влияющих на эффективность и результат плавки, заключаются в том, что даже при сходном химическом составе кварциты разных месторождений ведут себя в процессе карботермического восстановления кремния по-разному. Это обусловлено прежде всего их структурным составом и модификациями SiO₂.

Анализ производственных данных плавки технического кремния в РТП показал, что любое изменение качества кварцита отрицательно влияет на эффективность технологического процесса, объемы пылевых выбросов, а также на чистоту конечного продукта [10, 11]. Пригодность сырья для производства металлургического кремния в РТП традиционно определяют лишь по химическому и гранулометрическому составу. При этом структурный анализ, выявляющий реакционную способность и степень газификации кварцита, не проводится из-за отсутствия надежной методики исследования.

Анализ исходного состава кварцита, используемого в производстве кремния (табл. 1), позволяет обнаружить значительные отклонения даже в регламентируемых примесях. Колебания изменения основных примесей в кварцевом сырье, используемом для выплавки металлургического кремния, указывают на необходимость создания комплексной системы

Таблица 1

Сводные данные по составу кварцевого сырья на примере предприятий по производству кремния

Период (месяц)	Кварцит (происхождение)	Содержание примесей, %			Масса примесей, кг
		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	
Январь	ОАО «Динур»*	0,120	0,12	0,016	969050
	Глуховский карьер**	0,042	0,06	0,019	6 505 000
	Светлореченский карьер*	0,026	0,046	0,016	395 300
Февраль	ОАО «Динур»	0,100	0,12	0,016	1 496 800
	Глуховский карьер	0,037	0,05	0,019	3 616 500
	Светлореченский карьер	0,025	0,077	0,019	600 000
Март	ОАО «Динур»	0,110	0,20	0,011	1 357 000
	Глуховский карьер	0,039	0,06	0,029	5 427 000
	Светлореченский карьер	0,027	0,06	0,023	589 500
Апрель	ОАО «Динур»	0,090	0,26	0,013	1 787 100
	Глуховский карьер	0,037	0,04	0,016	4 817 500
	Светлореченский карьер	0,024	0,04	0,012	468 400
Май	ОАО «Динур»	0,110	0,29	0,012	1 352 900
	Глуховский карьер	0,043	0,07	0,016	6 760 500
	Светлореченский карьер	0,022	0,05	0,018	845000
Июнь	ОАО «Динур»	0,14	0,26	0,012	1 498 200
	Глуховский карьер	0,036	0,05	0,013	4 493 000
	Светлореченский карьер	0,030	0,05	0,015	598100
Июль	ОАО «Динур»	0,150	0,23	0,014	1 298 400
	Глуховский карьер	0,036	0,05	0,013	4 493 000
	Светлореченский карьер	0,031	0,053	0,024	547100
Август	ОАО «Динур»	0,130	0,25	0,010	1 304 300
	Глуховский карьер	0,035	0,04	0,019	5204,5
	Светлореченский карьер	0,030	0,05	0,020	540,3

*Россия; **Украина.

контроля качества сырья [12–14], г/т: 300–3200 Al; 75–160 Ca; 100–1500 Fe; 20–200 Ti; 50–170 Na; 20–140 Mg; 5–50 P; 10–45 B.

Причины полиморфизма микрокремнезема

Частицы микрокремнезема во время плавки образуются как побочный продукт. Объемы пылевых выбросов достигают 40–50 % массы получаемого кремния, что делает крайне актуальными проблемы снижения выбросов микрокремнезема, а также его товарную реализацию при поддержании высокого качества кремния. В зависимости от сферы использования предпочтение отдают определенным характеристикам, таким как размер частиц, насыпная плотность, полиморфная модификация, что наряду с углубленным изучением условий образования и роста микрокремнезема критически влияет на возможности сбыта, контроль и управление процессом [15, 16].

Можно выделить три причины появления микрокремнезема различного структурного состава:

- 1) образование в печи при температурах 1100–1500 °С, связанное с взаимодействиями монооксида кремния и монооксида углерода;
- 2) структурные изменения в результате окисления, протекающие в основном в печах открытого типа;
- 3) появление вследствие механического уноса мелких фракций шихты [17–19].

С точки зрения полиморфных модификаций (табл. 2) уловленная газоочистной установкой (ГОУ) пыль состоит в основном из аморфного кремнезема, α -кварца, α - и β -кристаллитов.

Однако при создании определенных термодинамических условий на фазовые превращения могут влиять размер частиц и состав примесей кварцевого сырья. Влияние размера частиц можно считать незначительным, при этом важно знать, как от состава примесей зависит протекание процессов образования высокотемпературных фаз кремнезема.

