

**По итогам Международной научной конференции
«ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ»**
имени академика А.М. САМАРИНА, Москва, 25 – 28 ноября 2019 г.

ISSN: 0368-0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Том 63. № 8. С. 579 – 590.
© 2020. Дашевский В.Я., Александров А.А., Жучков В.И., Леонтьев Л.И.

УДК 669.747

ПРОБЛЕМА МАРГАНЦА В РОССИЙСКОЙ МЕТАЛЛУРГИИ*

Дашевский В.Я.^{1,3}, д.т.н., профессор кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих
промышленных технологий, заведующий лабораторией (vdashev@imet.ac.ru)

Александров А.А.¹, к.т.н., старший научный сотрудник (a.a.aleksandrov@gmail.com)

Жучков В.И.², д.т.н., профессор, главный научный сотрудник (ntm2000@mail.ru)

Леонтьев Л.И.^{2,3,4}, академик РАН, советник, д.т.н., профессор,
главный научный сотрудник (leo@presidium.ras.ru)

¹ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
(119334, Россия, Москва, Ленинский пр., 49)

² Институт металлургии УрО РАН
(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

⁴ Президиум РАН
(119071, Россия, Москва, Ленинский пр., 14)

Аннотация. Основным потребителем марганца – черная металлургия. Объем производства марганцевых ферросплавов в мире составляет ~1 % объема производства стали. После распада Советского Союза Россия оказалась без марганцеворудной базы. В настоящее время в России из импортной руды выплавляют только высокоуглеродистый ферромарганец и ферросиликомарганец в ограниченном объеме. Минерально-сырьевая база марганцевых руд России достаточно велика: балансовые запасы марганцевых руд составляют около 230 млн т (~2 % мировых), прогнозные ресурсы – более 1 млрд т. Качество марганцевых руд России ниже, чем марганцевых руд большинства основных стран-производителей. Среднее содержание марганца в российских рудах 9 – 23 %. Основу минерально-сырьевой базы марганцевых руд составляют карбонатные руды, доля которых составляет более 77 %. Добыча марганцевых руд в России ведется нерегулярно и не превышает 66 тыс. т/год. Потребность российских ферросплавных заводов, выплавляющих марганцевые ферросплавы, в марганцевых рудах и концентратах покрывается за счет импорта. Проблема ускорения создания отечественной марганцеворудной базы с позиции экономической безопасности представляется весьма важной. Необходимо решить целый ряд вопросов, связанных с обогащением бедных марганцевых руд, с разработкой эффективных технологий выплавки марганцевых ферросплавов из концентратов, получаемых после обогащения этих руд, а также с созданием более совершенных методов дефосфорации марганцевых концентратов. При производстве марганцевых ферросплавов от руды до готовых сплавов теряется порядка 50 % марганца, добытого из недр, образуется большое количество побочных продуктов (шламы обогащения, шлаки, отсеиваемые фракции рудного сырья и готовой продукции, шламы процесса выплавки и пыли), использование и переработка которых позволяют не только сократить потребление исходного минерального сырья, но и повысить эффективность основного производства, уменьшить загрязнение окружающей среды. Доизвлечение марганца из техногенных отходов, совершенствование технологических процессов выплавки марганцевых ферросплавов – путь к повышению сквозного извлечения марганца.

Ключевые слова: марганец, минерально-сырьевая база, выплавка марганцевых ферросплавов, дефосфорация, потери марганца, конкреции.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-8-579-590

Марганец является важнейшим стратегическим металлом. Основным потребителем марганца – черная металлургия. По своему значению для производства стали марганец занимает первое место в ряду ферросплавов. Более 90 % марганца используется в качестве раскислителя, легирующего элемента и десульфуратора. На 1 т стали расходуется в среднем 9 – 10 кг марганца. Как легирующий элемент марганец содержится в большом числе марок стали: 0,4 – 0,8 % Mn в нелегированных сталях, 12 – 30 % Mn в высоколегированных сталях

(жаропрочных, жаростойких, нержавеющих, немагнитных, стали Гатфильда), 4 – 17 % Mn в аустенитных чугунах. Без марганца практически не выплавляется сталь ни одной марки. Производство марганцевых ферросплавов находится в прямой зависимости от производства стали. С ростом выплавки стали растет и производство марганцевых ферросплавов. Объем производства марганцевых ферросплавов в мире составляет ~1 % объема производства стали. В 2018 г. в мире произведено 1,8 млрд т стали и порядка 18 млн т марганцевых ферросплавов [1].

В металлургической промышленности марганец используется в виде ферросплавов: высокоуглеродис-

* Работа выполнена по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 22П.

того ферромарганца, ферросиликомарганца, средне- и низкоуглеродистого ферромарганца (рафинированного ферромарганца), металлического марганца [2].

Ферросплавы, содержащие трудновосстановимые элементы, первоначально (с начала XIX в.) получали только тигельным способом [3]. В начале XX в. тигельный способ производства применялся также для получения мало- и безуглеродистых ферросплавов, прежде всего – малоуглеродистого ферромарганца. Главными проблемами тигельного производства были высокие затраты и низкая производительность. Поэтому уже с 80-х годов XIX в. высокоуглеродистый ферромарганец начали производить практически исключительно в доменных печах. С появлением в начале XX в. сравнительно не дорогой электроэнергии марганцевые ферросплавы стали выплавлять большей частью в электрических печах – рудно-термических и рафинировочных.

Основной базой марганцеворудной промышленности в СССР являлись Никопольское (Украина), Чиатурское (Грузия) и Джездинское (Казахстан) месторождения. На этих месторождениях добывали более 20 млн т сырой руды при среднем содержании марганца в руде 20 %. Из этой руды выплавляли около 2 млн т марганцевых ферросплавов, главным образом на Никопольском

(Украина), Запорожском (Украина), Зестафонском (Грузия) и Аксусском (Казахстан) заводах ферросплавов. После распада Советского Союза Россия оказалась без марганцеворудной базы. В настоящее время в России из импортной руды выплавляют высокоуглеродистый ферромарганец (Косогорский металлургический и Саткинский чугунолитейный заводы), ферросиликомарганец (Челябинский электрометаллургический комбинат и в ограниченном объеме Западно-Сибирский электрометаллургический завод) [4, 5].

Российская Федерация обладает достаточно крупной сырьевой базой марганцевых руд, входя в десятку мировых держателей их запасов, однако товарно-сырьевую продукцию практически не производит. Отечественная промышленность для выплавки марганцевых ферросплавов использует закупаемые за рубежом товарные марганцевые руды. По их импорту Россия в 2017 г. занимала шестое место в мире, в 2018 г. – четвертое [5].

Минерально-сырьевая база марганцевых руд России достаточно велика: балансовые запасы составляют около 230 млн т (~2 % мировых), прогнозные ресурсы – около 1 млрд т (табл. 1) [5, 6]. Данные по использованию сырьевой базы марганцевых руд России приведены в табл. 2 [6].

