



УДК 669-1

DOI: 10.31643/2020/6445.38



МРНТИ 53.31.21

## Выплавка высокоуглеродистого ферромарганца на высокоосновных шлаках

<sup>1\*</sup> Сариев О. Р., <sup>2</sup> Досекенов М. С., <sup>1</sup> Келаманов Б. С., <sup>1</sup> Абдирашит А. М.

<sup>1</sup> Актюбинский региональный университет им. К.Жубанова, г. Актюбе, Казахстан

<sup>2</sup> ТОО «Научно-исследовательско-инжиниринговый центр ERG», Актюбе, Казахстан

\* Электронная почта автора: rafhatsson@mail.ru

Статья поступила: 22 сентября 2020

Рецензирование: 24 октября 2020

Принята в печать: 25 ноября 2020

### АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты лабораторного и крупнолабораторного испытаний по выплавке высокоуглеродистого ферромарганца на высокоосновных шлаках. При лабораторных испытаниях подтверждены, что повышение основности шлаков ферромарганцевого производства благоприятно влияет на восстановление марганца в металл и снижение концентрации кремния в нем. Однако, высокая основность делает шлак тугоплавким и вязким, приводя к большим потерям марганца со шлаком. Использование боратовых флюсов решает этот вопрос, воздействуя на физико-химические свойства конечных шлаков, что позволяет вести процесс при высоких основностях с достижением оптимальных технологических показателей. Полученные положительные результаты лабораторных опытов послужили основой для апробации разработанной технологии в полупромышленном мас-штабе с выплавкой высокоуглеродистого ферромарганца флюсовым способом из марганцевой руды месторождения «Богач». В результате изучения выплавки углеродистого ферромарганца в крупно-лабораторных условиях установлена возможность передела марганцевых руд на высокоосновных шлаках при соответствующем регулировании транспортных свойств шлака на стандартный металл с высокими технико-экономическими показателями. При этом наилучшие показатели достигаются при отношении CaO/SiO<sub>2</sub> в шлаке, равном 1,8 и с содержанием оксида бора в шлаке 0,8%. Установлено, что при этих условиях полученные борсодержащие высокоосновные шлаки углеродистого ферромарганца не подвержены рассыпанию.

**Ключевые слова:** Ферромарганец, боратовый флюс, основность, шлак, степень

### Информация об авторах:

**Сариев Отеген Рафхатович**

кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии, горного и нефтегазового дела технического факультета Актюбинского регионального университета имени К.Жубанова, Актюбе, Казахстан. Email: rafhatsson@mail.ru.

**Досекенов Мурат Сагитжанович**

инженер-технолог ТОО «Научно-исследовательский инжиниринговый центр ERG», Актюбе, Казахстан. Email: dossekenov.ms@mail.ru

**Келаманов Бауыржан Сатыбалдыұлы**

кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии, горного и нефтегазового дела технического факультета Актюбинского регионального университета имени К.Жубанова, Актюбе, Казахстан. Email: Kelamanov-b@mail.ru.

**Абдирашит Асылбек Мирамханұлы**

магистр технических наук, преподаватель кафедры металлургии, горного и нефтегазового дела технического факультета Актюбинского регионального университета имени К.Жубанова, Актюбе, Казахстан. Email: asik\_942017@mail.ru

### Введение

Наиболее важной задачей при выплавке марганцевых ферросплавов является повышение степени извлечения марганца в сплав. Обусловлено это тем, что до настоящего времени не установлены оптимальные параметры процесса выплавки

высокоуглеродистого ферромарганца. Одним из положительных моментов электропечной плавки марганцевых ферросплавов является относительно невысокая величина потерь марганца с реакционными газами. В этом случае, при достаточном количестве восстановителя в шихте извлечение марганца будет определяться распределением его между

металлом и шлаком, которое, в свою очередь, зависит от активности марганца в шлаке. Если допустить, что такое распределение в условиях промышленной плавки близко к равновесному, то, следовательно, оно должно определяться температурой реакционной зоны и составом (основностью) шлака и металла. Многочисленные исследования доказывают о значительном влиянии основности шлака на распределение марганца. При этом некоторые авторы оптимальной для выплавки ферромарганца называют величину основности около 1,2, другие рекомендуют более высокие значения основности при соответствующем регулировании транспортных свойств шлака. При ведении процесса на высокоосновных шлаках, для обеспечения благоприятных условий восстановительных процессов необходимо, чтобы образующийся оксидный (руднофлюсовый) расплав обладал пониженной вязкостью и температурой кристаллизации. По данным [1], наличие в шихте MnO, SiO<sub>2</sub> и других оксидов создает условия для образования силикатов при температуре ниже восстановления свободной (MnO) до (Mn) и (SiO<sub>2</sub>) до (Si), что обуславливает переход их в шлаковый расплав. Поэтому марганец и кремний восстанавливаются в основном не из свободных оксидов, а из оксидов, связанных в силикаты:



Имеющиеся в шлаке основные оксиды CaO и MgO повышают активность MnO вследствие протекания реакций:



В мировой практике ферросплавного производства имеется опыт получения стандартного высокоуглеродистого ферромарганца в доменных печах на высокоосновных шлаках (CaO/SiO<sub>2</sub> = 1,6-1,7) [2-6]. При этом достигается увеличение степени извлечения марганца по сравнению с действующей технологией получения этого сплава в электропечах. С повышением основности шлака растет активность (MnO) и снижается активность кремнезема (SiO<sub>2</sub>), что создает условия для полного восстановления и перехода марганца в ферромарганец. Высокая шахта доменной печи обеспечивает конденсацию испаряющегося в зонах высоких

температур восстановленного марганца, что уменьшает потери его с газами по сравнению с низкошахтными ферросплавными печами. При одинаковых составах высокоосновных шлаков и прочих равных условиях выплавки высокоуглеродистого ферромарганца, вязкость доменных шлаков существенно ниже, чем электропечных. Сравнительный анализ показывает, что причиной этого является существенное различие в содержании серы. Из-за высокого удельного расхода кокса с содержанием серы 1,5-1,8%, достигающего 1800-1850кг на 1т доменного ферромарганца, концентрация ее в шлаках возрастает до 2,5-3%. В условиях электроплавки, когда за счет электроэнергии уменьшается расход кокса, в шлаках содержится около 0,5-0,8% S [7].