Способность оксида кремния переходить в аморфное состояние и фазу кристаллита значительно зависит от исходного типа кварца. Согласно исследованию [20], самые существенные различия наблюдаются между типами кварцита, при этом тенденция, связанная с размером частиц, не выявлена. Для многих образцов наибольшее количество аморфного кремния отмечено уже через 10 мин нагрева, и это указывает на то, что аморфная фаза образовалась и затем постепенно переходит в кристаллит [21–23].

Примеси в кварцевом сырье также влияют на кинетику фазового превращения. Так, увеличение количества примесей щелочных и щелочноземельных элементов ускоряет фазовые превращения кремнезема (зарождение и рост кристаллита). Это объясняется образованием жидкостей с низкой вязкостью (ниже температуры плавления кремнезема). Такие жидкости легко распространяются по объему образца

Таблица 2

Фазовые превращения микрокремнезема

Превращение	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{г/см}^3$
α -кварц \rightarrow β -кварц	573	2649–2533
β -кварц \rightarrow тридимит	870	2533–2183
Тридимит \rightarrow β -кристаллит	1470	2183–2205
β -кристаллит \rightarrow α -кристаллит	272	2183–2333
Аморфный микрокремнезем	1300	2000–2200

и способствуют растворению кварца. Они также увеличивают подвижность диффундирующих веществ. Возможно, сами примеси разрушают связи Si – O в твердом состоянии, делают структуру более пластичной и способствуют образованию других фаз [24–26].

Также в некоторых работах было обнаружено, что увеличение содержания Al_2O_3 до 0,44 % ускоряет превращение, а превышение этого количества замедляет его. Это объясняется тем, что катализатор Al_2O_3 сначала зарождается на зернах кварца, после чего диффузионный слой, созданный проникающим катализатором, начинает распространяться [27–30].

Таким образом, для эффективной утилизации пыли необходимо создать такие технологические условия карботермического восстановления кремния, при которых большую часть пылевых отходов будет составлять высококачественный аморфный диоксид кремния с низким содержанием примесей, что невозможно без внедрения комплексной системы анализа сырья и ключевых технологических параметров процесса производства кремния.

Материалы и методы исследования

Возможности традиционных методов физико-химического анализа в области оценки процессов, происходящих внутри РТП, ограничены, что делает актуальным использование методов моделирования. Так, ранее для получения данных о пылевых выбросах, была использована модель вычислительной гидродинамики (CFD) газоотводящего тракта РТП [31]. Цифровое моделирование карботермического восстановления кремния и температурных полей газоотводящего тракта и свода РТП позволяет повысить управляемость процесса. В сочетании с промышленными экспериментами цифровая модель дает возможность определить факторы, влияющие на качество металлургического кремния и товарного микрокремнезема [32–35].

В основе разработанной системы контроля и управления балансом кварцевого сырья находятся полученные зависимости объема и характера выбросов микрокремнезема от ряда факторов, таких как химический и гранулометрический состав, структурные особенности кварцевого сырья, температура плавки и т. д.

В работе [36] представлены результаты исследования влияния температуры и крупности кварцитов четырех месторождений на степень восстановления кремния термогравиметрическим методом.

Для расчета степени восстановления кремния была использована формула

$$\alpha = \frac{m_o}{\Sigma(m_o)} \cdot 100 \%,$$

где m_o — количество кислорода, удаленного из образца; $\Sigma(m_o)$ — общее количество кислорода в восстанавливаемом образце кварцита.

На основе графиков, представленных на **рис. 1**, получены зависимости выбросов основной составляющей пылевых выбросов диоксида кремния от температуры для различных фракций четырех месторождений кварцитов (**табл. 3**), которые в совокупности с базовым алгоритмом расчета материального баланса выплавки кремния составляют основу расчетной части системы.

Таблица 3
Зависимость массы выбросов микрокремнезема от месторождения, фракции и температуры плавки, мм

Месторождение	Фракция, мм	Формула
Первоуральское	10–20	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (3975,36 - 4,4t + 0,00122t^2))}{100}$
	20–30	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (3046,98 - 3,4t + 0,00095t^2))}{100}$
	30–40	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (2393,13 - 2,73t + 0,00087t^2))}{100}$
Антоновское	10–20	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (2398,855 - 2,72t + 0,00078t^2))}{100}$
	20–30	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (2783,32 - 3,12t + 0,00087t^2))}{100}$
	30–40	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (1223,32 - 1,47t + 0,00041t^2))}{100}$
Черемшанское	10–20	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (3169,72 - 3,52t + 0,00098t^2))}{100}$
	20–30	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (2758,15 - 4,4t + 0,00087t^2))}{100}$
	30–40	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (1743,75 - 1,96t + 0,00055t^2))}{100}$
Уватское	10–20	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (1840,6 - 2,04t + 0,00057t^2))}{100}$
	20–30	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (894,7 - 1,05t + 0,00031t^2))}{100}$
	30–40	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (2797,44 - 3,07t + 0,00084t^2))}{100}$

Разработанный алгоритм контроля

С учетом происходящих во время плавки фазовых превращений и реакций, включая обратные, баланс по кремнезему можно разделить на 4 этапа.