Таблица 1

Ресурсы и запасы марганцевых руд Российской Федерации

Table 1. Resources and reserves of manganese ores in Russia

Сырьевая база	На 1.01.2017 г.		На 1.01.2018 г.		На 1.01.2019 г.	
Запасы	Разведанные $A + B + C_1$	Оцененные C_2	Разведанные $A + B + C_1$	Оцененные C_2	Разведанные $A + B + C_1$	Оцененные C_2
Количество, тыс. т	137,8	92,4	137,8	92,4	137,7	146
Изменение к предыдущему году, %	0	0	0	0	-0,04	+58
Доля распределенного фонда, %	55,5	56,1	55,8	53,4	55,8	32,8
На 1.01.2018 г.						
Прогнозные ресурсы	P_1		P_2		P_3	
Количество, млн т	232		138		615	

Таблица 2

Использование сырьевой базы марганцевых руд Российской Федерации, тыс. т

Table 2. Use of the raw material base of manganese ores in Russia, thousand tons

Показатели	2016 г.	2017 г.	2018 г.
Добыча из недр	0	1	57
Производство товарных марганцевых руд	0	0	0
Импорт товарных марганцевых руд	988	1067	1318
Производство марганцевых ферросплавов	349	511	615
Экспорт марганцевых ферросплавов	32	82	133
Импорт марганцевых ферросплавов	248	195	213
Импорт металлического марганца	43	63	68

Таблица 3

Запасы марганцевых руд и производство товарных руд и концентратов

Table 3. Manganese ores reserves and production of commodity ores and concentrates

Страна	Запасы, категория	Запасы, млн т	Производство в 2018 г., млн т	Доля в мировом производстве, %
Китай	Гарантированные	310	20	35
ЮАР	Доказанные + вероятные	670	14,9	26
Австралия	Доказанные + вероятные	110	6,6	11
Габон	Доказанные + вероятные	182	4,3	7
Россия	Запасы категорий $A + B + C_1$ разрабатываемых и подготавливаемых месторождений	76	0	–

Ведущими продуцентами товарно-сырьевой марганцевой продукции в мире являются Китай, ЮАР, Австралия и Габон. Их суммарная доля в мировом производстве достигает 80 % (табл. 3) [6]. Доля России в мировом производстве марганцевой продукции показана на рис. 1 [5].

Качество марганцевых руд России ниже, чем марганцевых руд большинства основных стран-продуцентов [7, 8]. Среднее содержание марганца в этих рудах составляет 40 – 45 %, тогда как в российских рудах 9 – 23 % и лишь на одном месторождении находится в пределах 31 %. При этом отечественные марганцевые руды зачастую содержат повышенное количество вредных примесей, в первую очередь фосфора (0,2 – 0,8 %), а также железа и кремнезема. Прогнозные ресурсы марганцевых руд, локализованные на российской территории, достаточно велики. Количество ресурсов только P_1 соизмеримо с величиной суммарных запасов (рис. 2) [7]. Однако содержание марганца в прогнозных ресурсах, также как и в запасах, невелико и варьируется в диапазоне 9 – 20 %.

Крупнейшим месторождением марганцевых руд России является Усинское (Кемеровская область, Западно-Сибирский регион). В его недрах заключено более половины запасов марганцевых руд страны. Месторождение характеризуется крупными запасами бедных карбонатных руд при среднем содержании марганца

19,72 % и фосфора 0,15 %. На месторождении имеется кора выветривания, в пределах которой сформировались окисленные руды, содержащие в среднем марганца 25,57 % и фосфора 0,24 %.

Еще одно крупное месторождение марганцевых руд – Порожинское (Туруханский район Красноярского края, Восточно-Сибирский регион). Месторождение включает 12,8 % российских запасов. Руды Пороженского месторождения бедные, высокофосфористые (0,3 – 0,8 % Р, редко до 7 % Р). Среднее содержание марганца 18,85 %, фосфора 0,52 %.

Группа из девяти месторождений, в которых заключено 18 % запасов марганцевых руд России, разведана в Свердловской области. Рудные тела сложены преимущественно труднообогатимыми карбонатными рудами с содержанием марганца 20 – 22,5 %, фосфора 0,15 – 0,20 % и высокой концентрацией кремнезема.

Среднее по масштабу Южно-Хинганское месторождение железо-марганцевых руд (Еврейская АО, Мало-Хинганский рудный район) заключает 3,9 % запасов России. Руды его относятся к окисдно-карбонатному типу и содержат в среднем 20,9 % марганца и 0,2 % фосфора.

Наиболее высоким средним содержанием марганца (31 %) характеризуется мелкое Парнокское железорудное месторождение (Республика Коми, Северный Урал). Доля запасов месторождения в суммарных запасах марганцевых руд не превышает 1 %. На месторождении выделяются окисленные (богатые и бедные), богатые смешанные (полуокисленные), карбонатные (карбонатно-силикатные) и карбонатно-окисные руды. Содержание марганца варьируется от 20 до 57 %, железа – 1,5 – 10 %, фосфора – 0,02 – 0,2 %.

Таким образом, основу минерально-сырьевой базы марганцевых руд России составляют карбонатные руды, доля которых в запасах составляет более 77 %. Данные по основным месторождениям марганцевых руд России приведены в табл. 4 [6].

Государственным балансом запасов полезных ископаемых в России учтено 29 месторождений марганцевых руд, в том числе четыре месторождения железо-



Рис. 1. Доля России в мировых запасах марганцевых руд, импорте товарных марганцевых руд и производстве марганцевых ферросплавов (%) и ее позиция в мировом рейтинге

Fig. 1. Russia's share in world reserves of manganese ores, in import of commodity manganese ores and production of manganese ferroalloys (%) and its position in the world ranking

Таблица 4

Основные месторождения марганцевых руд России

Table 4. The main deposits of manganese ores in Russia

Месторождение	Тип руды	Запасы руды на 01.01.2019 г., тыс. т		Доля в запасах РФ, %	Среднее содержание Mn, %	Добыча в 2018 г., тыс. т
		$A + B + C_1$	C_2			
Усинское	Карбонатные	64 231	57 454	42,9	19,7	0
	Окисленные	5847	164	2,1	25,6	0
Порожнинское	Окисленные	15 696	13 767	10,4	18,9	0
Южно-Хинганское	Окисленные	127	—	0,04	18,1	0
	Смешанные	6004	2093	2,9	20,9	0
	Оксидные	285	381	0,2	21,1	0
Парнокское	Карбонатные	786	221	0,4	30,5	0
	Окисленные	779	224	0,4	31,6	0

марганцевых конкреций на шельфе Финского залива Балтийского моря (рис. 2) [5]. В распределенном фонде недр числятся 13 месторождений. Остальные месторождения, числящиеся в нераспределенном фонде, по количеству запасов относятся преимущественно к мелким и характеризуются рудами низкого качества.

Добыча марганцевых руд в России ведется нерегулярно и не превышает 66 тыс. т/год (рис. 3) [5]. Связано это с низким качеством руд российских месторождений и необходимостью значительных вложений в их освое-

ние. Потребность российских ферросплавных заводов, выплавляющих марганцевые ферросплавы, в марганцевых рудах и концентратах покрывается за счет импорта (рис. 4) [5]. Эта потребность возросла с 270 тыс. т/год в 1996 г. до 1020 тыс. т/год в 2014 г., стоимость импорта марганцевой руды достигает 142 млн долл. США в год [4]. Так за период с 2013 по 2016 гг. стоимость импорта марганцевых руд в Россию составила 562 млн долл. США [9]. Структура импорта за эти годы приведена в табл. 5.