Для лабораторных исследований в качестве шихтовых материалов использовали смесь марганцевых руд месторождений «Мынарал» и «Богач» в соотношении 40:60 с добавками необходимого количества кокса. Данное соотношение выбрано для обеспечения в марганцевом сырье не менее 42% марганца и соотношения марганца к железу не менее 8,5 [8-13]. В качестве флюсующей добавки и борсодержащих материалов применяли оксид кальция и оксид бора марки ЧДА. Марганцевую руду и кокс продробили до фракции – 5мм и все шихтовые материалы прокаливали до постоянного веса при 900°C. Технический и химический составы шихтовых материалов приведены в таблицах 1 и 2.

**Таблица 1** Химический состав марганцевой руды, %

Марганцевая руда	Mn	Fe	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P
Мынарал	45,20	1,00	12,00	2,60	0,55	2,78	0,046
Богач	40,16	8,01	10,10	2,21	0,20	5,94	0,042
Смесь	42,17	5,20	10,86	2,36	0,34	4,67	0,043

**Таблица 2** Технический и химический состав кокса, %

Материалы	A <sup>c</sup>	V	W	C <sub>тв</sub>	Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Ca O	Mg O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Кокс	19,3 8	6,0 9	2,4 4	73,8 6	-	-	-	-	-	-
Зола кокса	-	-	-	-	10, 25	40,5 9	0,1 38	9,6 8	6,08	14,6 1

Опыты проводили в тиглях высотой 40мм и диаметром 25мм, изготовленных из высокочистого графита. Плавку вели в высокотемпературной печи сопротивления Таммана. Печь Таммана представляет собой

исследовательскую установку, предназначенную для получения высоких температур и применяемую для моделирования металлургических процессов. Данная высокотемпературная установка снабжена нагревателем, рабочим пространством которой служит угольная труба, и силовым трансформатором. Регулирование температуры в печи производится плавно при помощи тиристорного регулятора напряжения, который включен в первичную обмотку силового трансформаторного тока, что позволяет получать на выходных шинах ток в несколько тысяч ампер при низком напряжении (от 0,5 до 15В). Температуру измеряли вольфрам-рениевой термопарой ВР-5/20, горячий спай которой в армированном корундизовом чехле подводился ко дну тигля.

Установка предназначена для плавки металлов, шлаков и других продуктов металлургии. Набивку печи по всему объему рекомендуется выполнять угольной крошкой, просеянной через сито 4-6 мм, а у контактных колец, для плотного контакта – через сито 200 меш. Водоохлаждаемыми элементами печи являются медные контактные кольца, тиристоры, корпус и крышки. Регулирование напора воды производится вентилями для подачи в холодильники соответствующих элементов. Сброс воды осуществляется в канализацию.

С целью более полного восстановления марганца из шлака и повышения степени извлечения его в сплав, были проведены лабораторные исследования по выплавке высокоуглеродистого ферромарганца с варьированием основности в пределах 1,3-2,0 и использованием боратовых флюсов. Расчеты шихты производили на получение конечного шлака с основностью  $CaO/SiO_2$ , равным 1,3, 1,4, 1,5, 1,6, 1,7, 1,8, 1,9, 2,0 при следующих принятых коэффициентах перехода компонентов шихты в продукты плавки [14, 15]:

Компоненты	В сплав, %	В шлак, %	Потеря с газами, %
Марганец	80	8	12
Кремний	10	90	-

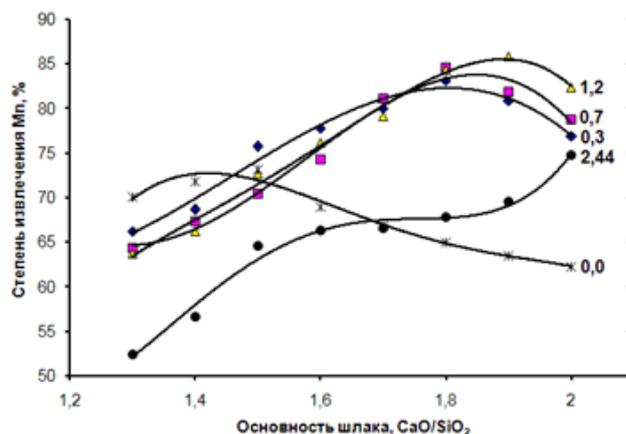
Количество боратого флюса задавали из расчета получения в шихте 0,3-2,44%  $B_2O_3$ . Составы опытных шихт, рассчитанных по стандартной методике, представлены в таблице 3. Всего было проведено 40 опытов. При каждом

значении заданной основности количество оксида бора в шихте составляло, %: 0; 0,3; 0,7; 1,2; 2,44. Предварительно сдозированную и перемешанную шихту засыпали в графитовый тигель и помещали в заранее нагретую до заданной температуры печь. В интервале температур 1500-1550°C происходило полное проплавление шихтовых материалов. После расплавления сплав выдерживали в печи 1,5 часа при температуре 1550°C.

Таблица 3 Состав шихты

№ п/п	Марганцевая руда, г	Кокс, г	CaO, г	$B_2O_3$ , г
1-5	50	10	5,85	0-1,22
6-10	50	10	6,45	0-1,22
11-15	50	10	7,01	0-1,22
16-20	50	10	7,57	0-1,22
21-25	50	10	8,13	0-1,22
26-30	50	10	8,69	0-1,22
31-35	50	10	9,25	0-1,22
36-40	50	10	9,80	0-1,22

После охлаждения пробы металла и шлака подвергали взвешиванию и химическому анализу. Химический анализ проб произведен согласно ГОСТу-227726-77,-22772.4-77,22772.6-77,22772.7-96. Результаты плавки приведены в таблице 4 и на рисунках 1-2.



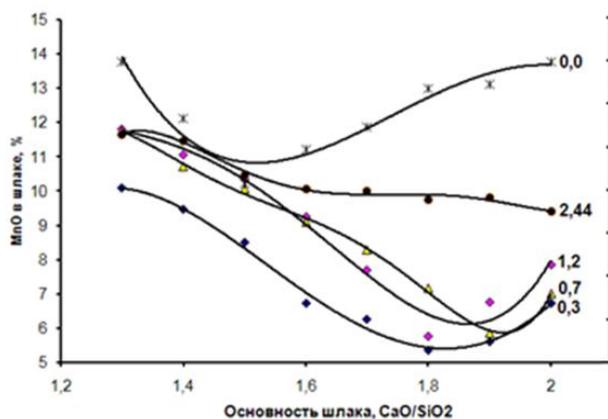
цифры у кривых – количество оксида бора, г/100г руды

Рисунок 1 Зависимость степени извлечения марганца от основности шлака

В ходе лабораторных тигельных плавки степень извлечения марганца в сплав не превышала 82%, что связано с повышенным переходом марганца в газовую фазу из-за отсутствия фильтрующего слоя из шихтовых

материалов, как в руднотермической электропечи. Как показали термодинамические расчеты, проведенные с помощью программного комплекса «АСТРА-4» [16] интенсивный переход марганца в газовую фазу начинается при температуре 1600°C.