1. *Формирование и подготовка шихты.* Объединение масс кварцита с учетом химического состава. Контроль и измерение таких параметров, как масса шихтовых компонентов, химический и гранулометрический состав, структурный анализ.

2. *Нагрев и плавление шихты в РТП.* Контроль электрического режима РТП и твердых продуктов плавки с учетом обратимых реакций. Измерение и контроль формы рабочего пространства, напряжения трансформатора для определения примерной температуры расплава.

3. *Переход пыли в газоходный тракт системы газоочистки.* Контроль движения пылегазовой смеси и промежуточные параметры по условиям CFD-модели через устойчивые зоны при измерении скорости потока на выходе из печи в газоход, температура и давление отходящих газов.

Восстановление Si, %

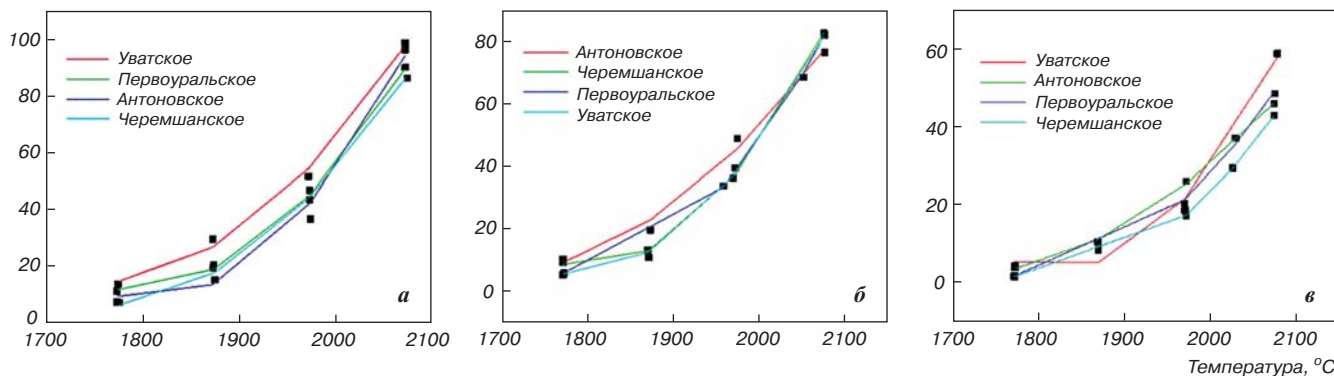


Рис. 1. Зависимость степени восстановления кремния из кварцитов различных месторождений от температуры и фракции: а — 10–20 мм; б — 20–30 мм; в — 30–40 мм [36]

4. Сбор отходов в системе ГОУ после электрофильтров. Контроль выходного параметра баланса. Измерение массы пылевых выбросов, поступающих с фильтров газоочистки, определение химического состава и структурного состава [37, 38].

Алгоритм контроля и управления балансом кварцевого сырья в различных формах, на базе которого можно создать один из элементов системы управления производством — MES*, представлен на рис. 2.

Основой разработанной системы является блок расчета баланса микрокремнезема и кварцевого сырья, обеспечивающий выполнение следующих функций: сбор данных, поступающих из АСУ ТП; их обработка для расчета состава и количества образующегося микрокремнезема в зависимости от ключевых параметров (температуры в печи, гранулометрического и химического состава кварцевого сырья); предоставление данных в виде таблиц и графических зависимостей (рис. 3).

Температура в печи определяется косвенно в зависимости от электрического режима печи, а именно величины напряжения между электродами и шихтой. Данные передаются в условиях реального времени по протоколу MQTT (Message Queue Telemetry Transport, протокол для передачи последовательности сообщений с телеметрическими данными) [37].

Таким образом, проблему влияния качества сырья на эффективность технологического процесса можно решить только при системном подходе, совместив непрерывный мониторинг ключевых параметров процесса с точечным отбором проб для калибровки системы управления процессом, которая в итоге отразится на качестве выпускаемого кремния и обеспечит снижение выбросов микрокремнезема. В работе рассмотрена часть, связанная с материальным балансом кварцита — основного сырья для получения кристаллического кремния, которая может стать основой для MES всего технологического процесса [39, 40].

*MES — Manufacturing Execution System, система управления производством, специализированное программное обеспечение.

