

удк 669.168

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РОССИЙСКОГО РУДНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОСПЛАВОВ*

Жучков В.И.¹, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник
Леонтьев Л.И.^{1,2,3}, академик РАН, советник, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник
Заякин О.В.¹, д.т.н., главный научный сотрудник (zferro@mail.ru)

¹Институт металлургии УрО РАН
 (620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
 (119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

³Президиум РАН
 (119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 32а)

Аннотация. Основной проблемой ферросплавного производства России является обеспеченность рудным сырьем. Только немногие виды сплавов выпускаются на отечественных заводах из собственного сырья (ферросилиций, ванадиевые сплавы). Основное количество ферросплавов либо завозится из-за рубежа, либо выплавляется из импортного сырья. В России сложилась применительно к ферросплавному производству сложная ситуация: сырьевая импортная зависимость производства при наличии собственной крупной, хотя и не вполне качественной, в соответствии с мировыми стандартами, минерально-сырьевой базы. Одной из главных причин такого положения (помимо организационных и финансовых) является устоявшийся консервативный подход к технологии выплавки ферросплавов с применением однотипного рудного сырья и получением стандартной гостированной продукции. Отечественное ферросплавное сырье, как правило, отличается невысоким качеством. В нем низкое содержание ведущих элементов (марганцевые, хромовые руды), высокое содержание фосфора (марганцевые, ниобиевые руды), серы (марганцевые руды). Это требует проведения комплекса физико-химических исследований и создания ряда новых альтернативных технологий. Показано, что из нетрадиционного отечественного рудного сырья на основе глубоких физико-химических и технологических изысканий реально создавать новые процессы и комбинации разных видов ферросплавов, не уступающих по своим технико-экономическим показателям продукции, полученной из импортных материалов. Для успешного решения проблемы обеспечения ферросплавной отрасли промышленности отечественным рудным сырьем необходимо объединить изыскания ученых, геологов, обогащателей и металлургов.

Ключевые слова: рудное сырье, ферросплав, сталь, металлургия, физико-химические характеристики, технология, селективное восстановление.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-3-4-211-217

Ферросплавное производство является важнейшей отраслью металлургии, существенно влияющей на ее развитие, поскольку обработка жидкого металла ферросплавами остается одним из основных методов воздействия на качество и свойства стали, чугуна и цветных сплавов [1 – 3].

Объемы выплавляемой стали и некоторых сплавов определяют масштабы выплавки ферросплавов [4 – 6].

Ужесточение требований к качеству стали приводит к увеличению выпуска легированных марок, а, следовательно, повышению удельного расхода ферросплавов. Средний мировой расход всех ферросплавов на единицу стали в 2001 г. составил 22,5 кг/т стали, в 2012 г. – 27,1 кг/т, а в 2015 г. ~ 30 кг/т.

В настоящее время в мире производится около 40 млн т различных ферросплавов, в России ~ 2 млн т.

Структура производства ферросплавов в мире и России различна (рис. 1). Мировая структура производства

ферросплавов за последние десятилетия не претерпела существенных изменений и соответствует их мировому потреблению. В мире на первом месте по объемам производства находятся марганцевые сплавы. Потребление ферросплавов в отдельных странах сбалансировано их

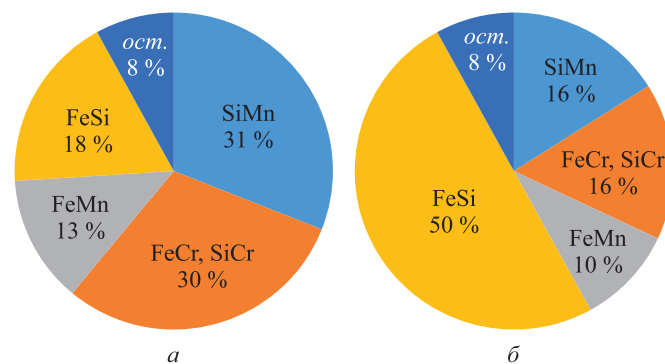


Рис. 1. Структура производства ферросплавов в мире (а) и России (б)

* Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН в рамках Программы фундаментальных исследований государственных академий.

экспортом и импортом, а производство зависит в основном от имеющейся минерально-сырьевой базы [7, 8].

Структура производства ферросплавов в РФ также предопределена запасами отечественного сырья. Больше всего в стране выпускается кремниевых сплавов, не имеющих ограничений в сырьевой базе (49,4 %), затем марганцевых (25,8 %) и хромовых (16,4 %) ферросплавов. Остальные ферросплавы составляют 8,4 % производства [9].

Кроме ферросплавов «большой» группы (марганцевые, хромовые, кремниевые), имеются ферросплавы «малой» группы, к которым относятся ванадиевые, ниобиевые, молибденовые, титановые и др.