Как видно из рисунков 1 и 2, при выплавке высокоуглеродистого ферромарганца по классической технологии (без бора) повышение основности более 1,5 приводит к ухудшению кинетических условий восстановления компонентов в сплав и, как следствие увеличивает потери марганца со шлаком [4].

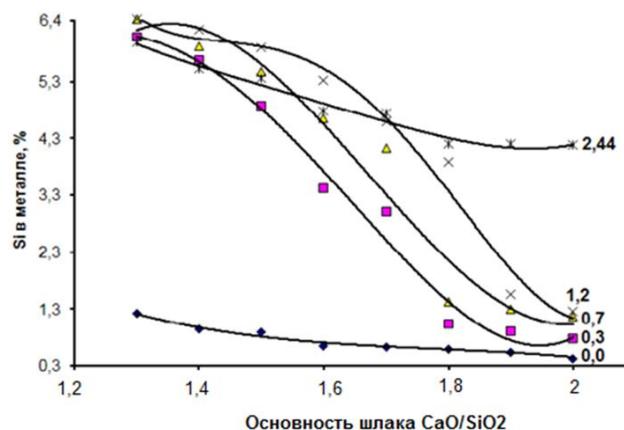


цифры у кривых – количество оксида бора, г/100г руды

**Рисунок 2** Изменение концентрации монооксида марганца в зависимости от основности шлака

При этом текущее снижение содержания кремния в металле сохраняется: чем выше основность, тем ниже концентрация кремния в сплаве (рисунок 3). Это объясняется тем, что CaO связывает кремнезем путем разрушения силикатов марганца и образуя тугоплавкий ларнит ( $2CaO \cdot SiO_2$ ). Оптимальное количество боратовых флюсов при различных основностях разное. Для более высокоосновных это количество выше. По извлечению марганца при базовой технологии оптимальная основность составляет 1,3-1,5. При вводе борсодержащих флюсов в базовую шихту показатели извлечения ухудшаются. С увеличением расхода боратового флюса область оптимальной основности сдвигается в сторону их больших значений. Так, при изменении содержания оксида бора от 0,3 до 1,2% область оптимальной основности изменяется с 1,7 до 1,9. При содержании в шихте 2,44% оксида бора показатели извлечения ухудшаются. При этом имеется тенденция к увеличению степени извлечения марганца при

основностях 2,0 и выше. Использование боратовых флюсов позволяет расширить диапазон основности, снижая вязкость и температуру кристаллизации при незначительном изменении электропроводности шлаков [5, 6]. Таким образом, создаются благоприятные условия для полного восстановления марганца в металл. Оптимальные параметры плавки были достигнуты при основности 1,8-1,9 с содержанием в шихте 0,7 и 1,2%  $B_2O_3$  соответственно. При этом степень извлечения марганца в сплав по сравнению с базовой плавкой выросла на 9-10%, а содержание кремния в металле не превышало 1,3%.



**Рисунок 3** Зависимость концентрации кремния в металле от основности шлака (цифры у кривых – количество оксида бора, г/100г руды)

Анализ результатов лабораторных исследований показывает, что повышение основности шлаков ферромарганцевого производства благоприятно влияет на восстановление марганца в металл и снижение концентрации кремния в нем. Однако, высокая основность делает шлак тугоплавким и вязким, приводя к большим потерям марганца со шлаком. Использование боратовых флюсов решает этот вопрос, воздействуя на физико-химические свойства конечных шлаков, что позволяет вести процесс при высоких основностях с достижением оптимальных технологических показателей.

Полученные положительные результаты лабораторных опытов послужили основой для апробации разработанной технологии в полупромышленном мас-штабе с выплавкой высокоуглеродистого ферромарганца флюсовым способом из марганцевой руды месторождения «Богач».