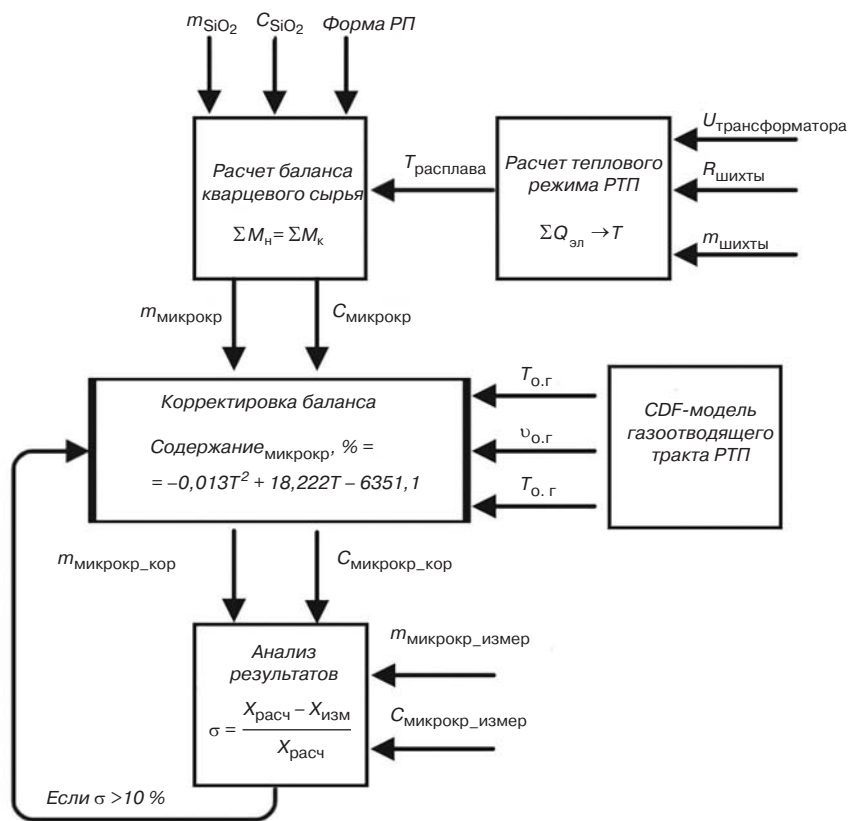


Рис. 2. Алгоритм системы контроля и управления кварцевым сырьем для производства металлургического кремния:

m_{SiO_2} — масса кварцита; C_{SiO_2} — состав кварцита; форма РП — форма рабочего пространства печи; M_n и M_k — масса кварцита к началу и окончанию плавки соответственно; $T_{расплава}$ — температура расплава в печи; $Q_{эл}$ — количество выделяемой электродами теплоты; $U_{трансформатора}$ — напряжение трансформатора; $R_{шихты}$ — сопротивление шихты; $m_{шихты}$ — масса шихты; $Содержание_{микрокр}, \%$ — процентное содержание пылевых выбросов в отходящих газах; $T_{о,г}$ — температура отходящих газов; $v_{о,г}$ — скорость отходящих газов; $P_{о,г}$ — давление отходящих газов; $m_{микрокр}$ — расчетная масса микрокремнезема; $C_{микрокр}$ — состав микрокремнезема; $m_{микрокр_кор}$ — скорректированное значение массы микрокремнезема; $C_{микрокр_кор}$ — скорректированный состав микрокремнезема; $m_{микрокр_измер}$ — измеренное значение массы микрокремнезема; $C_{микрокр_измер}$ — определенный лабораторно состав микрокремнезема; σ — относительная погрешность расчетов программы; $X_{расч}$ — расчетные значения параметров; $X_{изм}$ — измеряемые значения параметров

Экономическая эффективность проекта

Во многих проектах по автоматизации принято определять ожидаемые преимущества и окупаемость проекта. Для этого необходимо максимально достоверно оценить затраты и выгоды. В случае использования MES невозможно заранее определить экономическую эффективность, поскольку проекты такого рода связаны с внедрением функционала, направленного на формирование отчетности и анализ. Даже предприятия, которые уже пользуются MES, обычно не могут предоставить точные цифры повышения эффективности производства и зачастую указывают конкретные результаты экономии средств и улучшений, но полной уверенности, что это «заслуга» MES, нет.