Основной проблемой ферросплавного производства России является обеспеченность рудным сырьем. Только немногие виды сплавов выпускаются на отечественных заводах из собственного сырья (ферросилиций, ванадиевые сплавы). Основное количество ферросплавов либо завозится из-за рубежа, либо выплавляется из импортного сырья.

Потребность в марганцевых ферросплавах сталеплавильщиков РФ в объеме ~650 тыс. т удовлетворяется примерно наполовину за счет импортных ферро- и силикомарганца, а остальное выплавляется в России из зарубежного сырья (ЮАР, Казахстан, Габон). В то же время на территории России имеются запасы марганцевых руд, составляющие по категориям $A + B + C_1 + C_2$ около 290 млн т, а прогнозные ресурсы более 1 млрд т.

Крупнейшим в России месторождением марганцевых руд является Усинское (Кемеровская обл.), а также Порожинское (Красноярский край), Парнокское (Республика Коми), Североуральское (Свердловская обл.). В Республике Саха обнаружены богатые (40 – 50 % Mn) сульфидные марганцевые руды [10]. Несмотря на то, что отечественные марганцевые руды в основном бедные и высокофосфористые, многочисленные лабораторные и промышленные исследования указывают на возможность их широкого использования для получения разных видов ферросплавов [11 – 13].

В отличие от марганцевых сплавов, Россия полностью обеспечивает себя хромовыми ферросплавами, полученными из зарубежного и российского сырья. Добыча хромовой руды в России находится на уровне 400 тыс. т в год при содержании Cr_2O_3 в концентрате 37 – 39 %. Балансовые запасы ($A + B + C_1 + C_2$) составляют 51,2 млн т, прогнозные ресурсы – более 540 млн т. Добыча руды осуществляется в настоящее время на месторождениях Сарановское (Урал, Пермская обл.) и Центральное («Полярный Урал», хромитоносный массив Рай-Из Ямало-Ненецкого АО).

Российский импорт хромовых концентратов колеблется в разные годы от 640 до 1110 тыс. т в год, из которых основная доля (94 %) приходится на поставки из Казахстана.

Отечественные хромовые руды беднее импортных (38 – 39 % против >45 % Cr_2O_3), но дешевле и могут

быть использованы в более значительных объемах. Руды разных месторождений отличаются по химическому, фазовому, гранулометрическому составу и требуют индивидуального технологического подхода при их использовании [14].

Производство ферросплавов «малой» группы также характеризуется наличием собственного рудного сырья и не удовлетворяющими собственную потребность объемами выплавки ферросплавов (с Nb, Mo, W и др.) [15, 16].

Так, по данным работы [15], в Иркутской области разведан крупный район месторождений ниобия (Белозиминское, Большетагнинское, Зашихинское и др.), в Читинской области – Катугинское, в Красноярском крае – Татарское, Чуктугонское и др. Все месторождения отличаются друг от друга вещественным составом, в который входят пирохлор, апатит, монацит, вермикулит и другие минералы.

Разведан ряд месторождений молибдена. В республике Бурятия – Ореkitканское и Мало-Ойногорское, в Читинской области – Бугдаинское, в Курганской – Коклановское и др.

Практически все эти месторождения не осваиваются. В России сложилась применительно к ферросплавному производству «парадоксальная ситуация: сырьевая импортная зависимость производства при наличии собственной крупной, хотя и не вполне качественной, в соответствии с мировыми стандартами, минерально-сырьевой базы» [16].

Одной из главных причин такого положения (помимо организационных и финансовых) является устоявшийся консервативный подход к технологии выплавки ферросплавов с применением однотипного рудного сырья и получением стандартной гостированной продукции.

Отечественное ферросплавное сырье, как правило, отличается низким качеством. В нем небольшое содержание ведущих элементов (марганцевые, хромовые руды), высокое содержание фосфора (марганцевые, ниобиевые руды) и серы (марганцевые руды). Это требует проведения комплекса физико-химических исследований и создания ряда новых альтернативных технологий.

Вместе с разработкой технологии, необходимо проводить научные исследования по изучению влияния на потребительские свойства ферросплавов их состава. Это связано с тем, что химический состав руд большинства новых месторождений не может обеспечить получение стандартных по всем элементам ферросплавов.

Ряд комплексных исследований по использованию нестандартного отечественного сырья был проведен в Институте металлургии УрО РАН [17, 18].

На основании проведенных исследований металлургических характеристик бедных хроморудных материалов, физико-химических свойств получаемых из них сплавов и промышленных научно-исследовательских работ сформулированы четыре основных направления,

которые позволяют ввести в эксплуатацию ряд известных, но не используемых (либо слабо используемых) ранее месторождений бедных хромовых руд.