Таблица 4 Химический состав металла и шлака, %

№	Mn	Fe	Si	C	B	P	MnO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO SiO <sub>2</sub>	Извл Mn
1	75,46	15,89	1,22	6,59	-	0,12	13,76	29,36	13,19	38,18	3,50	0,00	1,3	70,00
1.1	76,18	12,04	6,09	5,25	0,05	0,23	10,08	29,37	13,15	38,18	0,87	0,39	1,3	66,27
1.2	75,81	12,39	6,40	5,60	0,13	0,18	11,82	29,35	13,00	38,15	0,87	0,91	1,3	64,40
1.3	75,23	12,09	6,40	6,14	0,22	0,18	11,75	29,32	13,15	38,12	0,44	1,56	1,3	63,70
1.4	76,22	11,89	5,99	6,11	0,45	0,17	11,66	29,30	13,11	38,10	0,22	3,17	1,3	52,46
2	76,24	15,39	0,91	5,89	-	0,11	12,43	29,51	13,00	41,32	3,38	0,00	1,4	71,80
2.1	76,82	10,46	5,68	6,09	0,04	0,18	9,46	29,50	13,21	41,33	1,09	0,37	1,4	68,65
2.2	75,93	12,01	5,92	6,11	0,13	0,19	11,07	29,53	12,60	41,35	0,22	0,89	1,4	67,3
2.3	75,41	11,96	6,22	5,95	0,22	0,18	10,72	29,50	12,45	41,30	1,96	1,55	1,4	66,27
2.4	76,66	12,48	5,53	6,21	0,45	0,23	11,47	29,55	13,12	41,37	0,44	3,15	1,4	56,6
3	76,56	14,82	0,90	6,60	-	0,12	10,21	27,37	13,91	42,06	3,96	0,00	1,5	73,20
3.1	79,84	11,22	4,88	6,79	0,05	0,16	8,49	27,37	13,19	42,05	1,52	0,38	1,5	75,73
3.2	75,31	11,59	5,47	6,40	0,12	0,14	10,33	27,35	13,00	41,03	0,44	0,88	1,5	70,40
3.3	77,18	10,73	5,91	5,83	0,21	0,16	10,07	27,38	13,91	41,07	0,65	1,57	1,5	72,70
3.4	76,32	12,48	5,36	6,02	0,44	0,16	10,47	27,29	12,12	40,94	0,22	3,19	1,5	64,60
4	76,53	15,20	0,64	6,64	-	0,12	12,65	26,85	12,09	43,56	3,96	0,00	1,6	68,95
4.1	79,71	10,34	3,42	6,78	0,05	0,15	6,72	26,84	13,21	43,55	0,65	0,40	1,6	77,82
4.2	76,03	11,46	4,65	6,49	0,11	0,16	9,24	26,87	12,60	42,99	0,87	0,87	1,6	74,30
4.3	77,61	10,77	5,32	5,92	0,23	0,20	9,10	26,82	11,96	42,92	0,87	1,49	1,6	76,10
4.4	75,82	12,14	4,79	6,18	0,47	0,21	10,05	26,84	11,88	42,95	1,09	3,14	1,6	66,30
5	76,28	15,58	0,62	6,97	-	0,14	12,88	25,13	13,21	44,13	3,61	0,00	1,7	66,82
5.1	77,18	11,79	3,01	5,94	0,04	0,20	6,26	25,14	12,45	44,14	0,64	0,35	1,7	80,00
5.2	76,60	11,96	4,13	6,24	0,13	0,15	7,71	25,52	13,21	44,15	0,21	0,94	1,7	81,11
5.3	76,26	12,38	4,60	6,18	0,21	0,20	8,30	25,49	12,60	44,11	1,28	1,53	1,7	79,12
5.4	75,77	11,63	4,74	5,95	0,45	0,23	10,00	25,09	12,45	44,16	0,64	3,11	1,7	66,60
6	76,02	15,45	0,59	6,95	-	0,12	12,99	24,83	12,60	45,51	3,73	0,00	1,8	64,93
6.1	80,47	11,99	1,03	6,11	0,06	0,14	5,35	24,83	13,12	45,51	1,28	0,41	1,8	83,15
6.2	80,05	12,34	1,42	6,00	0,13	0,12	5,75	24,80	13,19	44,64	0,43	0,95	1,8	84,62
6.3	76,04	12,09	3,90	6,18	0,23	0,11	7,15	24,75	13,00	44,56	0,64	1,54	1,8	84,34
6.4	76,86	11,99	4,21	5,89	0,44	0,20	9,74	24,71	13,91	44,48	1,06	3,14	1,8	67,79
7	75,86	16,02	0,54	7,16	-	0,12	13,10	23,79	11,96	46,11	3,26	0,00	1,9	63,50
7.1	80,76	11,64	0,91	6,10	0,03	0,10	5,6	23,78	12,09	46,11	0,64	0,39	1,9	80,88
7.2	79,97	11,84	1,30	6,42	0,15	0,11	6,75	23,75	13,21	45,13	0,85	0,94	1,9	81,9
7.3	80,01	11,91	1,56	6,18	0,21	0,12	5,87	23,73	12,60	45,09	1,28	1,51	1,9	85,80
7.4	76,77	12,38	4,20	6,14	0,45	0,14	9,80	23,69	11,96	45,02	1,28	3,21	1,9	69,6
8	75,51	14,01	0,43	7,55	-	0,12	13,77	23,59	11,88	47,20	3,19	0,00	2,0	62,20
8.1	80,86	12,04	0,77	6,01	0,06	0,10	6,72	23,59	11,88	47,19	1,28	0,36	2,0	76,89
8.2	80,10	12,27	1,16	5,98	0,14	0,11	7,84	23,55	12,45	47,13	1,28	0,85	2,0	78,80
8.3	80,35	11,80	1,26	6,15	0,21	0,11	7,00	23,52	12,48	47,05	1,49	1,59	2,0	82,30
8.4	76,99	11,52	4,19	6,66	0,43	0,14	9,40	23,51	11,98	47,03	0,85	3,14	2,0	74,80

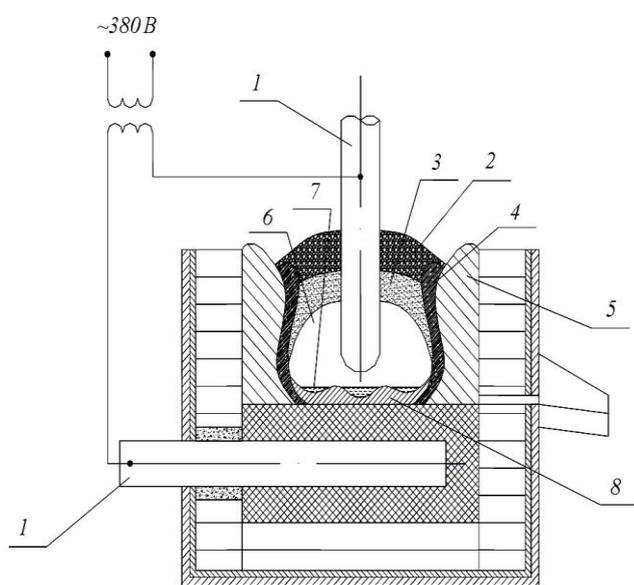
Эксперименты проводили в низкошахтной руднотермической электропечи мощностью 0,2МВА. Температура дугового разряда 2500-4500°C обеспечивается графитовым электродом диаметром 200мм. Электропечь снабжена четырьмя ступенями регулирования вторичного напряжения - от 18,5 до 49,5В. Для обеспечения

чистоты восстановленного металла подина печи была изготовлена из тщательно уплотненного мелкоразмолотого высокочистого графита. Схематическое строение ванны печи приведено на рисунке 4.

Поверхность пода наклонена под углом 5-70 в направлении леточного отверстия, что

обеспечивает более легкий выход расплава из зоны восстановления. Для открытия и прожига летки была сконструирована и смонтирована система прожига с графитовым электродом  $\varnothing$  30мм. Футеровка печи выполнена из магнезитового кирпича. Для закрытия леточного отверстия использовали смесь огнеупорной глины и дробленой электродной массы.

Для выплавки высокоуглеродистого ферромарганца на основных шлаках с использованием боратовых флюсов шихту составляли из марганцевой руды месторождения «Богач», кокса и извести. Боросодержащим материалом служила боратовая руда Индерского месторождения.



1 – электроды; 2 – исходная шихта; 3 – зона размягченной шихты; 4 – переходная зона; 5 – пристенный гарнисаж; 6 – реакционная зона; 7 – расплав; 8 – металлокарбидная настель.

**Рисунок 4** Строение ванны руднотермической печи с трансформатором мощностью 0,2МВА

По технологической характеристике к марганцевым рудам предъявляют требования минимального содержания мелочи и пыли. В связи с этим из опытной партии марганцевой руды в количестве 3т отсевали фракцию -8мм, а куски более 50мм додрабливали в щековой дробилке до фракции 8-50мм и из них были отобраны пробы для химического анализа путем применения трехразового квартования и перемешивания. Также были отобраны пробы кокса, боратовой руды и извести этим же методом. Химический состав шихтовых материалов представлен в таблице 5.