Рис. 2. Основные месторождения марганцевых руд и распределение их запасов и прогнозных ресурсов категории P_1 по субъектам Российской Федерации, млн т

Fig. 2. The main deposits of manganese ores and distribution of their reserves and forecast resources of P_1 category by constituent entities of the Russian Federation, million tons

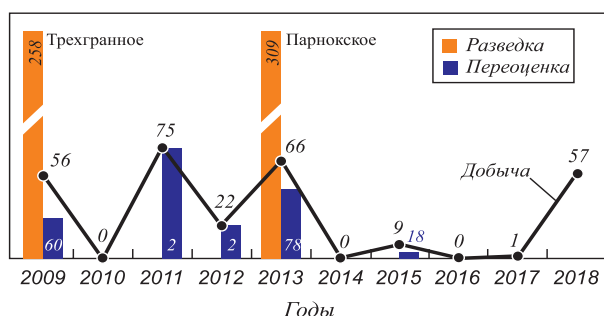


Рис. 3. Динамика прироста/убыли запасов марганцевых руд категорий $A + B + C_1$ и добычи в 2009 – 2018 гг., тыс. т

Fig. 3. Growth/decrease dynamics of manganese ore reserves of $A + B + C_1$ categories and mining in 2009–2018, thousand tons

Основное количество потребляемых марганцевых ферросплавов в России составляют ферро- и силико-марганец (более 95 %), в меньшем количестве низкоуглеродистый ферромарганец и металлический марганец. До 1999 г. объемы потребления ферромарганца и силикомарганца в РФ были примерно равны, но в последние годы потребление силикомарганца стало расти. Производство силикомарганца в РФ в настоящее время вдвое превышает объемы выплавки ферромарганца.

Производство высокоуглеродистого ферромарганца в России имеет тенденцию к росту – с 46,5 тыс. т в 1997 г. (25 % потребления) до 180,6 тыс. т в 2013 г. (примерно равно потреблению) [4]. Потребление высокоуглеродистого ферромарганца составляет 190 – 250 тыс. т/год. Производство ферросиликомарганца также имеет тенденцию к росту – с 50 тыс. т в 1997 г. (20 % потребления) до 230,5 тыс. т в 2016 г. (52 % потребления) [4]. Объем производства российскими предприятиями марганцевых ферросплавов в 2013 г. (334 тыс. т) впервые превысил их импорт (216,8 тыс. т) [10]. В последние годы выплавка марганцевых ферросплавов в России находится на уровне 350 – 615 тыс. т в год (см. табл. 2) [5]. На рис. 5

Таблица 5

Структура импорта марганцевых руд в Россию с 2013 по 2016 гг.

Table 5. Structure of imports of manganese ores to Russia from 2013 to 2016

Страна (основные поставщики)	Масса руды, тыс. т	Стоимость руды, млн долл. США	Доля в общем объеме, %	Содержание в руде Mn, %
Южная Африка	1800	240	45,6	38 – 51
Казахстан	1600	208	39,5	20 – 40
Габон	210	27,8	5,3	45 – 51
Бразилия	130	17,8	3,4	43 – 50
Болгария	100	12,8	2,4	10 – 30

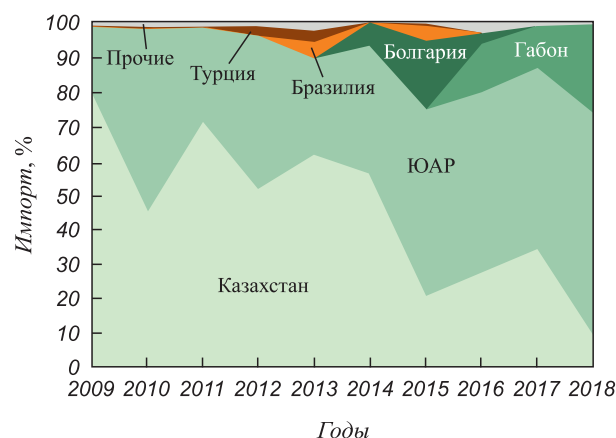


Рис. 4. Географическая структура импорта товарных марганцевых руд в Россию в 2009 – 2018 гг., %

Fig. 4. Geographic structure of imports of commodity manganese ores to Russia in 2009–2018, %

приведены данные о производстве, импорте и экспорте марганцевых ферросплавов в РФ в 1996 – 2016 гг. [4].

В последние десятилетия ясно выделяется тенденция к сокращению потребления высокоуглеродистого ферромарганца и росту потребления ферросиликомарганца, рафинированного ферромарганца и металлического марганца. Большую часть российского потребления ферросиликомарганца (50 – 60 % потребления) компенсирует импорт из Украины (до 175 тыс. т) и Казахстана (до 162 тыс. т), всего импортируется до 245 тыс. т/год [4]. Рафинированный ферромарганец и металлический марганец Россия импортирует из Украины и Китая. В 2018 г. объем закупок металлического марганца составил 68 тыс. т [5].

Проблема ускорения создания отечественной марганцеворудной базы с позиции экономической безопасности представляется весьма важной [11]. Несмотря на то, что марганец относится к группе полезных ископаемых, имеющих важное стратегическое значение, до настоящего времени Россия вынуждена импортировать товарную марганцевую руду, марганецсодержащие ферросплавы, металлический марганец, диоксид марганца, перманганат калия. Необходимо не только увеличивать объем выплавки высокоуглеродистого ферромарганца и ферросиликомарганца, в том числе и за счет вовлечения в производство отечественных марганцевых руд, но и организовать в России производство рафинированного ферромарганца и металлического марганца.

Для решения проблемы вовлечения в производство отечественных марганцевых руд необходимо решить целый ряд вопросов, связанных с обогащением бедных марганцевых руд, разработкой эффективных технологий выплавки марганцевых ферросплавов из концентратов, получаемых в результате обогащения этих руд.

Ситуация с импортозависимостью российской металлургии от марганцевой продукции остается напря-