- Селективное восстановление компонентов руды с разделением на металлический полупродукт с пониженным содержанием хрома (~20 %), пригодный для выплавки коррозионностойких марок сталей, и оксидный продукт с повышенным содержанием Cr_2O_3 , пригодный для выплавки высокосортных марок феррохрома.

- Рациональная подшихтовка бедных отечественных хромовых руд к богатым импортным с производством стандартных марок феррохрома [19].

- Получение новых сплавов, в том числе товарного высокоуглеродистого феррохрома с пониженным содержанием хрома, углерода, повышенным содержанием кремния и комплексных ферросплавов.

- Получение передельных сортов ферро- и силикохрома и их использование при выплавке рафинированных сортов феррохрома.

Все представленные направления исследованы и в различной степени доведены до промышленного опробования и внедрения [20].

Для получения и применения новых ферросплавов необходимо знать их служебные характеристики [21]. Изменять и совершенствовать характеристики сплавов следует на основе изучения их свойств, влияющих на степень усвоения ведущих компонентов сплавов.

Проведены исследования физико-химических характеристик хромовых ферросплавов и разработаны рациональные композиции их составов.

Полученные данные показали, что феррохром с повышенным содержанием кремния и пониженным содержанием хрома, а также комплексные сплавы с марганцем, получение которых возможно из бедного отечественного сырья, характеризуются более благоприятными физико-химическими свойствами по сравнению с традиционным высокопроцентным (~65 % Cr) феррохромом марки ФХ850 с точки зрения их применения для обработки стали. Повышение содержания кремния в высокоуглеродистом феррохроме до 10 % приводит, как показали лабораторные эксперименты, к увеличению степени усвоения хрома в сталь на 11 %. Помимо того, стандартный феррохром содержит менее 1 % кремния и используется только для легирования стали хромом. Предлагаемые сплавы могут содержать до 10 % Si и применяться не только для легирования, но и для частичного раскисления стали.

Перспективы использования бедного российского марганцевого рудного сырья во многом связаны с изучением возможности успешного применения ферро- и силикомарганца с пониженным содержанием марганца (40 – 55 %) и разработкой методов снижения в марганцевых ферросплавах фосфора. Подшихтовка бедной марганцевой руды к богатой также требует обоснованного научного подхода к выбору оптималь-

ного соотношения этих двух компонентов сырья с учетом составов образующихся оксидных и металлических расплавов (основности, вязкости, коэффициента распределения марганца), содержания фосфора в сплаве и т.д.

Значительные минерально-технологические отличия имеют российские источники сырья для получения сплавов ниобия.

По данным работы [16] перспективные промышленные источники этого сырья можно разделить на три группы.

- Объекты ускоренного освоения. К ним относятся: Татарское месторождение (Красноярский край), представленное промышленными минералами – пирохлором, апатитом и вермикулитом; Салланлатва (Мурманская обл.), минералы – луешит, барит.

- Объекты комплексного промышленного освоения с попутным пирохлором – Катугинское месторождение (Читинская область), минералы: гагаринит, пирохлор, колумбит, циркон, криолит.

- Объекты суперкрупные и крупные с ведущей пирохлоровой специализацией и природнолегированными Fe–Nb рудами. К ним относятся месторождения: Томторское (Саха-Якутия), минералы – пирохлор, монацит, крадаллит и др.; Большетагнинское (Иркутская обл.), минералы – пирохлор, апатит; Белозиминское (Иркутская обл.), минералы – пирохлор, апатит, колумбит, монацит.

Содержание Nb_2O_3 в рудах колеблется от 0,1 до 1 %, в них имеется также разное количество фосфора, тория и других элементов.

При обогащении руд этих месторождений получают концентраты разного состава, содержащие от 15 – 25 до 40 – 50 % Nb_2O_3 и до 10 – 15 % P.

В связи с этим возникают сложные задачи по разработке для каждого вида рудного сырья эффективных процессов получения ниобиевых ферросплавов приемлемого для сталеплавыльщиков состава.

Примером комплексного решения такой задачи стала переработка пирохлор-apatитовых концентратов, полученных из руд самого крупного в России (40 % запасов страны) Белозиминского месторождения. Руды этого месторождения содержат 0,54 % Nb_2O_3 , 12 – 14 % P_2O_5 , U + Th ~ 0,026 %. Схема обогащения этих руд предусматривает получение черного (10 – 20 % Nb_2O_3 , 8 – 18 % P_2O_5 , 15 – 25 % Fe) и кондиционного (~30 % Nb_2O_3 , 1 – 4 % P_2O_5 , ≤20 % Fe) концентратов. На всех стадиях обогащения дефосфорации до требуемых кондиций не происходит.