**Таблица 5** Химический состав шихтовых материалов, %

Материал	Mn общ	Fe <sub>o</sub> бщ	Ca O	Si O <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	M gO	Ac	V	W	C <sub>гв</sub>	S
Mn концентрат	45,05	5,88	1,51	6,28	2,7	0,31	-	-	-	-	0,035
Кокс	-	11,83	5,88	48,5	14,57	4,34	20,4	3,83	1,07	75,73	0,06
										B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Бор. руда	-	-	26,9	31,9	7,3	12,3	-	-	-	8,9	-
Известь	-	-	76,32	0,3	0,4	0,6	-	21,61	0,5	-	0,02

Разогрев электропечи производили в течение 8 часов с использованием коксовой подушки в качестве проводника электрического тока. По завершении периода разогрева электропечь полностью очистили от остатков коксовой подушки. Электрический режим периода разогрева: вторичное напряжение 24,6В, сила тока 100А. Процесс вели при напряжении 18В и силе тока 3500-4500А непрерывным способом, с загрузкой шихты небольшими порциями по мере усадки колошника, с периодическим выпуском металла через каждые 2 часа в чугунные изложницы.

Подача шихтовых материалов и обработка поверхности колошника производились стальными совками и деревянными шестами.

Открытие летки производили графитовым электропрожигом. Металл и шлак каждого выпуска взвешивали, после чего отбирали пробу на химический анализ согласно установленным правилам отборки проб. Практически за всю кампанию выплавки углеродистого ферромарганца процесс протекал ровно. Колошник в течение всего периода испытаний работал хорошо, шлакования и «свищей» не наблюдалось. Газы выделялись равномерно по всей поверхности колошника. Конус шихты вокруг электрода составлял 0,3-0,45м под углом 35-40°. Шихта опускалась равномерно самообвалом, спекания колошника не наблюдалось. Колебания токовой нагрузки отмечались через 1-1,5 часа после выпуска, когда в печи накапливался металл. Посадка электродов была глубокой, летка открывалась легко. Металл и шлак выходили активно. При необходимости, прутьями производили шуровку леточного отверстия. При окончании слива расплава из леточного отверстия бурно выделялись газы, что свидетельствовало о полном выходе металла из реакционной зоны. При наличии этих технологических признаков

леточное отверстие закрывали глиной, после чего в печь загружали свежую шихту с образованием конуса вокруг электрода.

После выпуска металла, обработки колошника и загрузки новой порции шихты, токовая нагрузка выравнивалась. Шихта равномерно прогревалась отходящими реакционными газами, что создавало благоприятные условия для развития восстановительных процессов.

С использованием теоретических положений [16-20], вытекающих из формализованной модели оксидных расплавов и экспериментальных данных по вязкости и электропроводности шлаков производства марганцевых ферросплавов рассчитаны восемь вариантов шихт выплавки ферромарганца. Для увеличения степени извлечения ведущих компонентов в сплав принято решение увеличить основность шлака, а для улучшения физических свойств использовать борсодержащие флюсы. Основность конечного шлака варьировали в пределах от 1,3 (базовая) до 2,0. Для проведения опытных плавов были рассчитаны шихты на получение шлаков с основностью 1,3, 1,7, 1,8 и 2,0. Расход боратового флюса в соответствии с заданным содержанием оксида бора в шихте 0,3; 0,5; 0,7 составлял 3,75, 7,5, 15% от расхода марганцевой руды. При расчете шихты принято следующее распределение бора между продуктами плавки (таблица 6): 15% в сплав, 75% в шлак, 10% потеря с газами.

**Таблица 6** Составы шихты по вариантам

Материалы, кг	I-в	II-в	III-в	IV- в	V-в	VI- в	VII- в	VIII- в
Mn руда	10	10	10	10	10	10	10	10
Кокс	2,5	2,5	2,5	2,6	2,5	2,5	2,6	2,7
Известь	0,8	1,7	2,1	2,5	1,9	2,3	2,8	2,5
B руда	0	1,7	2,8	3,9	1,7	2,8	3,9	2,8

Плавки характеризовались нормальной работой печи, устойчивой нагрузкой. Шлакование колошника, а также свищи во время плавов не наблюдались. Газовыделение и сход шихты на колошнике были равномерными. Высота колошника во всех вариантах опытов оставалась одинаковой, что свидетельствовало о течении процесса без накопления шихты и расплава. Всего по всем вариантам было выплавлено 301,8кг металла и 400,2кг шлака. Основные технико-экономические показатели

приведены по всем вариантам в таблице 7. Как показывает анализ основных показателей выплавки углеродистого ферромарганца, в целом процесс характеризуется стабильным составом металла и шлака. Полученный металл во всех вариантах опытов по химическому составу отвечает требованиям ГОСТа и соответствовал углеродистому ферромарганцу марки ФМн78.

Как видно из таблицы 7, во всех вариантах исследований наблюдается рост извлечения марганца в сплав при увеличении основности конечного шлака.

При ведении плавки по стандартной технологии извлечение марганца в сплав достигает 82% при кратности шлака – 0,95. Расход шихтовых материалов составляет 2,130т марганцевой руды, 0,480т кокса, 0,230т извести на 1т металла, а удельный расход электроэнергии – 4889 кВт·час. В опытных плавках повышение основности и ввод боратовых флюсов способствовали увеличению степени извлечения марганца. Положительное влияние оксида бора на показатели извлечения марганца в сплав согласуется с данными по влиянию его на физические свойства шлаков. Присутствие  $B_2O_3$  снижает температуру кристаллизации и вязкость высокоосновных шлаков. В снижении вязкости расплавов играет роль увеличение перегрева из-за низких температур кристаллизации борсодержащих шлаков и вероятность дезинтеграции непрерывных кремнекислородных комплексов на более простые фрагменты в результате перехода бора из четверной в тройную координации и нарушения сплошности сетки. При этом более заметный эффект снижения вязкости отмечается на высокоосновных шлаках и низких температурах. Однако, при повышении основности и содержания в шихте оксида бора имеет место рост кратности шлака и как следствие, увеличение расхода электроэнергии. При проведении плавов этот фактор усиливается из-за использования в качестве борсодержащего флюса боратовой руды с высоким содержанием оксида кремния, на офлюсование которого требуется дополнительное количество извести. Оптимальным режимом ведения процесса является V-й вариант опытов. В этом случае достигается максимальное извлечение марганца (87%) и низкий расход шихтовых материалов: марганцевой руды - 2,00т; кокса - 0,400т; извести 0,280 т и боратовой руды - 0,250т на 1 т.