Оценить эффект от внедрения разработанной системы управления балансом кварцевого сырья при производстве металлургического кремния можно лишь приблизительно

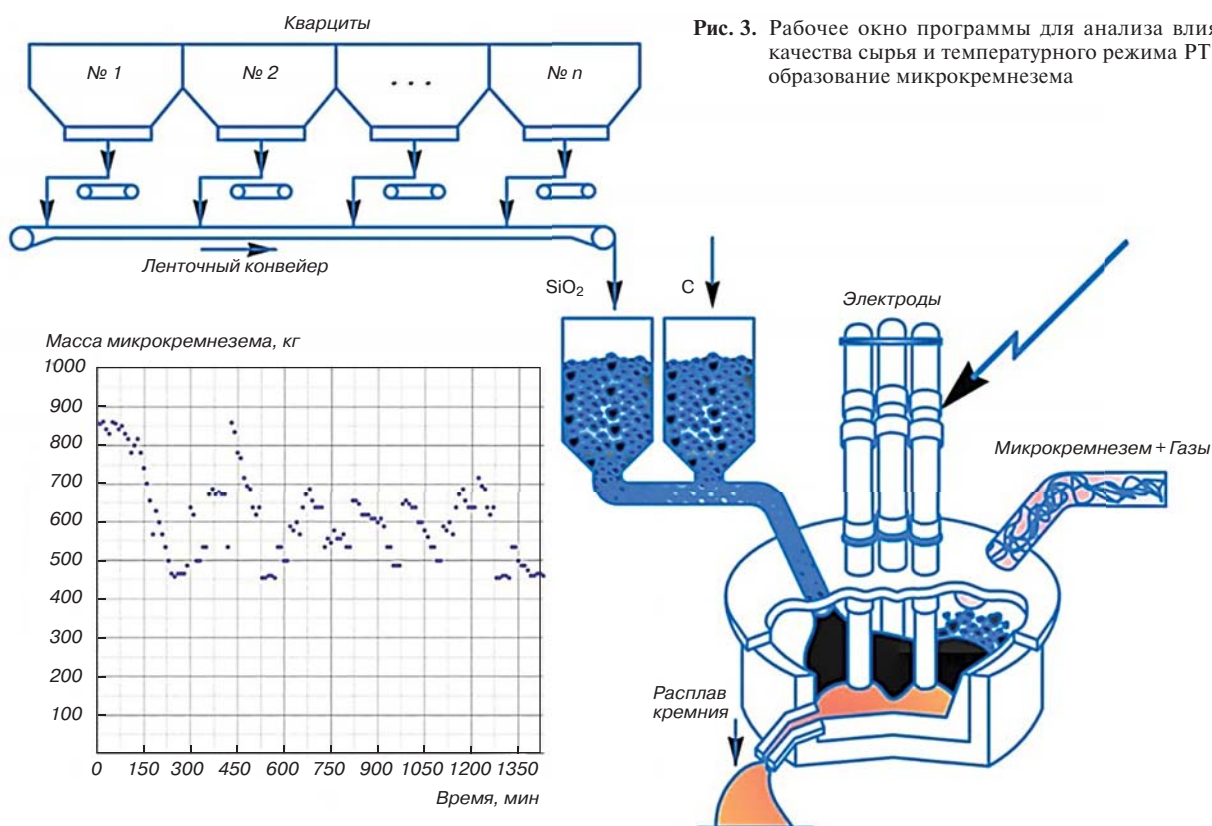


Рис. 3. Рабочее окно программы для анализа влияния качества сырья и температурного режима РТП на образование микрокремнезема

Таблица 4
Экономическая эффективность внедрения системы автоматизированного контроля и управления балансом кварцевого сырья

Содержание Si в конечном продукте, %	Цена, тыс. руб/т	Выпущено до модернизации, т/мес.	Выпущено после модернизации, т/мес.
99 и более	165	872	2200
98–99	160	977	0
98	150	278	0
97–98	140	50	0
96–97	130	93	0
Всего		2270	2200
Стоимость, тыс. руб.		353 990	363 000

на основе производственных данных работы подобных систем (информационные системы управления производством Асукского и Кузнецкого заводов по производству ферросплавов).

Таким образом, за счет внедрения системы ожидается снижение таких показателей, как удельный расход энергоресурсов на производство металлургического кремния (на 2 %); расход анодов (из-за окисления, осыпаемости, локального разрушения) за счет улучшения контроля технологического режима плавки (на 1 %), а также повышение объема реализации товарной продукции на 10 % ввиду увеличения содержания в пылегазовых выбросах качественного аморфного диоксида кремния и цены конечных изделий (огнеупоров, присадок, карбида кремния, тампонажных смесей).

Достижение указанных результатов предполагает, что системы внедрения контроля и управления балансом позволят повысить общую эффективность процесса на 15–20 %.

Отдельно стоит отметить, что контроль содержания примесных элементов благоприятно влияет на чистоту конечного продукта. В табл. 4 представлены данные предприятия по производству технического кремния за месяц, подтверждено, что внедрение предлагаемой системы повысит чистоту выпускаемого кремния до 99 %, и это позволит получить экономическую выгоду до 9 млн руб/мес.