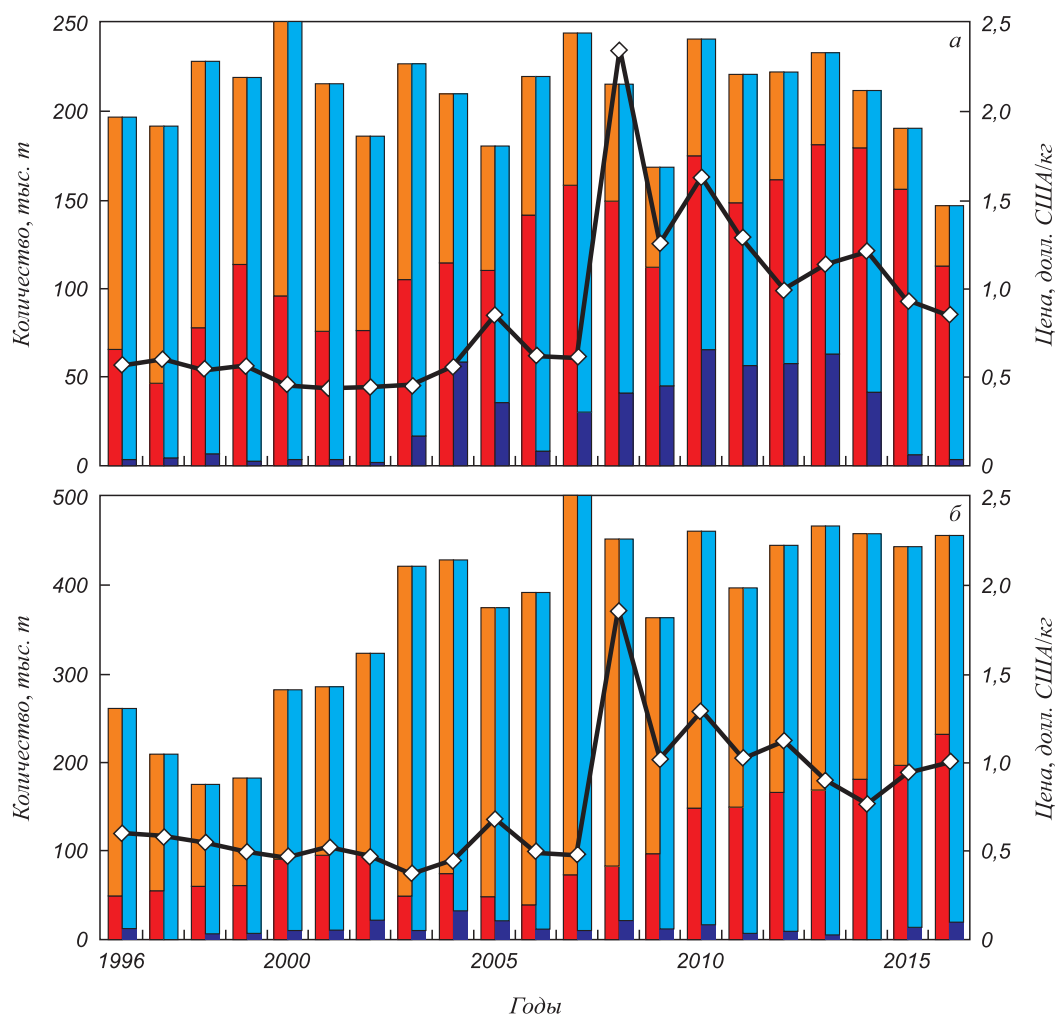


Рис. 5. Динамика потоков марганцевых ферросплавов в РФ и мировые цены на них (ромб) :
а – ферромарганец; б – силикомарганец; ■ – производство; ■ – импорт; ■ – экспорт; ■ – нетто-потребление

Fig. 5. Dynamics of flows of manganese ferroalloys in Russia and world prices for them (rhombus) :
а – ferromanganese; б – silicomanganese; ■ – production; ■ – import; ■ – export; ■ – net consumption

женной. Основные направления решения этой проблемы:

- вовлечение в промышленное производство отечественных марганцевых руд;
- разработка эффективных технологий дефосфорации марганецсодержащих продуктов;
- вовлечение в переработку техногенных отходов ферросплавного производства (шламов обогащения и печных шлаков, пылей газоочистки).

Наиболее простое решение вопроса вовлечения в производство отечественных марганцевых руд – это подшихтовка их к богатым низкофосфористым импортным рудам при выплавке ферросплавов, поскольку отечественные руды бедные и фосфористые. Однако с экономической и стратегической точек зрения необходимо разрабатывать эффективные технологические схемы, позволяющие выплавлять стандартные марганцевые ферросплавы только из отечественных марганцевых руд. Ведутся работы по созданию технологических схем освоения марганцевых месторождений РФ [11].

Из разведанных отечественных марганцевых месторождений Усинское месторождение наиболее перспективное. Руды Усинского месторождения характеризуются сравнительно низким содержанием марганца (15 – 25 %) и повышенным содержанием фосфора (0,2 – 0,3 %). Разработана перспективная технологическая схема обогащения усинских руд, включающая использование рентгенометрической сепарации (PPC) [12]. Данная схема позволяет получить концентраты, состав которых приведен в табл. 6.

Предложена технологическая схема получения всей гаммы марганцевых ферросплавов из концентратов, получаемых при обогащении марганцевых руд Усинского месторождения с использованием PPC (рис. 6).

Отечественные марганцевые руды, как отмечено выше, характеризуются повышенным содержанием фосфора (0,2 – 0,8 %). Одним из наиболее важных показателей марганцевых руд и концентратов является модуль фосфора (P/Mn), который должен быть $\leq 0,003$. Для выплавки стандартных марганцевых ферросплавов

Таблица 6

Химический состав концентратов, %

Table 6. Chemical composition of the concentrates, %

Компоненты	Концентрат							
	карбонатный					оксидный		
	I сорт (PPC)	II сорт (PPC)	отсадка			крупный (промывка)	отсадка	
	20 – 100 мм	20 – 100 мм	10 – 20 мм	4 – 10 мм	0 – 4 мм	10 – 80 мм	4 – 10 мм	0 – 4 мм
Mn	36,00	25,20	24,00	23,50	23,30	35,83	35,00	34,20
P	0,16	0,15	0,14	0,14	0,14	0,216	0,220	0,230
Fe	3,20	3,30	3,60	5,00	5,00	11,07	10,90	10,54
SiO ₂	9,49	13,32	13,87	14,17	14,29	12,72	13,20	13,60
CaO	7,44	14,95	15,70	16,03	16,17	2,36	2,36	2,40
MgO	1,76	2,85	2,99	3,05	3,08	1,52	1,51	1,48
Al ₂ O ₃	1,18	1,40	1,47	1,50	1,52	1,84	1,89	1,99
S	0,80	0,90	0,90	0,96	0,96	0,08	0,09	0,09
П.п.п.	26,58	27,20	26,30	25,95	25,73	7,72	9,49	10,70