**Таблица 7** Техничко-экономические показатели выплавки углеродистого ферромарганца флюсовым способом

№ п/п	Наименование показателей	Углеродистый ферромарганец							
		I в.	II в.	III в.	IV в.	V в.	VI в.	VII в.	VIII в.
1	Продолжительность работы, час.	8	8	8	8	8	8	8	8
2	Получено сплава/шлака, кг	37,6/35,7	38,1/41,9	37,8/50,6	37,8/59,4	39/44,4	37,6/51,5	37,1/59,3	36,8/57,4
3	Мощность трансформатора, МВА	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
4	Напряжение, В	18	18	18	18	18	18	18	18
5	Расход материалов, кг								
	Марг. руды	80	80	80	80	80	80	80	80
	Извести	8,65	15,5	17,87	20,27	16,75	19,46	22,17	22,64
	Кокса	18,3	18,5	18,65	18,80	18,5	18,66	18,82	18,65
6	Бор. руда	-	6,0	12,0	21,0	6,0	12,0	21,0	12,0
7	Средний состав металла, %								
	Mn	78,48	78,85	79,55	79,85	80,50	80,16	79,51	79,66
	Si	2,34	0,21	0,52	0,74	0,25	0,57	0,70	0,83
	C	6,43	6,68	6,47	6,67	6,57	6,50	6,13	6,22
	Средний состав шлака, %								
	B	-	0,02	0,04	0,065	0,021	0,041	0,059	0,049
	MnO	17,63	11,14	12,92	14,69	7,98	9,77	11,79	10,68
	CaO	39,46	47,80	45,81	42,43	50,26	48,63	47,42	50,25
	SiO <sub>2</sub>	30,35	28,12	26,95	24,96	27,92	27,03	26,34	25,12
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,96	7,25	6,33	7,83	6,87	6,43	5,70	5,72
9	Основность шлака	1,3	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	2,0
	Кратность шлака	0,95	1,11	1,34	1,56	1,14	1,37	1,6	1,56
11	Извлечение марганца, %	82	84,5	83,5	82,7	87	83	82	81
12	Расход электроэнергии, кВт·час/т	4889	4986	5286	5333	4995	5315	5360	5450

углеродистого ферромарганца при основности конечного шлака равной 1,8 и бора в металле 0,02%. Кратность шлака составляет 1,14. Расход электроэнергии – 4995 кВт·час. Извлечение бора в сплав составило 10-12%, что близко к расчетному. Кремний во всех опытных плавках не превышает допустимого предела (2%).

### Выводы

Таким образом, в результате изучения выплавки углеродистого ферромарганца в крупно-лабораторных условиях установлена возможность передела марганцевых руд на высокоосновных шлаках при соответствующем регулировании транспортных свойств шлака на

стандартный металл с высокими технико-экономическими показателями. При этом наилучшие показатели достигаются при отношении CaO/SiO<sub>2</sub> в шлаке, равном 1,8 и с содержанием оксида бора в шлаке 0,8%. Установлено, что при этих условиях полученные борсодержащие высокоосновные шлаки углеродистого ферромарганца не подвержены рассыпанию.

### Конфликт интересов

От имени всех авторов корреспондент автор заявляет, что конфликта интересов нет.

## High-carbon ferromanganese smelting on high-base slags

<sup>1</sup> \*Sariyev O. R., <sup>2</sup> Dossekenov M. S., <sup>2</sup> Kelamanov B. S., <sup>1</sup> Abdirashit A. M.

<sup>1</sup> K.Zhubanov Aktobe regional university, Aktobe, Kazakhstan

<sup>2</sup> Research and engineering center ERG" Ltd, Aktobe, Kazakhstan

\* Corresponding author email: rafhatsson@mail.ru

Received: 22 September 2020  
Peer-reviewed: 24 October 2020  
Accepted: 25 November 2020

### ABSTRACT

The article presents the results of laboratory trials for the smelting of high-carbon ferromanganese on highly-basic slags. Laboratory trials have confirmed that an increase in the basicity of ferromanganese production slags has a positive effect on the reduction of manganese to the metal and a decrease in the concentration of silicon in it. However, the high basicity makes the slag high-melting and tough, leading to large losses of manganese with the slag. The use of on borate fluxes solves this problem by affecting the physical and chemical properties of the final slags, which allows the process to be carried out at high basicities with the achievement of optimal technological indicators. The obtained positive results of laboratory experiments served as the basis for approbation the developed technology on a semi-industrial scale with the smelting of high-carbon ferromanganese by the flux method from the manganese ore of the «Bogach» Deposit. As a result of studying the smelting of carbonaceous ferromanganese in large-scale laboratory conditions, the possibility of converting manganese ores on highly-basic slags with appropriate regulation of the transport properties of slag to a standard metal with high technical and economic indicators was established. The best results are achieved when the CaO/SiO<sub>2</sub> ratio in the slag is 1.8 and the boron oxide content in the slag is 0.8%. It is established that under these conditions, the obtained boron-containing highly-basic slags of carbonaceous ferromanganese are not subject to slaking.

**Keywords:** ferromanganese, borate fluxes, basicity, slag, degree of extraction.

### Information about authors:

*Candidate of Technical Sciences, docent of the Department of metallurgy, mining and oil and gas technical faculty of K.Zhubanov Aktobe regional university Aktobe, Kazakhstan. Email: rafhatsson@mail.ru*

**Sariyev Otegen Rafhatovich**

*Engineer of LLP «Scientific and research engineering centre of ERG», Aktobe, Kazakhstan. Email: dossekenov.ms@mail.ru*

**Dossekenov Murat Sagitzhanovich**

*Candidate of Technical Sciences, docent of the Department of metallurgy, mining and oil and gas technical faculty of K.Zhubanov Aktobe regional university Aktobe, Kazakhstan. Email: Kelamanov-b@mail.ru*

**Kelamanov Bauyrzhan Satybaldyuly**

*Master of technical Sciences, Lecturer at the Department of Metallurgy, Mining and Oil and Gas, Aktobe, Kazakhstan. Email: asik\_942017@mail.ru*

**Abdirashit Asylbek Miramkhanuly**

## Жоғары негізді қождарда жоғары көміртекті ферромарганецті балқыту

<sup>1</sup> \*Сариев О. Р., <sup>2</sup> Досекенов М. С., <sup>1</sup> Келаманов Б. С., <sup>1</sup> Әбдірашит А. М.