Задачей исследований, проведенных в ИМЕТ УрО РАН¹, являлась разработка физико-химических основ и технологии процесса получения ниобиевых ферросплавов рационального состава с глубокой дефосфорацией.

¹ В работе принимал участие Ю.Б. Мальцев.

На основании проведенных исследований был сделан вывод о том, что для получения комплексных ниобийсодержащих сплавов с глубокой дефосфорацией можно применять все три основных метода восстановления: карбо-, алюмо- и силикотермию. Карботермия дает возможность:

- вести плавки в мощных руднотермических печах;
- производить при получении высококремнистого сплава (до 25 – 35 % Si) глубокую дефосфорацию, не получая в сплаве тугоплавких карбидов ниобия;
- иметь достаточно высокую степень извлечения ниобия;
- проводить пироселекцию.

Алюминотермия наиболее пригодна для получения сплавов со значительным содержанием алюминия, позволяет достигать высокого извлечения ниобия и использовать самые дешевые и простые плавильные агрегаты (при внепечном процессе). Силикотермия может применяться при получении высококремнистых сплавов периодическим процессом с наведением шлаков любого состава и основности, что позволяет проводить глубокую дефосфорацию.

Дефосфорацию различных типов концентратов Белозиминского месторождения выполняли методами пироселекции, возгонки и переводом фосфора в высокоактивный шлак.

Процесс пироселекции опробовали в лабораторных и полупромышленных условиях для двух видов концентратов, в качестве восстановителей применялись углерод, кремний и алюминий. Во всех случаях с увеличением восстановителя от 50 до 175 % от стехиометрически необходимого количества на полное восстановление P и Fe в шлаке снижалось содержание P_2O_5 (на 80 – 90 %)

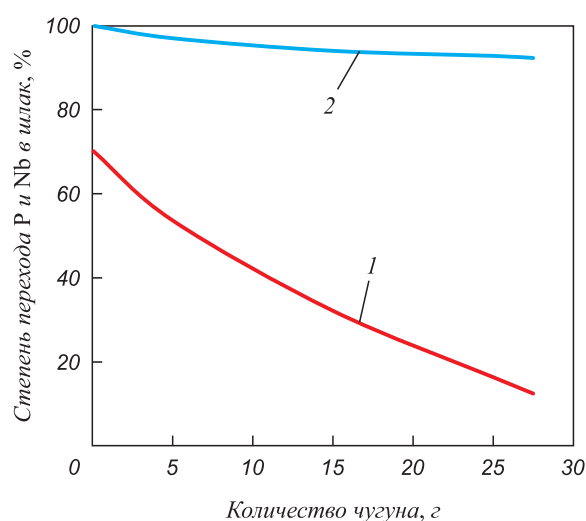


Рис. 2. Степень перехода фосфора (1) и ниобия (2) в шлак в зависимости от количества восстановителя (чугуна) в шихте при 1450 °C

и незначительно Nb_2O_3 (до 5 %). На рис. 2 показаны результаты экспериментов, проведенных в лабораторной печи при 1450 °C (восстановитель – чугун).

В целом эксперименты показали, что селективное восстановление фосфора из черновых концентратов можно производить до необходимых значений только при частичном переводе ниобия в металл или производить только частичную (на 40 – 60 %) дефосфорацию шлака при $Nb/P = 4 – 10$. В то же время селективное восстановление черновых концентратов можно рекомендовать для следующих целей:

- частичной дефосфорации сырья;
- обогащения сырья за счет удаления железа и фосфора;
- окускования сырья (получения кускового шлака).

Лабораторные опыты по удалению фосфора из сплавов системы Fe–Si–Nb–P в газовую фазу показали, что содержание кремния в сплаве значительно влияет на возгонку фосфора. Можно полагать, что при невысоких содержаниях кремния в расплаве (10 и 20 %) фосфор и железо образуют микрогруппировки, структура которых соответствует соединениям Fe_2P и FeP_2 . При этом концентрация фосфора на поверхности расплава и его переход в газовую фазу незначительны. С увеличением содержания кремния до 30 – 40 % количество комплексов со структурой ближнего порядка фосфидов железа снижается, а со структурой FeSi увеличивается. Вследствие указанной перестройки структуры расплава увеличивается активность фосфора, что приводит к резкому увеличению его испарения.

На рост активности фосфора и интенсификацию его возгонки влияет повышение температуры. Особенно резко возрастает количество испаряющегося фосфора при температурах более 1600 °C.

Проведенные полупромышленные плавки непрерывным бесшлаковым процессом на шихте, состоящей из кварцита, кокса и ниобиевого концентрата подтвердили, что при получении ферросиликониниобия происходит улучшение дефосфорации металла с увеличением содержания в нем кремния (рис. 3). Плавка должна проводиться в герметичной рудовосстановительной электропечи с улавливанием возгоняемого фосфора.