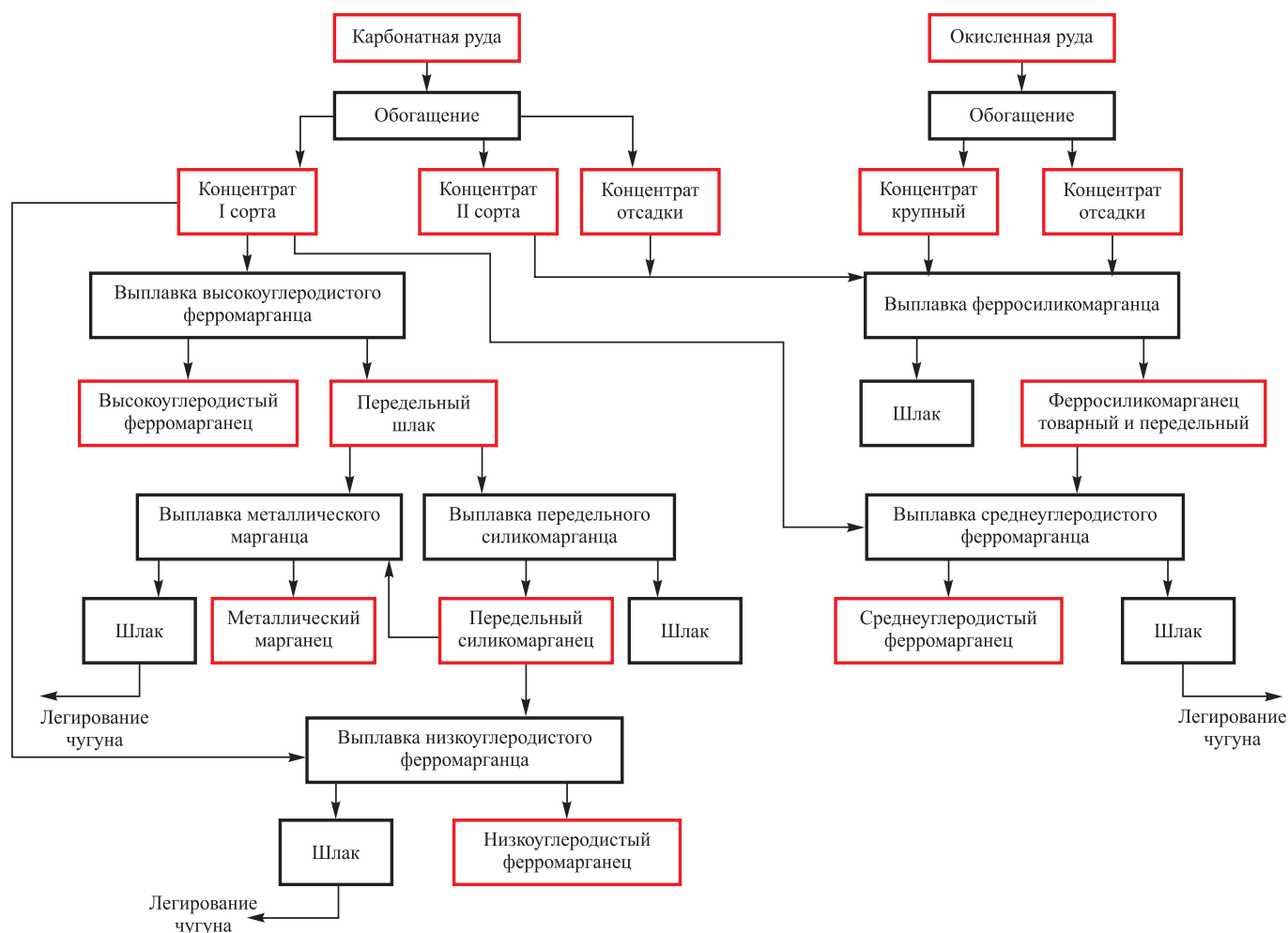


Рис. 6. Технологическая схема выплавки марганцевых ферросплавов из руд Усинского месторождения

Fig. 6. Technological scheme of smelting manganese ferroalloys from ores of the Usinsky deposit

с требуемым содержанием фосфора отечественное марганецсодержащее сырье необходимо подвергать дефосфорации. Существует достаточно большое количество способов дефосфорации марганецсодержащих продуктов: гидрометаллургических, химических и пирометаллургических. Из гидрометаллургических способов наиболее отработаны и прошли опытную проверку содовый [13] и гаусманитовый [14].

В основу содового способа [13] положен обжиг марганецсодержащего сырья с карбонатом натрия и последующим выщелачиванием фосфора и частично оксида кремния. Этим способом возможно улучшить качество марганцевых концентратов по содержанию фосфора и оксида кремния, однако его можно использовать только для товарных концентратов, поскольку содержание марганца в процессе обработки остается практически на том же уровне.

Суть гаусманитового способа [14] состоит в том, что гаусманит Mn_3O_4 , образующийся после обжига марганцевого концентрата, слабо растворим в разбавленных кислотах. Гаусманитовый способ разработан применительно к дефосфорации карбонатных марганцевых руд. Недостатком гаусманитового способа является нерешенность проблемы утилизации азотнокислотных растворов, образующихся при выщелачивании обожженных концентратов.

Из химических методов промышленную проверку прошел дитионатный способ [15]. Процесс состоит в том, что выщелачивание марганецсодержащих продуктов ведут сернистым газом в среде, содержащей дитионат кальция (CaS_2O_6). Главное преимущество способа состоит в том, что этим методом можно дефосфорировать и обогащать, наряду с товарными рудами и концентратами, бедные по содержанию марганца продукты: бедные руды, отвальные шламы гравитационного обогащения руд, шлаки и другие некондиционные марганецсодержащие продукты. Получаемый концентрат содержит, %: 55 – 62 Mn; 0,010 – 0,017 P; 1 – 2 Fe; 1,5 – 2,5 SiO_2 ; 6 – 8 CaO; 2 – 4 S. Извлечение марганца в концентрат составляет 90 – 95 %. Высокое содержание серы в концентрате не является препятствием для его использования при выплавке высокосортных марганцевых ферросплавов, поскольку сера ограниченно растворима в марганце и его сплавах. Концентрат наиболее рационально брикетировать методом жесткой вакуумной экструзии [16]. Дитионатный способ единственный, который позволяет из бедных фосфористых марганецсодержащих продуктов получать высокосортные богатые по марганцу концентраты.

Опытнo-промышленный комплекс по обогащению и дефосфорации отвальных шламов дитионатным способом производительностью 25 тыс. т концентрата в год был построен на Марганецком горно-обогатительном комбинате (г. Марганец, Украина). Комплекс вошел в строй в 1986 г. Концентрат, полученный на этом комп-

лексе, был успешно использован при выплавке марганцевых ферросплавов в промышленных условиях.

Промышленно освоен и используется с 50-х годов XX в. электрометаллургический способ дефосфорации марганецсодержащих продуктов [17].

Сущность этого способа состоит в селективном восстановлении из расплавов марганцевых руд и концентратов фосфора и железа твердым углеродом с переводом их в попутный отвальный металл. Однако, несмотря на ограниченное количество углерода в шихте, частично восстанавливается и марганец, хотя он и обладает большим сродством к кислороду, чем фосфор и железо. Потери с попутным отвальным металлом до 15 – 20 % марганца, содержащегося в исходной шихте, являются существенным недостатком данного способа.

Описанные выше способы не позволяют считать решенной проблему дефосфорации марганецсодержащих продуктов. Создание эффективных способов их дефосфорации остается первостепенной задачей в связи с проблемой вовлечения в производство высокофосфористых отечественных марганцевых руд.

Приведем несколько перспективных исследовательских работ по совершенствованию процессов в области металлургии марганца. В настоящее время ведутся исследования нового способа дефосфорации марганецсодержащих продуктов, в котором восстановителем фосфора из оксидного расплава является газообразный монооксид углерода [18]. В этом методе, с целью дефосфорации расплавов марганцевых руд и концентратов и устранения потерь марганца с попутным металлом, фосфор восстанавливают из оксидного расплава не твердым углеродом, а газообразным монооксидом углерода (CO), который продувают через оксидный марганецсодержащий расплав. Восстановленный газообразный фосфор (P_2) улетает с отходящими газами. В результате продувки марганецсодержащего оксидного расплава монооксидом углерода можно получать обесфосфоренный продукт.

Описанный выше процесс дефосфорации марганецсодержащих продуктов исследован экспериментально. Дефосфорации подвергали оксидный марганцевый концентрат трех составов (табл. 7).

Марганцевый концентрат расплавляли в печи сопротивления в тиглях из Al_2O_3 . После расплавления концентрата расплав продували монооксидом углерода. В процессе продувки расплав выдерживали при постоянной температуре. Эксперименты проводили в температурном интервале 1400 – 1560 °C. Расход монооксида углерода в экспериментах составлял от 0,5 до 1,2 л/мин. Время продувки варьировали от 4 до 20 мин. Реакция взаимодействия газообразного монооксида углерода с оксидом фосфора, растворенным в марганецсодержащем расплаве, получает существенное развитие. В результате продувки оксидного марганецсодержащего расплава газообразным монооксидом углерода существенно снизилось содержание фосфо-

Таблица 7

Химический состав оксидного марганецсодержащего концентрата, %

Table 7. Chemical composition of the oxide manganese-containing concentrate, %

Состав концентрата	Mn	MnO	FeO	P	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	P/Mn
I	35,36	45,65	5,45	0,160	7,10	4,67	0,68	0,71	0,0045
II	37,17	47,98	2,57	0,179	7,25	5,69	0,60	0,65	0,0048
III	36,83	47,54	0,98	0,169	7,09	4,97	0,42	0,23	0,0046

ра в расплаве, степень дефосфорации составила от 70 до 90 % (рис. 7).