<sup>1</sup> Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университет, Ақтөбе, Қазақстан

<sup>2</sup> «ERG Ғылыми-зерттеу-инжиниринг орталығы» ЖШС, Ақтөбе, Қазақстан

\* Автордың электрондық почтасы: rafhatsson@mail.ru

Мақала келді: 22 қыркүйек 2020  
Сараптамалық шолу: 24 қазан 2020  
Қабылданды: 25 қараша 2020

### ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл мақалада жоғары негізді қождарда жоғары көміртекті ферромарганецті балқыту бойынша зертханалық және ірі зертханалық сынақтардың нәтижелері келтірілген. Зертханалық сынақтар кезінде ферромарганец өндірісі қождарының негізділігінің артуы марганецтің металға дейін тотықсыздануына және ондағы кремний концентрациясының төмендеуіне оң әсер ететіндігі анықталды. Алайда, жоғары негізділік қожды қиын балқытын және тұтқыр етеді, бұл марганецтің қожбен бірге жоғалуына әкеледі. Бор флюстерін қолданғанда, олар қождардың физико-химиялық қасиеттеріне әсер етіп бұл мәселені шешеді. Яғни үрдісті жоғары негізділікте жүргізіп оңтайлы технологиялық көрсеткіштерге қол жеткізуге мүмкіндік береді. Зертханалық тәжірибелерден алынған оң нәтижелер «Богач» кен орнының марганец кендерінен жоғары көміртекті ферромарганецті қождамалық әдіспен балқыту арқылы жартылай өнеркәсіптік ауқымда әзірленген технологияны сынақтан өткізуге негіз болды. Ірі зертханалық жағдайда көміртекті ферромарганецті балқытуды зерттеу нәтижесінде марганец кендерін жоғары техникалық

экономикалық көрсеткіштері бар стандартты металға арналған қождың тасымалдау қасиеттерін тиісті реттей отырып, жоғары негізді қождарда қайта бөлу мүмкіндігі анықталды. Бұл ретте ең жақсы көрсеткіштерге қождағы CaO/SiO<sub>2</sub> қатынасы 1,8-ге тең және қож құрамындағы бор оксиді 0,8% болған кезде қол жеткізіледі. Бұл жағдайда құрамында бор бар көміртегі ферромарганецінің жоғары негізді қождарының шашырауға ұшырамайтыны анықталды.

**Түйін сөздер:** Ферромарганец, боратты қождама, негізділік, қож, бөліну дәрежесі.

<b>Сариев Отеген Рафхатович</b>	<b>Авторлар туралы ақпарат:</b> техника ғылымдарының кандидаты, Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университетінің техникалық факультеті металлургия, тау-кен және мұнай-газ ісі кафедрасының доценті, Ақтөбе, Қазақстан. Email: rafhatsson@mail.ru
<b>Досекенов Мурат Сагитжанович</b>	«ERG ғылыми-зерттеу ижирингтік орталығы» ЖШС инженер-технологы, Ақтөбе, Қазақстан. Email: dossekenov.ms@mail.ru
<b>Келаманов Бауыржан Сатыбалдыұлы</b>	техника ғылымдарының кандидаты, Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университетінің техникалық факультеті металлургия, тау-кен және мұнай-газ ісі кафедрасының доценті, Ақтөбе, Қазақстан. Email: kelamanov-b@mail.ru
<b>Әбдірашит Асылбек Мирамханұлы</b>	техника ғылымдарының магистрі, Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университетінің техникалық факультеті металлургия, тау-кен және мұнай-газ ісі кафедрасының оқытушысы, Ақтөбе, Қазақстан. Email: asik_942017@mail.ru

**Ссылка на данную статью:** Сариев О. Р., Досекенов М. С., Келаманов Б. С., Абдирашит А. М. Выплавка высокоуглеродистого ферромарганца на высокоосновных шлаках // *Комплексное использование минерального сырья = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* -2020. №4( 315), стр. 63-73. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.38>

**Cite this article as:** Sariev O. R., Dossekenov M. S., Kelamanov B. S., Abdirashit A. M. Vyplavka vysokouglerodistogo ferromargantsa na vysokoosnovnykh shlakakh [High-carbon ferromanganese smelting on high-base slags]. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* - 2020. № 4 (315), pp. 63-73. (In Russian). <https://doi.org/10.31643/2020/6445.38>

## Литература

- [1] Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Теория и технология производства ферросплавов. - М.: Металлургия, 1988. - С. 206-207.
- [2] Марганец. Гасик М.И. - М.: Металлургия, 1992. - 608 с.
- [3] Абдулабеков Е.Э. Разработка технологии окомкования мелочи хромитовой руды с применением керамзитовой глины: дисс. канд. техн. наук: - Караганда: ХМИ, 2006. - 129 с.
- [4] Пилоян Г.О., Новикова О.С. Термографический и термогравиметрический методы определения энергии активации процессов диссоциации // Журнал неорганической химии. - 1967. - Т.12, №3. - С.602-604.
- [5] Пилоян Г.О., Новикова О.С. О кинетике дегидратации синтетических цеолитов // Известия АН СССР. Неорганические материалы. - 1966. - Т.2, № 7. - С.1298-1301.
- [6] Kissinger H.E. // *Analyt. Chem.* - 1957. - Vol.29, №11. - P.1702.
- [7] Габдуллин Т.Г., Такенов Т.Д., Байсанов С.О. и др. Физико-химические свойства марганцевых шлаков. - Алма-Ата, 1984. - 232 с.
- [8] Бобкова О.С. Силикотермическое восстановление металлов. - М., 1981. - 130 с.
- [9] Aimy Tadasiko. The mineralogical investigation of manganese slags // *Ferroaroy*, Vol. 26, № 1-2, 1981, P. 1-10.
- [10] Марганец. Минерально-сырьевая база СНГ. Добыча и обогащение руд // Под ред. акад. К.Н. Трубецкого. - М.: Изд-во Акад. горных наук, 1999. - 271 с.
- [11] Состояние и перспективы мирового и внутреннего рынков цветных, редких и благородных металлов.: Информ.-анал. обзор. Вып. 16. Марганец и его ферросплавы. М.: ИАЦ ООО «ИнформетГео», 2002. – 213 с.
- [12] Жучков В.И., Смирнов Л.А., Зайко В.П., Воронов Ю.И. Технология марганцевых ферросплавов. Ч.1. Высокоуглеродистый ферромарганец. - Екатеринбург: Уро РАН, 2007. - 414с.
- [13] Святлов Б.А. Толымбеков М.Ж. Байсанов С.О. Становление и развитие марганцевой отрасли Казахстана. – Алматы: «Искандер», 2002. - 416 с.
- [14] Тигунов Л.П., Смирнов Л.А., Менаджиева Р.А. Марганец: геология, производство, использование. - Екатеринбург: АМБ, 2006. - 184 с.
- [15] Потконену Н.И. Марганец России: Состояние, перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы // Минеральное сырье. Сер. геол. эконом. М.: ВИМС, 2006, №10. – 287 с.
- [16] Kenzhaliev, V. K., Kvyatkovskii, S. A., Kozhakhmetov, S. M., Sokolovskaya, L. V., Kenzhaliev, É. B., & Semenova, A. S. (2019). Determination of Optimum Production Parameters for Depletion of Balkhash Copper-Smelting Plant Dump Slags. *Metallurgist*, 63(7-8), 759–765. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00886-9>