Установлено, что дефосфорация путем ассимиляции фосфора высокоосновными шлаками успешно производится для систем Fe–Si–P ($Si > 25\%$), Fe–Al–P ($Al > 28\%$) и Fe–Si–Al–P ($\sum Al + Si > 30\%$) при кратности шлака 4,0 – 4,4, основности $> 1,5$ и температуре 1700 – 1800 °C. В системе Fe–Si–P дефосфорация носит смешанный характер – часть фосфора ассимилируется шлаком, а часть барботирует через шлак и испаряется из-за опережения скорости накопления фосфора на границе металл – шлак над скоростью его взаимодействия со шлаковой фазой. Показано, что скорость возгонки фосфора тем меньше, чем выше активность CaO в шлаке и кратность (высота слоя) шлака. В системе

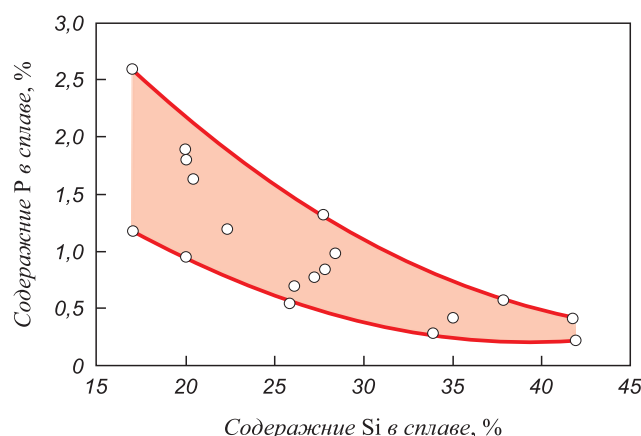


Рис. 3. Зависимость содержания фосфора от количества кремния в сплаве

Fig. 3. Dependence of phosphorus content on the amount of silicon in the alloy

Fe–Al–P переход фосфора в газовую фазу незначителен (3 – 6 %).

Ниобийсодержащие ферросплавы, предназначенные для микролегирования стали (основная масса этих сплавов) целесообразно получать с пониженной концентрацией ниобия (10 – 30 %), содержанием $\Sigma\text{Al} + \text{Si} = 30 - 40\%$ и отношением $\text{Nb}/\text{P} > 20$. Для определения рационального для сталеплавыльщиков состава сплавов с ниобием для системы сплавов Fe–Si–Al–Nb были изучены температуры плавления, плотность, окисляемость и время плавления. Показано, что наиболее высокие служебные характеристики имеют комплексные ниобиевые сплавы с 15 – 20 % Nb; Fe–Si–Nb с 30 – 40 % Si; Fe–Al–Nb с 20 – 30 % Al; Fe–Si–Al–Nb с $\text{Al} + \text{Si} \sim 30\%$ при 15 – 22 % Al. Температура начала кристаллизации этих сплавов составляет 1200 – 1400 °C, плотность – 6200 – 6850 кг/м³. Их окисление происходит с меньшей скоростью, чем сплавов Fe–Nb, они обладают повышенным тепловым эффектом взаимодействия со сталью и высокой скоростью плавления. На рис. 4 приведена зависимость свойств ферросплавов от содержания в них ниобия и кремния.

В результате проведенных исследований разработаны основы технологии получения комплексных ниобиевых сплавов с алюминием и кремнием из высокофосфористого сырья с низким остаточным содержанием фосфора (0,05 – 0,50 %) при высоком извлечении ниобия (90 – 98 %). Показано, что сплавы требуемого состава можно получать из сырья с большим диапазоном концентрации ниобия и фосфора карбо-, силико- и алюминотермическим способами с удалением фосфора пироселекцией, возгонкой и ассимиляцией шлаком. Разработанные методы мало чувствительны к колебаниям химического состава сырья и количеству восстановителя (алюминия, кремния).

Выводы. Показано, что из нетрадиционного отечественного рудного сырья на основе глубоких физи-