Способ дефосфорации марганецсодержащих продуктов монооксидом углерода по сравнению со способом дефосфорации твердым углеродом не только устранит потери марганца с попутным отвальным металлом, но и позволит существенно оптимизировать процессы выплавки марганцевых ферросплавов.

При производстве марганцевых ферросплавов от руды до готовых сплавов теряется порядка 50 % марганца, добытого из недр, образуется большое количество побочных продуктов: шлаки, отсеы мелких фракций рудного сырья и готовой продукции, шламы, пыли и ряд других материалов, использование и переработка которых позволяют не только сократить потребление исходного минерального сырья, но и повысить эффективность основного производства, уменьшить загрязнение окружающей среды и, следовательно, снизить как затраты предприятия в виде экологических платежей за выбросы и размещение отходов, так и государственные издержки, связанные с природоохранными мероприятиями.

Вовлечение в технологические процессы получения ферросплавов отходов производства вызовет ухудшение металлургической ценности рудной составляющей

шихты, поэтому рациональное использование такого приема должно основываться на достоверной металлургической оценке используемого рудного и техногенного сырья, конечной шихты. Основными принципами работы с техногенными отходами должны быть:

- максимальное улавливание и сбор техногенных отходов (шламов, шлаков, пылей);
- получение достоверной информации о комплексе их физико-химических характеристик (химический и фракционный состав, влажность и др.);
- определение рационального способа вовлечения каждого техногенного материала в производство.

Доизвлечение марганца из техногенных отходов, совершенствование технологических процессов выплавки марганцевых ферросплавов – путь к повышению сквозного извлечения марганца. Так с отвальными шламами процесса обогащения марганцевых руд теряется до 20 % марганца, содержащегося в сырой руде. Для извлечения марганца из шламов наиболее перспективно использовать дитионатный способ обогащения и дефосфорации марганецсодержащих продуктов [15].

При выплавке рафинированного ферромарганца и металлического марганца значительное количество марганца теряется с отвальными шлаками. Извлечение марганца в металл в этих процессах составляет не более 65 – 70 %. Одним из возможных путей извлечения марганца из шлака может являться процесс восстановления марганца при взаимодействии шлака с металлическим расплавом, содержащим элементы, обладающие высоким сродством к кислороду. В качестве металлического расплава, наиболее подходящего для проведения такого процесса, можно рассматривать чугун, содержащий углерод, имеющий большее сродство к кислороду, чем марганец. Разработан способ легирования чугуна марганцем, содержащимся в шлаках процессов выплавки рафинированного ферромарганца и металлического марганца [19]. Способ заключается в следующем. Чугун из доменной печи выпускают в ковш, на дно которого предварительно засыпают в необходимом количестве отвальный шлак, исключив при этом из шихты для выплавки чугуна марганецсодержащее сырье. Проведенные исследования показали, что в чугун восстанавливается до 75 % марганца, содержащегося в шлаке.

В качестве нового вида марганцевого сырья можно рассматривать конкреции [20, 21]. В акватории Финско-

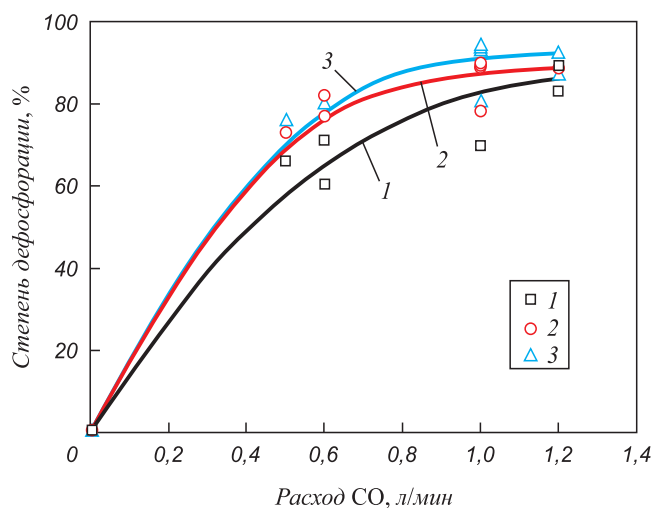


Рис. 7. Зависимость степени дефосфорации от расхода монооксида углерода

Fig. 7. Dependence of the dephosphorization degree on the consumption of carbon monoxide

го залива Балтийского моря (Ленинградская область) в едином поле распространения железомарганцевых конкреций учтены в качестве месторождений четыре их компактные залежи (рис. 8).

Суммарные запасы этих месторождений составляют около 1 % запасов марганцевых руд РФ [5]. Средний химический состав конкреций, %: 21,09 Mn; 13,78 Fe; 2,56 P; 21,64 SiO₂; 2,06 CaO; 8,71 Al₂O₃; 3,41 MgO; 0,56 TiO₂; 1,32 Na₂O; 2,06 K₂O.

Конкреции залегают на небольшой глубине – от 30 до 70 м (в отличие от океанических конкреций, залегающих на глубине более 4 км). Концентрация марганца в конкрециях зависит от их гранулометрического состава. Большая часть марганца концентрируется в конкрециях диаметром более 5 мм (17 – 25 % Mn), для класса менее 5 мм концентрация марганца снижается до 5 – 8 %. Конкреции характеризуются высоким содержанием фосфора – до 2 %. Наиболее рационально обогащать и дефосфорировать конкреции дитионатным способом [15].

Выводы. С целью значительного повышения полезного использования марганца следует извлекать марганец из шламов гравитационного обогащения. Наиболее перспективно для этого применять дитионатный способ обогащения и дефосфорации марганецсодержащих продуктов [15].

Высокоуглеродистый ферромарганец по действующей технологии выплавляют карботермическим процессом [22]. При выплавке этого сплава из оте-

чественных бедных по марганцу концентратов, характеризующихся повышенным содержанием фосфора, проблема получения стандартных по содержанию фосфора сплавов может быть решена в результате подшихтовки к обычным концентратам дитионатного концентрата. Это позволит выплавлять высокоуглеродистый ферромарганец эффективным бесфлюсовым способом с получением стандартного сплава и низкофосфористого передельного марганецсодержащего шлака [23].

Ферросиликомарганец по действующей технологии выплавляют карботермическим процессом [22]. При выплавке этого сплава из отечественных бедных по марганцу концентратов, характеризующихся повышенным содержанием фосфора, проблема получения стандартных по содержанию фосфора сплавов может быть решена в результате подшихтовки к обычным концентратам передельного шлака бесфлюсовой плавки высокоуглеродистого ферромарганца.