Заключение

Глобальные изменения рынка кремния требуют решения задач, связанных с повышением производительности рудно-термических печей и получением кремния высокого качества с минимальным содержанием примесей. Сегодня проблемы в этой области связаны с использованием различных источников кварцевого сырья, когда в нем могут содержаться элементы, снижающие эффективность плавки и качество производимого кремния. Низкое содержание таких элементов, как углерод, бор, фосфор, титан, в металлургическом кремнии повышает эффективность следующего передела — рафинирования при получении кремния «солнечной чистоты».

Предварительные исследования показали, что такие факторы, как полиморфизм и гранулометрический состав кремнезема, уровень содержания внутренней влаги, могут кардинально изменить условия плавки и ее материальный баланс. Для повышения эффективности управления качеством металлургического кремния необходим поэтапный ввод мониторинга химического и фазового состава с использованием экспресс-анализа и переносных сканирующих анализаторов [41, 42].

Представленный алгоритм позволяет непрерывно анализировать качество кварцевого сырья и его влияние на ход процесса, что существенно повышает его прозрачность при условии, что основные физико-химические превращения недоступны для наблюдения и контроля.

Разработка программы контроля и управления материальным балансом с учетом примесных элементов

и соединений, переходных и фазовых состояний кремнезема на всех этапах плавки дает возможность контролировать выход отходов в виде микрокремнезема со структурой, необходимой для ее переработки в материалы с высокой добавленной стоимостью. При этом основной задачей ресурсосбережения при производстве кремния является снижение массы технического кремнезема, находящегося в расходной части баланса. Ожидается, что предлагаемая система контроля и управления балансом позволит повысить эффективность процесса на 15–20 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок



Tsvetnye Metally. 2023. No. 4. pp. 53–60
DOI: 10.17580/tsm.2023.04.07

AUTOMATIC BURDEN BALANCE MONITORING AND CONTROL IN THE PRODUCTION OF METALLURGICAL SILICON

Information about authors

V. Yu. Bazhin, Head of the Metallurgy Department¹, Professor, Doctor of Technical Sciences, e-mail: bazhin_vyu@pers.spmi.ru
O. N. Masko, Postgraduate Student at the Department of Process and Plant Automation¹, e-mail: olgamasko.17@gmail.com
S. A. Martynov, Assistant Lecturer at the Department of Process and Plant Automation¹, Candidate of Technical Sciences, e-mail: direktor062@mail.ru

¹Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Abstract

Production of metallurgical silicon for Al–Si alloys and silumins is of strategic importance and defines the future of a great number of Russian industries. Reducing the weight of commercial silica, which belongs to the expenditure side of the balance, is the key resource-saving objective of the silicon industry. In today's environment, it is necessary to develop a monitoring and control system for quartz burden used for the production of metallurgical silicon as it would help tackle the issues caused by the reliance on different sources of raw materials, which can differ in terms of impurities content. This can affect the energy performance of the smelter and the quality of the final product. At the basis of the proposed system there lie mathematical calculations and models built with an account for the physicochemical and polymorphous transformations of the quartz material during smelting in an ore-thermal furnace. The paper relies on the relationships obtained earlier that show how the amount of microsilica and the type of emissions are determined by the chemical composition and the size distribution, the structure of quartz material and the smelting temperature. A CFD model of the exhaust duct of the furnace was used to obtain new data on dust and gas emissions. As a result, an algorithm was built that help analyze how the quality of the mineral material influences the amount and the type of emissions generated by silicon industry. The authors implemented a central data acquisition and analysis module that links the chemical composition with the size distribution of three samples of the quartz material while coordinating them with the key smelting parameters (i.e. speed, exhaust gas pressure, electric mode). The material balance monitoring and control software, which accounts for impurities as elements and compounds, as well as transition and phase states of silica at all process stages, enables to control the output of waste in the form of microsilica of required structure in order to process it and obtain high value-added materials. The proposed balance monitoring and control scheme will help raise the process efficiency by 15–20%.

Key words: metallurgical silicon, carbothermic reduction, ore-thermal furnace, impurities, monitoring of chemical composition, silica balance, polymorphism typical of microsilica.

References

1. Nedosekin A. O., Reyshakhrat E. I., Kozlovskiy A. N. A strategic approach to assessing the economic resilience of Russia's mineral sector. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 237. pp. 354–360. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.354.