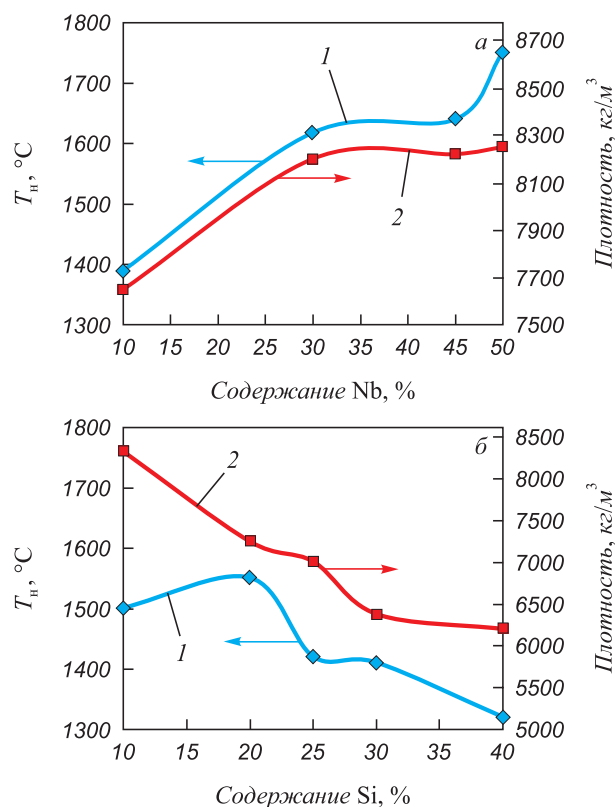


Рис. 4. Температура начала кристаллизации (1) и плотность (2) ниобиевых ферросплавов:
а – системы Fe–Nb; б – системы Fe–Nb–Si (Fe/Nb = 3)

Fig. 4. Temperatures of crystallization onset (1) and densities (2) of niobium ferroalloys:
а – Fe–Nb system; б – Fe–Nb–Si system (Fe/Nb = 3)

ко-химических и технологических изысканий реально создавать новые процессы и комбинации разных видов ферросплавов, не уступающих по своим технико-экономическим показателям продукции, полученной из импортных материалов.

Для успешного решения проблемы обеспечения ферросплавной отрасли промышленности отечественным рудным сырьем необходимо объединить изыскания ученых, геологов, обогатителей и металлургов, создавая комплексные коллективы и государственные проекты под руководством Российской академии наук и Министерства природных ресурсов РФ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мухатдинов Н.Х., Бродов А.А., Косырев К.А. Стратегия развития черной металлургии России на период 2014–2020 гг. и на перспективу до 2030 г. // Сб. тр. XIII Междунар. конгр. сталеплавыльщиков. – М.: ОАО «Северский трубный завод», 2014. С. 18 – 22.
2. Pariser H.H., Backeberg N.R., Masson O.C.M., Bedder J.C.M. Changing nickel and chromium stainless steel markets // INFACON XV: Int. Ferro-Alloys Congress, Edited by R.T. Jones & P. den Hoed. 2018. URL: <https://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconXV/0001-Pariser.pdf>.
3. Pariser H.H., Pariser G.C. Changes in the ferrochrome and ferro-nickel markets // Proc. of the 12th Int. Ferroalloy Congress.

- URL: <https://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconXII/Pariser-Penary.pdf>.
4. Зиновьева Н.Г. Статистика // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2018. № 3. С. 122 – 125.
 5. Землянская Л., Касаткин Д. Обзор рынка черной металлургии // Deloitte. URL: https://ru.investinrussia.com/data/file/Iron_and_steel_industry_report_2018_ru.pdf.
 6. Holappa L., Louhenkilpi S. On the role of ferroalloys in steelmaking // The Efficient Technologies in ferroalloy industry. INFACON. – Karaganda: «P.Dipner», 2013. P. 1083 – 1090.
 7. Боярк Г.Ю., Хатьков В.Ю. Товарные потоки ферросплавов в России // Черные металлы. 2018. № 3. С. 60 – 63.
 8. Ходина М.А. Российский рынок марганцевой продукции // Разведка и охрана недр. 2017. № 2. С. 42 – 48.
 9. Рынок ферросплавов в 2017-2018 г.: производство в России // Metall Research. Металлургические исследования. URL: http://www.metalresearch.ru/ferroalloys_market_2017-2018.html.
 10. Жучков В.И., Смирнов Л.А., Зайко В.П., Воронов Ю.И. Технология марганцевых ферросплавов. Ч.1. Высокоуглеродистый ферромарганец. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 412 с.
 11. Dashevskiy V.Ya., Kanevskiy A.G. Thermodynamical aspects of decarburization of manganese melts // Proc. of the 12th Int. Ferroalloy Congress. V. I. Helsinki, Finland: Outotec Oyj, 2010. P. 589 – 599.
 12. Yessengaliyev D., Baisanov S., Issagulov A. etc. Thermodynamic diagram analysis (TDA) of MnO–CaO–Al₂O₃–SiO₂ and phase composition of slag in refined ferromanganese production // Metallurgiya. 2019. No. 3 – 4 (58). P. 291 – 294.
 13. Yessengaliyev D.A., Baisanov S.O., Isagulov A.Z. etc. Application of the aluminosilicon manganese to obtain refined grades of ferromanganese // Theoretical and Practical Conf. with Int. Participation and School for Young Scientists “FERROALLOYS: Development Prospects of Metallurgy and Machine Building based on Completed Research and Development”. KnEMaterials Science, 2019. С. 154 – 158.
 14. Гасик М.И., Гладких В.А., Жданов А.В. и др. Расчетное определение ценности марганцевородного сырья // Электрометаллургия. 2009. № 1. С. 32 – 34.
 15. Машковцев Г.А. Минерально-сырьевое обеспечение ферросплавного производства России // Тр. конф. «Перспективы развития металлургии и машиностроения»: ФЕРРОСПЛАВЫ. – Екатеринбург: Изд-во «АльфаПринт», 2018. С. 30 – 35.
 16. Мелентьев Г.Б. Перспективы обеспечения собственным редкометальным сырьем и развития производств феррониобия в России // Тр. конф. «Перспективы развития металлургии и машиностроения»: ФЕРРОСПЛАВЫ. – Екатеринбург: Изд-во «АльфаПринт», 2018. С. 36 – 45.
 17. Заякин О.В., Жучков В.И., Лозовая Е.Ю. Время плавления никельсодержащих ферросплавов в стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2007. № 5. С. 13 – 16.
 18. Жучков В.И., Заякин О.В., Леонтьев Л.И. и др. Основные направления переработки бедного отечественного хромородного сырья // Электрометаллургия. 2008. № 5. С. 18 – 21.
 19. Есенжулов А.Б., Островский Я.И., Афанасьев В.И. и др. Использование российского хромородного сырья при выплавке высокоуглеродистого феррохрома в ОАО «СЗФ» // Сталь. 2008. № 4. С. 32 – 36.
 20. Заякин О.В., Жучков В.И., Леонтьев Л.И. Структура ванны электропечи при производстве высокоуглеродистого феррохрома // Металлург. 2018. № 6. С. 14 – 19.
 21. Спанов С.С., Жунусов А.К., Толымбекова Л.Б. Опытнo-промышленная выплавка стали с применением ферросиликоалюминия в ТОО “KSP STEEL” // Металлург. 2016. № 11. С. 43 – 47.