Рафинированный ферромарганец и металлический марганец по действующей технологии выплавляют силикотермическим методом периодическим процессом. Эти сплавы можно выплавлять из шихты, рудная часть которой состоит из передельного шлака бесфлюсовой плавки высокоуглеродистого ферромарганца [24] или дитионатного концентрата или их смеси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Елкин К.С., Голодова М.А. Ферросплавное производство и тенденции развития в мире и России // Тр. XXI Междунар. науч.-практич. конф. «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Металлургия – 2019). – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2019. Ч. 1. С. 20 – 32.
2. Ферросплавы. Цветные металлы. Справочник. – М.: ЗАО «Единые Ферросплавные Системы», 2006. – 48 с.
3. Краткая история легирования стали и ферросплавного производства. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.urgm-company.ru/upload/iblock/55d/55d37dd1eba407afd28de86efd312fd6.pdf.
4. Боярко Г.Ю., Хатьков В.Ю. Товарные потоки ферросплавов в России // Черные металлы. 2018. № 3. С. 60 – 69.
5. Марганцевые руды // Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2018 году». – М.: ФГБУ «ВИМС», 2019. С. 105 – 113.
6. Марганцевые руды // Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2015 году». – М.: ФГБУ «ВИМС», 2016. С. 101 – 108.
7. Марганец / К.Н. Трубецкой, В.А. Чантурия, А.Е. Воробьев и др. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1999. – 271 с.
8. Тигунов Л.П., Смирнов Л.А., Менаджиева Р.А. Марганец: геология, производство, использование. – Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2006. – 84 с.
9. Импорт в Россию: марганцевые руды. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru-stat.com/date-M201301-201612/RU/import/world/052602>.
10. Марганцевые руды // Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2013 году». – М.: ООО «Минерал-Инфо», 2014. С. 137 – 142.
11. Полулях Л.А., Дашевский В.Я., Юсфин Ю.С. Производство марганцевых ферросплавов из отечественных марганцевых руд // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 9. С. 5 – 12.

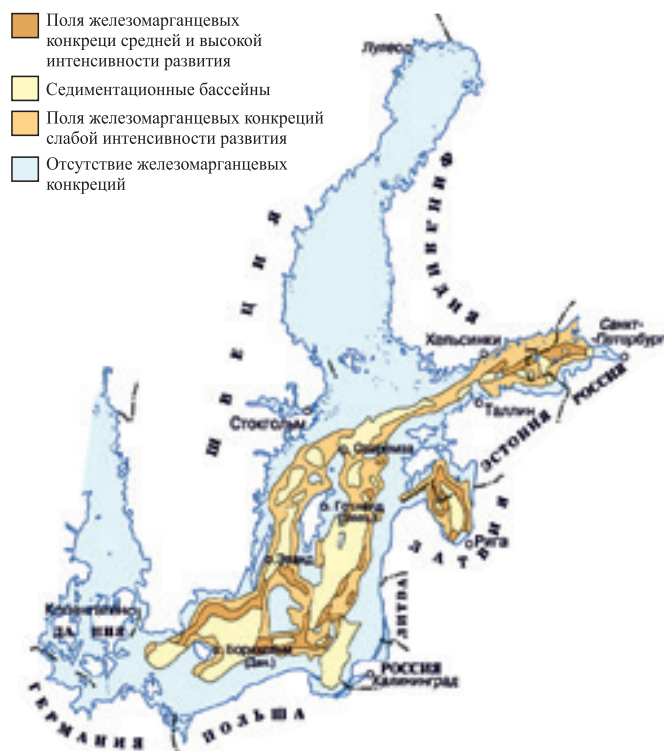


Рис. 8. Распространение железомарганцевых конкреций в Балтийском море

Fig. 8. Distribution of ferromanganese nodules in the Baltic Sea

12. Технологический регламент для проекта «Строительство Усинского ГОКа: дробильно-обогатительная фабрика». – Екатеринбург: ОАО «Уралмеханобр», 2008. – 64 с.
13. Хитрик С.И., Гасик М.И., Кучер А.Г. Получение низкофосфористых марганцевых концентратов. – Киев: Изд-во «Техніка», 1969. – 200 с.
14. Осокина Г.Н., Хоревич В.М., Корепина С.И. и др. Гаусманитовый метод обогащения и дефосфорации марганцевых концентратов // Физико-химические основы металлургии марганца. – М.: Наука, 1977. С. 84 – 89.
15. Безъязыков Б.Н. Исследование и разработка дитионатного процесса переработки бедных марганцевых продуктов. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Кривой Рог: Механобрчермет, 1971. – 23 с.
16. Бижанов А.М., Подгородецкий Г.С., Курунов И.Ф. и др. Опыт применения брикетов экструзии (брэсков) для выплавки ферросиликомарганца // Металлург. 2013. № 2. С. 44 – 49.
17. Гасик М.И. Марганец. – М.: Металлургия, 1992. – 608 с.
18. Пат. 2594997 РФ. Способ дефосфорации марганцевых руд и концентратов / В.Я. Дашевский, Ю.С. Юсфин, Л.А. Полулях и др. Бюл. изобретений. 2016. № 23.
19. Пат. 2458994 РФ. Способ легирования чугуна марганцем / В.Я. Дашевский, Ю.С. Юсфин, С.В. Киреев и др. Бюл. изобретений. 2012. № 23.
20. К освоению месторождений марганцевых конкреций в Балтийском море // БИКИ. 1986. № 114. С. 6.
21. Русаков М.Р., Глазатов А.Н., Ткачук А.В. Переработка высокофосфористых железомарганцевых конкреций Балтийского моря с использованием электротермии // Электromеталлургия. 2004. № 2. С. 21 – 26.
22. Гасик М.И., Лякишев Н.П. Теория и технология электromеталлургии ферросплавов. – М.: Интермет Инжиниринг, 1999. – 764 с.
23. А. с. 1002390 СССР. Шихта для выплавки низкофосфористого углеродистого ферромарганца / В.Я. Дашевский, Я.В. Дашевский, Н.В. Матвеев и др. Бюл. изобретений. 1983. № 9.
24. А. с. 1254044 СССР. Шихта для выплавки металлического марганца / В.Я. Дашевский, В.Я. Щедровицкий, Я.В. Дашевский и др. Бюл. изобретений. 1986. № 32.

Поступила в редакцию 18 февраля 2020 г.

После доработки 18 февраля 2020 г.

Принята к публикации 3 августа 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 8, pp. 579–590.

PROBLEM OF MANGANESE IN RUSSIAN METALLURGY

V.Ya. Dashevskii^{1,3}, A.A. Aleksandrov¹, V.I. Zhuchkov²,
L.I. Leont'ev^{2,3,4}

¹ Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, Moscow, Russia

² Institute of Metallurgy UB RAS, Ekaterinburg, Russia

³ National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS), Moscow, Russia

⁴ Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences), Moscow, Russia

Abstract. Ferrous metallurgical industry is the main consumer of manganese. The production volume of manganese ferroalloys in the world is approximately 1 % of steel production. After the collapse of the Soviet Union, Russian Federation found itself without any manganese ore base. At present, only high-carbon ferromanganese and ferrosilicomanganese are smelted from imported ore in Russia in a limited quantity. The mineral and raw base of manganese ores in Russia is quite large: the balance reserves of manganese ores are about 230 million tons (approximately 2 % of the world), forecast resources – more than 1 billion tons. Quality of the manganese ores is lower than the manganese ores of most major producing countries. Average manganese content in Russian ores is 9 – 23 %. Basis of mineral and raw base of these manganese ores are carbonate ores, share of which is more than 77 %. Manganese ore mining in Russia is sporadic and does not exceed 66 thousand tons per year. Demand of Russian ferroalloy plants, producing manganese ferroalloys, in manganese ores and concentrates is covered by imports. The problem of accelerating the creation of domestic manganese ore base from the position of economic security seems to be very important. It is necessary to solve a number of issues related to the enrichment of poor manganese ores, development of effective technologies for manganese ferroalloys smelting from concentrates obtained after the enrichment of these ores, as well as creation of more advanced methods of manganese concentrates dephosphorization. In the production of manganese ferroalloys from ore to finished alloys, about 50 % of manganese mined from the subsoil is lost; a large number of by-products are formed (sludges of enrichment, slags, screenings of small fractions of ore raw materials and finished products, sludges of smelting process and dust). The use and processing of them allow not only to reduce the consumption of initial mineral

raw materials, but also to increase the efficiency of main production and to reduce environmental pollution. Additional extraction of manganese from industrial wastes and improvement of the technological processes for manganese ferroalloys smelting are the ways to increase the through extraction of manganese.