- Safiullin R. N., Afanasiev A. S., Reznichenko V. V. Further development of monitoring and control systems for smart production complexes. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 237. pp. 322–330. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.322.
- Yolkin K. S., Sivtsov A. V., Yolkin D. K., Karlina I. Silicon metallurgy and ecology problems. *KnE Materials Science*. 2020. pp. 239–242. DOI: 10.18502/kms.v6i1.8073.
- Litvinenko V., Tsvetkov P., Molodtsov K. V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector. *Eurasian Mining*. 2020. Vol. 1. pp. 36–41. DOI: 10.17580/em.2020.01.07.
- Litvinenko V. Digital economy as a factor in the technological development of the Mineral sector. *Natural Resources Research*. 2019. Vol. 29. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4.
- Götze J., Pan Yu., Müller A. Mineralogy and mineral chemistry of quartz: A review. *Mineralogical Magazine*. 2021. Vol. 85. pp. 639–664. DOI: 10.1180/mgm.2021.72.
- Potrafke A., Breiter K., Ludwig T., Neuser R. D., Stalder R. Variations of OH defects and chemical impurities in natural quartz within igneous bodies. *Physics and Chemistry of Minerals*. 2020. Vol. 47. 24. DOI: 10.1007/s00269-020-01091-w.
- Shah S. A., Shao Y., Zhang Y. Texture and trace element geochemistry of quartz: A Review. *Minerals*. 2022. Vol. 12. 1042. DOI: 10.3390/min12081042.
- GOST 9854–81. Crystalline quartzites for the production of silica products. Specifications. Introduced: 01.01.1982.
- Nemchinova N. V., Hoang V. V., Tyutrin A. A. Formation of impurity inclusions in silicon when smelting in ore-thermal furnaces. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 969. 012038. DOI: 10.1088/1757-899X/969/1/012038.
- Nemchinova N. V., Tyutrin A. A., Sokolnikova Yu. V., Fereferova T. T. Analytical studies of raw materials for and products of silicon industry. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2017. Vol. 10. pp. 37–48.
- Gembitskaya I. M., Gvozdetzkaya M. V. Transformation of feedstock grains when producing fine powders. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 249. pp. 401–407. DOI: 10.1088/1742-6596/1384/1/012040.
- Vasilieva N. V., Boykov A. V., Erokhina O. O., Trifonov A. Yu. Automatic digitalization of pie charts. *Journal of Mining Institute* 2021. Vol. 247. pp. 82–87. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.9.
- Chigondo F. From metallurgical-grade to solar-grade silicon: An overview. *Silicon*. 2018. Vol. 10. pp. 789–798. DOI: 10.1007/s12633-016-9532-7.
- Evseev N. V., Tyutrin A. A., Pastukhov M. P. Granulation of dust waste generated by the silicon industry for its reutilization. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019. Vol. 23. pp. 805–815. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-805-815.
- Nemchinova N. V., Mineev G. G., Tyutrin A. A., Yakovleva A. A. Utilization of dust from silicon production. *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47, Iss. 12. pp. 763–766. DOI: 10.3103/S0967091217120087.
- Leonova M. S., Timofeeva S. S. Environmental and economic damage from the dust waste formation in the silicon production. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 229. 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/229/1/012022.
- Leonova M. S., Timofeeva S. S., Murzin M. A. Dust load in silicon production and occupational risks. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 687, Iss. 6. 066012. DOI: 10.1088/1757-899X/687/6/066012.
- Leonova M. S., Timofeeva S. S. Impact of dust emissions from the silicon production on working conditions. *IOP Conference Series Earth and*