Поступила в редакцию 2 марта 2020 г.

После доработки 3 марта 2020 г.

Принята к публикации 3 марта 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 3-4, pp. 211–217.

APPLICATION OF RUSSIAN ORE RAW MATERIALS TO FERROALLOYS PRODUCTION

V.I. Zhuchkov¹, L.I. Leont'ev^{1, 2, 3}, O.V. Zayakin¹

¹Institute of Metallurgy of the UB RAS, Ekaterinburg, Russia

²National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

³Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences), Moscow, Russia

Abstract. The main problem of ferroalloy production in Russia is the availability of ore raw materials in domestic factories. Only a few types of alloys are produced from our own raw materials (such as ferrosilicon and vanadium alloys). Most ferroalloys are either imported from abroad or smelted from imported raw materials. The difficult situation in domestic ferroalloy production is associated with raw material import dependence. Despite the presence of its own large mineral resources base, although not quite high-quality in accordance with world standards. Domestic ferroalloy raw materials have a low content of leading elements (manganese, chromium ores), a high content of phosphorus (manganese, niobium ores) and sulfur (manganese ores). This requires a conduction of physical and chemical studies and the creation of a number of new alternative technologies. The work shows that it is possible to create new processes and combinations of different types of ferroalloys from non-traditional domestic ore raw materials based on deep physicochemical and technological studies. They are not inferior in terms of their technical and economic indicators of products obtained from imported materials. To successfully solve the problem of providing the ferroalloy industry with domestic ore raw materials, it

is necessary to combine the research of geology, enrichment and metallurgy.

Keywords: ore raw materials, ferroalloy, steel, metallurgy, physicochemical characteristics, technology, selective reduction.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-3-4-211-217

REFERENCES

1. Mukhatdinov N.Kh., Brodov A.A., Kosyrev K.A. Development strategy for Russian ferrous metallurgy for 2014-2020 and for the future until 2030. In: *Sb. tr. XIII Mezhdunar. kongr. staleplavil'shchikov* [Proc. of XII Int. Congress of Steelmakers]. Moscow: Severskii trubnyi zavod, 2014, pp. 18-22. (In Russ.).
2. Pariser H.H., Backeberg N.R., Masson O.C.M., Bedder J.C.M. Changing nickel and chromium stainless steel markets. In: *INFACON XV: Int. Ferro-Alloys Congress, Edited by R.T. Jones & P. den Hoed*. 2018. Available at URL: <https://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconXV/0001-Pariser.pdf>.
3. Pariser H.H., Pariser G.C. Changes in the ferrochrome and ferro-nickel markets. In: *Proc. of the 12th Int. Ferroalloy Congress*. Available at URL: <https://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconXII/Pariser-Plenary.pdf>.
4. Zinov'eva N.G. Statistics. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2018, no. 3, pp. 122–125. (In Russ.).
5. Zemlyanskaya L., Kasatkin D. *An overview of ferrous metallurgy market*. Deloitte. Available at URL: https://ru.investinrussia.com/data/file/Iron_and_steel_industry_report_2018_ru.pdf (In Russ.).