- [17] Manganese. Ore and Alloy Market Overview. IMnI, 2005.
- [18] Volodin V. N., Tuleushev Y. Zh., Kenzhaliyev B. K., ... Trebukhov S. A. (2020). Thermal degradation of hard alloys of the niobiumcadmium system at low pressure. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo syr'â/Complex Use of Mineral Resources/Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*, 1(312), 41–47. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.05>
- [19] Francaviglia D. Global Mn Industry Overview. IMnI Conference, June 11 – 13 . Cape Town, 2006.
- [20] New Developments in the Manganese Industry. IMnI Conference, June 11 – 13 . Cape Town, 2006.

## Reference

- [1] Gasik M.I., Lyakishev N.P., Emlin B.I. Teoriya i tekhnologiya proizvodstva ferrosplavov [Theory and technology of Ferroalloy production]. - M.: metallurgy, 1988. - Pp. 206-207. (In Russian).
- [2] Marganets [Manganese]. Gasik M. I.-M.: metallurgy, 1992. - 608 p. (In Russian).
- [3] Abdulabekov E. E. Razrabotka tekhnologii okomkovaniya melochi khromitovoy rudy s primeneniyem keramzitovoy gliny [Development of technology for pelletizing chromite ore fines using expanded clay].: Diss. kand. tehn. Sciences: - Karaganda: khmi, 2006. - 129 p. (In Russian).
- [4] Piloyan G. O., Novikova O. S. Termograficheskiy i termogravimetricheskiy metody opredeleniya energii aktivatsii protsessov dissotsiatsii [Thermographic and thermogravimetric methods for determining the activation energy of dissociation processes]. Journal of inorganic chemistry. - 1967. - Vol. 12, No. 3. - P. 602-604. (In Russian).
- [5] Piloyan G. O., Novikova O. S. O kinetike degidratatsii sinteticheskikh tselitov [On the kinetics of dehydration of synthetic zeolites]. // News of Academy of Sciences of the USSR. Inorganic material. - 1966. - Vol. 2, No. 7. - P. 1298-1301. (In Russian).
- [6] Kissinger Kh. E. // analit. Chem. - 1957. - Issue 29, No. 11. - P. 1702. (In English).
- [7] Gabdullin T. G., Takenov T. D., Baysanov S. O. and others. Fiziko-khimicheskiye svoystva margantsevykh shlakov [Physical and chemical properties of manganese slags]. - Alma-ATA, 1984. - 232 p. (In Russian).
- [8] Bobkova O. S. Silikotermicheskoye vosstanovleniye metallov [Silicothermic recovery of metals]. - M., 1981. - 130 p. (In Russian).
- [9] The Name Aimy Tadasiko. Mineralogical study of manganese slags // Ferroaroy, vol. 26, no. 1-2, 1981, pp. 1-10. (In English).
- [10] Marganets. Mineral'no-syr'yevaya baza SNG. Dobycha i obogashcheniye rud [Manganese. Mineral resource base of the CIS. Mining and processing of ores]. // Ed. Acad. K. N. Trubetskoy. - M.: Izd-vo Akad. mining Sciences, 1999. - 271 p. (In Russian).
- [11] Sostoyaniye i perspektivy mirovogo i vnutrennego rynkov tsvetnykh, redkikh i blagorodnykh metallov [State and prospects of the world and domestic markets of non-ferrous, rare and precious metals]: inform.- anal. review. Issue 16. Manganese and its ferroalloys. M.: IAC LLC "Informetgeo", 2002. - 213 p. (In Russian).
- [12] Zhuchkov V. I., Smirnov L. A., Zaiko V. P., Voronov Yu. I. Tekhnologiya margantsevykh ferrosplavov. CH.1. Vysokouglerodistyyy ferromarganets [Technology of manganese ferroalloys. Part 1. high-Carbon ferromanganese]. - Yekaterinburg: Uro RAS, 2007. - 414s. (In Russian).
- [13] Svyatov B. A. Tolybekov M. Zh. Baisanov S. O. Stanovleniye i razvitiye margantsevoy otrasli Kazakhstana [Formation and development of the manganese industry in Kazakhstan]. – Almaty: Iskander, 2002, 416 p. (In Russian).
- [14] Tigonov L. P., Smirnov L. A., Menadjieva R. A. Marganets: geologiya, proizvodstvo, ispol'zovaniye [Manganese: Geology, production, use]. - Yekaterinburg: AMB, 2006. - 184 p. (In Russian).
- [15] Potkonenu N. I. Marganets Rossii: Sostoyaniye, perspektivy osvoyeniya i razvitiya mineral'no-syr'yevoy bazy [Manganese Of Russia: State, prospects of development and development of mineral raw materials base]. // Mineral raw materials. Ser. GEOL. economy. m.: VIMS, 2006, no. 10. - 287 p. (In Russian).
- [16] Kenzhaliev, B. K., Kvyatkovskii, S. A., Kozhakhmetov, S. M., Sokolovskaya, L. V., Kenzhaliev, É. B., & Semenova, A. S. (2019). Determination of Optimum Production Parameters for Depletion of Balkhash Copper-Smelting Plant Dump Slags. *Metallurgist*, 63(7-8), 759–765. (In English). <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00886-9>
- [17] Manganese. Overview of the ore and alloys market. From IMnI 2005. (In English).
- [18] Volodin V. N., Tuleushev Y. Zh., Kenzhaliyev B. K., ... Trebukhov S. A. (2020). Thermal degradation of hard alloys of the niobiumcadmium system at low pressure. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo syr'â/Complex Use of Mineral Resources/Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*, 1(312), 41–47. (In English). <https://doi.org/10.31643/2020/6445.05>
- [19] Francavilla D. Global Review of the MN Industry. IMnI Conference, June 11-13 . Cape Town, 2006. (In English).
- [20] New developments in the manganese industry. IMnI Conference, June 11-13 . Cape Town, 2006. (In English).