- Environmental Science*. 2020. Vol. 408, Iss. 1. 012026. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012026.
20. Boduen A. Ya., Petrov G. V., Kobylansky A. A., Bulaev A. G. Sulfide leaching of high-grade arsenic copper concentrates. *Obogashchenie Rud*. 2022. No. 1. pp. 14–19. DOI: 10.17580/or.2022.01.03.
21. Sindland C., Tangstad M. Production rate of SiO₂ gas from industrial quartz and silicon. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2020. Vol. B 52, Iss. 3. DOI: 10.1007/s11663-021-02143-4.
22. Folstad M. B., Ringdalen E., Tveit H., Tangstad M. Effect of different SiO₂ polymorphs on the reaction between SiO₂ and SiC in Si production. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2021. Vol. B 52, Iss. 6. DOI: 10.1007/s11663-020-02053-x.
23. Abdurakhmanov B. M., Kurbanov M. Sh., Tulaganov S. A., Ernazarov M., Andriyko L. S. et al. Synthesis of superfine amorphous silicon dioxide powders from metallurgical waste. *Uzbek Journal of Physical*. 2021. Vol. 23, No. 1. pp. 65–74. DOI: 10.52304/v23i1.226.
24. Shestakov A. K., Sadykov R. M., Petrov P. A. Multifunctional crust breaker for automatic alumina feeding system of aluminum reduction cell. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 266. 09002. DOI: 10.1051/E3SCONF/202126609002.
25. Burkat V. S., Burkat T. V., Lapshin A. E. Investigation of physical and chemical properties of siliceous dust of ore-thermal furnaces. *Tsvetnye Metally*. 2017. No. 4. pp. 30–34. DOI: 10.17580/tsm.2017.04.04.
26. Legemza J., Findorák F., Bulko B., Briančin J. New approach in research of quartzes and quartzites for ferroalloys and silicon production. *Metals*. 2021. Vol. 11(4). 670. DOI: 10.3390/met11040670.
27. Asanov D. A., Zapasnyi V. V., Ermekova A. T., Maratova G. R., Ivanov A. A. et al. Current status of dust collection systems in aksu ferroalloy plant smelting shop 1 and functional improvement to these systems. *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. pp. 391–400. DOI: 10.1007/s11015-018-0673-3.
28. Chaklader A. C. D. Effect of trace Al₂O₃ on transformation of quartz to cristobalite. *Journal of the American Ceramic Society*. 1961. Vol. 44. pp. 175–180.
29. Brown S. D., Kistler S. S. Devitrification of high-SiO₂ glasses of the system Al₂O₃ – SiO₂. *Journal of the American Ceramic Society*. 1959. Vol. 42, No. 6. pp. 263–270. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1959.tb12951.x.
30. Legemza J., Findorák F., Bulko B., Briančin J. New approach in research of quartzes and quartzites for ferroalloys and silicon production. *Metals*. 2021. Vol. 11. 670. DOI: 10.3390/met11040670.
31. Bazhin V. Yu., Masko O. N. Use of a computational fluid dynamics model to analyze the relationship between the concentration of solid particles in the gas exhaust duct of a furnace and the temperature. *Computing, Telecommunication and Control*. 2022. Vol. 15, No. 1. pp. 51–63. DOI: 10.18721/JCSTCS.15105.
32. Beloglazov I., Krylov K. An interval-simplex approach to determine technological parameters from experimental data. *Mathematics*. 2022. Vol. 10. 2959. DOI: 10.3390/math10162959.
33. Beloglazov I. I., Sabinin D. S., Nikolaev M. Yu. Modelling of the disintegration process in ball mills with the help of discrete element method. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2022. No. 6–2. pp. 268–282. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_268.
34. Shestakov A. K., Petrov P. A., Nikolaev M. Yu. Automatic system for detecting visible emissions in a potroom of aluminium plant based on technical vision and a neural network. *Metallurg*. 2022. No. 10. pp. 105–112. DOI: 10.52351/00260827_2022_10_105.
35. Ringdalen E., Einarsrud E. K., Nordhus A. Gas flow and pressure drop in charge material in silicon production. *JOM*. 2022. Vol. 74. pp. 3971–3979. DOI: 10.1007/s11837-022-05431-9.
36. Elkin K. S., Rozhikhina I. D., Nokhrina O. I., Sivtsov A. V., Kashlev I. M. et al. Effect of the genetic features of quartzites on the performance of reduction smelting of silicon and ferrosilicium. *Metallurgy: Technology, Innovation, Quality. Proceedings of the 21st International Conference. Part 2*. 2019. pp. 4–12.
37. Sivtsov A. V., Yolkin K. S., Kashlev I. M., Karlina I. Processes in the charge and hearth zones of furnace working spaces and problems in controlling the batch dosing mode during the smelting of industrial silicon and high-silicon ferroalloys. *Metallurgist*. 2020. Vol. 64. pp. 396–403. DOI: 10.1007/s11015-020-01008-6.
38. Sivtsov A. V., Yolkin K. S., Pankov V. A., Karlina I. Specific features of the electric mode of the technological process of smelting of commercial silicon. *Metallurgist*. 2021. Vol. 64. pp. 923–930. DOI: 10.1007/s11015-021-01073-5.
39. Bazhin V. Yu., Masko O. N. A computer programme for analyzing how the quality of raw materials and the temperature regime of an ore thermal furnace influence the formation of microsilica. Certificate of State Registration for Computer Programme RF, No. 2022666844. Applied: 05.09.2022. Published: 07.09.2022. Bulletin No. 9.
40. Fedorova E., Pupysheva E., Morgunov V. Modelling of red-mud particle-solid distribution in the feeder cup of a thickener using the combined CFD-DPM approach. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. 2314. DOI: 10.3390/sym14112314.
41. Kuvykin V. I., Kuvykina E. V., Matveev A. E., Sychev A. G. Enhancing the production performance through the use of a material balance control scheme. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2019. No. 4. pp. 36–40. DOI: 10.17513/snt.37488.
42. Boikov A., Payor V., Savelev R., Kolesnikov A. Synthetic data generation for steel defect detection and classification using deep learning. *Symmetry*. 2021. Vol. 13. 1176. DOI: 10.3390/sym13071176.