6. Holappa L., Louhenkilpi S. On the role of ferroalloys in steelmaking. In: *The Efficient Technologies in ferroalloy industry. INFACON*. Karaganda: P.Dipner, 2013, pp. 1083–1090.
 7. Boyarko G.Yu., Khat'kov V.Yu. Commercial streams of ferroalloys in Russia. *Chernye metally*. 2018, no. 3, pp. 60–63. (In Russ.).
 8. Khodina M.A. Russian market of manganese products. *Razvedka i okhrana nedr*. 2017, no. 2, pp. 42–48. (In Russ.).
 9. Ferroalloy market in 2017–2018: Production in Russia. *Metal Research*. Available at URL: http://www.metalresearch.ru/ferroalloys_market_2017-2018.html (In Russ.).
 10. Zhuchkov V.I., Smirnov L.A., Zaiko V.P., Voronov Yu.I. *Tekhnologiya margantsevykh ferrosplavov. Ch. 1. Vysokouglerodisty i ferromanganets* [Technology of manganese ferroalloys. Part 1. High-carbon ferromanganese]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2007, 412 p. (In Russ.).
 11. Dashevskiy V.Ya., Kanevskiy A.G. Thermodynamical aspects of decarburization of manganese melts. *Proc. of the 12th Int. Ferroalloy Congress. V. I. Helsinki, Finland: Outotec Oyj*, 2010, pp. 589–599.
 12. Yessengaliyev D., Baisanov S., Issagulov A. etc. Thermodynamic diagram analysis (TDA) of MnO–CaO–Al₂O₃–SiO₂ and phase composition of slag in refined ferromanganese production. *Metallurgiya*. 2019, vol. 58, no. 3–4, pp. 291–294.
 13. Yessengaliyev D.A., Baisanov S.O., Isagulov A.Z. etc. Application of the aluminosilicon manganese to obtain refined grades of ferromanganese. *Theoretical and Practical Conf. with Int. Participation and School for Young Scientists "FERROALLOYS: Development Prospects of Metallurgy and Machine Building based on Completed Research and Development"*. KnE Materials Science, 2019, pp. 154–158.
 14. Gasik M.I., Gladkikh V.A., Zhdanov A.V. etc. Calculation of the value of manganese ore raw materials. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2009, vol. 2009, no. 8, pp. 756–758.
 15. Mashkovtsev G.A. Mineral resources for Russian ferroalloy production. In: *Trudy konf. "Perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya": FERROSPLAVY* [Proc. of the Conf. "Development prospects for Metallurgy and Machine Building": FERROALLOYS]. Ekaterinburg: Al'faPrint, 2018, pp. 30–35. (In Russ.).
 16. Melent'ev G.B. Prospects for providing own rare-metal raw materials and development of ferroniobium production in Russia. In: *Trudy konf. "Perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya": FERROSPLAVY* [Proc. of the Conf. "Development prospects for Metallurgy and Machine Building": FERROALLOYS]. Ekaterinburg: Al'faPrint, 2018, pp. 36–45. (In Russ.).
 17. Zayakin O.V., Zhuchkov V.I., Lozovaya E.Yu. Melting time of nickel-bearing ferroalloys in steel. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 5, pp. 416–418.
 18. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Leont'ev L.I. etc. Main trends in the processing of poor chrome ore raw materials. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2008, vol. 2008, no. 8, pp. 709–712.
 19. Esenzhulov A.B., Ostrovskii Ya.I., Afanas'ev V.I. etc. Russian chromium ore in smelting high-carbon ferrochrome at OAO SZF. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 4, pp. 315–317.
 20. Zayakin O.V., Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I. Electric furnace bath structure during high-chromium ferrochrome production. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 5–6, pp. 493–500.
 21. Spanov S.S., Zhunusov A.K., Tolymbekova L.B. Steel pilot melting at LLP "KSP STEEL" using Ferro-Silica-Aluminum. *Mettallurgist*. 2017, vol. 60, no. 11–12, pp. 1149–1154.
- Funding.** The work was performed according to the state task to the Institute of Metallurgy of the UB RAS within the framework of the program of fundamental research for state academies.
- Information about the authors:**
- V.I. Zhuchkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher*
L.I. Leont'ev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician, Adviser of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher
O.V. Zayakin, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher (zferro@mail.ru)

Received March 2, 2020

Revised March 3, 2020

Accepted March 3, 2020