Keywords: manganese, mineral resources base, smelting of manganese ferroalloys, dephosphorization, loss of manganese, nodules.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-8-579-590

REFERENCES

1. Rozhikhina I.D., Nokhrina O.I., Elkin K.S., Golodova M.A. Ferroalloy production: the state and trends of development in the world and in Russia. In: *Trudy XXI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo" (Metallurgiya – 2019)* [Proc. of the XXI Int. Sci. and Pract. Conf. "Metallurgy: Technologies, Innovations, Quality" (Metallurgy – 2019). Part 1]. Novokuznetsk: SibGIU, 2019, pp. 20–32. (In Russ.).
2. *Ferrosplavy. Tsvetnye metally. Spravochnik* [Ferroalloys. Non-ferrous metals. Handbook]. Moscow: ZAO Edinye Ferrosplavnyye Sistemy, 2006, 48 p. (In Russ.).
3. *Kratkaya istoriya legirovaniya stali i ferrosplavnogo proizvodstva* [A brief history of alloying of steel and ferroalloy production]. Electronic resource. Available at URL: www.urmc-company.ru/upload/iblock/55d/55d37dd1eba407afd28de86efd312fd6.pdf (In Russ.).
4. Boyarko G.Yu., Khat'kov V.Yu. Commercial streams of ferroalloys in Russia. *Chernye metally*. 2018, no. 3, pp. 60–69. (In Russ.).
5. Manganese ores. In: *Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2018 godu"* [State report "On the State and Use of Mineral and Raw Resources of the Russian Federation in 2018"]. Moscow: VIMS, 2019, pp. 105–113. (In Russ.).
6. Manganese ores. In: *Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2018 godu"* [State report "On the State and Use of Mineral and Raw Resources of the Russian Federation in 2015"]. Moscow: VIMS, 2016, pp. 101–108. (In Russ.).
7. Trubetskoi K.N., Chanturiya V.A., Vorob'ev A.E. etc. *Marganets* [Manganese]. Moscow: Izd. Akademii gornykh nauk, 1999, 271 p. (In Russ.).

8. Tiginov L.P., Smirnov L.A., Menadzhieva R.A. *Marganets: geologiya, proizvodstvo, ispol'zovanie* [Manganese: geology, production, use]. Ekaterinburg: Izd-vo AMB, 2006, 84 p. (In Russ.).
 9. *Import v Rossiiu: margantsevyye rudy* [Import to Russia: manganese ores]. Electronic resource. Available at URL: <https://ru-stat.com/date-M201301-201612/RU/import/world/052602> (In Russ.).
 10. Manganese ores. In: *Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2013 godu* [State report "On the State and Use of Mineral and Raw Resources of the Russian Federation in 2013]. Moscow: Mineral-Info, 2014, pp. 137–142. (In Russ.).
 11. Polulyakh L.A., Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S. Production of manganese ferroalloys from domestic manganese ores. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 9, pp. 5–12. (In Russ.).
 12. *Tekhnologicheskii reglament dlya proekta "Stroitel'stvo Usinskogo GOKa: drobil'no-obogatitel'naya fabrika"* [Technological regulations for the project "Construction of the Usinsky Mining and Processing Plant: Crushing and Processing Factory"]. Ekaterinburg: OAO Uralsmekhanobr, 2008, 64 p. (In Russ.).
 13. Khitrik S.I., Gasik M.I., Kucher A.G. *Poluchenie nizkofosforistykh margantsevykh kontsentratorov* [Obtaining low phosphorous manganese concentrates]. Kiev: Tekhnika, 1969, 200 p. (In Russ.).
 14. Osokina G.N., Khorevich V.M., Korepina S.I. etc. Gausmanite method of enrichment and dephosphorization of manganese concentrates. In: *Fiziko-khimicheskie osnovy metallurgii margantsa* [Physicochemical basics of manganese metallurgy]. Moscow: Nauka, 1977, pp. 84–89. (In Russ.).
 15. Bez'yazykov B.N. *Issledovanie i razrabotka ditionatnogo protsessa pererabotki bednykh margantsevykh produktov. Avtoreferat diss. ... kand. tekhn. nauk* [Research and development of the dithionate process for processing of poor manganese products. Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Krivoi Rog: Mekhanobrchermet, 1971, 23 p. (In Russ.).
 16. Bizhanov A.M., Podgorodetskii G.S., Kurunov I.F., Dashevskii V.Ya., Farnasov G.A. Experience with the use of extrusion briquettes (brex) to make ferrosilicomanganese. *Metallurgist*. 2013, vol. 57, no. 1-2, pp. 105–112.
 17. Gasik M.I. *Marganets* [Manganese]. Moscow: Metallurgiya, 1992, 608 p.
 18. Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S., Polulyakh L.A. etc. *Sposob defosforatsii margantsevykh rud i kontsentratorov* [Method of dephosphorisation of manganese ores and concentrates]. Patent RF no. 2594997. *Byulleten' izobretenii*. 2016, no. 23. (In Russ.).
 19. Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S., Kireev S.V. *Sposob legirovaniya chuguna margantsem* [Method of cast iron alloying with manganese]. Patent RF no. 2458994. *Byulleten' izobretenii*. 2012, no. 23. (In Russ.).
 20. Development of manganese nodule deposits in the Baltic Sea. *BIKI*. 1986, no. 114, p. 6. (In Russ.).
 21. Rusakov M.R., Glazatov A.N., Tkachuk A.V. Processing of high-phosphorus ferromanganese nodules of the Baltic Sea using electrothermics. *Elektrometallurgiya*. 2004, no. 2, pp. 21–26. (In Russ.).
 22. Gasik M.I., Lyakishev N.P. *Teoriya i tekhnologiya elektrometallurgii ferrosplavov* [Theory and technology of ferroalloys electrometallurgy]. Moscow: Intermet Inzhiniring, 1999, 764 p. (In Russ.).
 23. Dashevskii V.Ya., Dashevskii Ya.V., Matveenko N.V. etc. *Shikhta dlya vyplavki nizkofosforistogo uglerodistogo ferromargantsa* [Charge for melting low-phosphorus carbon ferromanganese]. Certificate of authorship USSR no. 1002390. *Byulleten' izobretenii*. 1983, no. 9. (In Russ.).
 24. Dashevskii V.Ya., Shchedrovitskii V.Ya., Dashevskii Ya.V. *Shikhta dlya vyplavki metallichesкого margantsa* [Charge for melting metal manganese]. Certificate of authorship USSR no. 1254044. *Byulleten' izobretenii*. 1986, no. 32. (In Russ.).
- Funding.** The work was financially supported by the Fundamental Research Program of RAS Presidium No. 22P.
- Information about the authors:**
- V.Ya. Dashevskii**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies", Head of the Laboratory (vdashev@imet.ac.ru)
- A.A. Aleksandrov**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher (a.a.aleksandrov@gmail.com)
- V.I. Zhuchkov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher (ntm2000@mail.ru)
- L.I. Leont'ev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician, Adviser of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher (leo@presidium.ras.ru)

Received February 18, 2020

Revised February 18, 2020

Accepted August 3, 2020