



УДК 621.745.56
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-118-124

Поступила 28.07.2018
Received 28.07.2018

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАВКИ ОТХОДОВ АЛЮМИНИЯ НА СОСТАВ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПЫЛИ

Л. В. ТРИБУШЕВСКИЙ, Б. М. НЕМЕНЕНОК, Г. А. РУМЯНЦЕВА, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: nemenenok@tut.by

Проведен анализ влияния технологии плавки отходов алюминия в короткопламенной роторной печи (КПП) на количество и состав пылегазовых выбросов.

Показано, что количество флюса, используемого при плавке, существенно влияет на состав и объем пылегазовых выбросов. На основании результатов химического анализа пыли принято решение о безфлюсовой плавке отходов алюминия. В этом случае доля хлорсодержащих соединений составляет 1,4% при 75% оксидов алюминия, что позволяет использовать образующуюся пыль при получении раскислительной смеси или разжижителя рафинировочного шлага. На основании балансовых плавков показано, что при безфлюсовой плавке отходов алюминия реализуется безотходная технология переработки, обеспечивающая получение экологического и экономического эффекта.

Ключевые слова. *Отходы алюминия, пыль, хлориды, оксид алюминия, безотходная технология, экология.*

Для цитирования. *Трибушевский Л. В., Немененок Б. М., Румянцова Г. А. Влияние технологии плавки отходов алюминия на состав и возможность использования образующейся пыли // Литье и металлургия. 2018. Т. 92. № 3. С. 118–124. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-118-124.*

INFLUENCE OF THE TECHNOLOGY OF ALUMINUM WASTE MELTING ON THE COMPOSITION AND THE POSSIBILITY OF USING THE GENERATED DUST

L. V. TRIBUSHEVSKIY, B. M. NEMENENOK, G. A. RUMIANTSEVA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: nemenenok@tut.by

The influence of technology of aluminum waste melting in a short-rotary furnace (SRF) on the amount and composition of dust and gas emissions is analyzed.

It is shown that the amount of flux used in melting significantly influences the composition and volume of dust and gas emissions. Based on the results of the chemical analysis of dust a solution was adopted for the fluxless melting of aluminum waste. In this case, the proportion of chlorine-containing compounds is 1.4% at 75% of aluminum oxides, which makes it possible to use the formed dust to produce a deoxidizing mixture or a refiner slag. On the basis of balance melting, it is shown that with fluxless melting of aluminum waste, a waste-free processing technology is realized, ensuring ecological and economic effects.

Keywords. *Aluminum waste, dust, chlorides, aluminum oxide, wasteless technology, ecology.*

For citation. *Tribushevskiy L. V., Nemenenok B. M., Rumiantseva G. A. Influence of the technology of aluminum waste melting on the composition and the possibility of using the generated dust. Foundry production and metallurgy, 2018, vol. 92, no. 3, pp. 118–124. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-118-124.*

В качестве основного оборудования для исследования была выбрана короткопламенная роторная печь (КПП), работающая на плавильном участке Научно-производственной фирмы «Металлон» (г. Осиповичи).

Изучение процессов пылегазообразования при плавке отходов алюминия в КПП представляет экологический и экономический интерес как в плане разработки мероприятий по защите окружающей среды, так и решения вопросов экологического налогообложения и дальнейшего использования уловленной пыли.

На первом этапе исследований в качестве компонентов шихты использовали алюминиевые шлаки, сливы, спрессованные банки из-под напитков, алюминиевую стружку, роллеты и другой низкосортный лом, которые загружали совместно с 8% покровного флюса.



Рис. 1. Набор оборудования для определения пылегазовых выбросов при плавке отходов алюминия в КППП: *а* – аспиратор ОП 221 ТЦ; *б* – пневмометрическая трубка с микроманометром; *в* – электронный газоанализатор MSI 150 «EURO» с зондом; *г* – пробоотборник с комплектом фильтров

В газоходе от боровов перед циклоном в течение всей плавки отбирали пробы пыли в отходящих газах и определяли содержание в них CO, NO и NO_x с помощью электронного газоанализатора MSI 150 «EURO».

Набор необходимого оборудования, используемого при определении пылегазовых выбросов от короткопламенной роторной печи, показан на рис 1.

Концентрации анализируемых газов во время плавки имели резкие перепады, что вызвано периодической разгерметизацией печи для загрузки в нее переплавляемых шлаков. Диапазон изменения концентрации CO составлял 28–2520 ppm, а для NO_x – 13–35 ppm. При этом содержание NO в отходящих газах не превышало 33 ppm.

Максимальные пиковые выбросы пыли были характерны для начального периода плавки и ее заключительной стадии. Первые пики запыленности отходящих газов связаны с воспламенением и сгоранием лакокрасочных покрытий на банках из-под напитков, краски на роллетах и загрязнений в виде масел и СОЖ на алюминиевой стружке. Длительность этого периода составляла 5–7 мин при максимальной запыленности 1,52 г/м³. Во время плавки запыленность дымовых газов составляла 0,14–0,16 г/м³. Второй пик выбросов пыли характерен для заключительного этапа плавки, когда с поверхности расплава удаляется сухой шлак в изложницу или контейнер. По продолжительности он составляет 3–5 мин при запыленности отходящих газов 0,93–0,95 г/м³. Следует также учитывать, что общая запыленность будет превышать расчетные значения, поскольку часть частиц, особенно крупных, может огибать пробоотборник и не оседать на фильтре. Поэтому для более детального анализа образующейся пыли исследовали ее частицы, отобранные из циклона в конце плавки.

На рис. 2 приведены фотографии частиц пыли, полученные на сканирующем электронном микроскопе VEGA- II LMU.

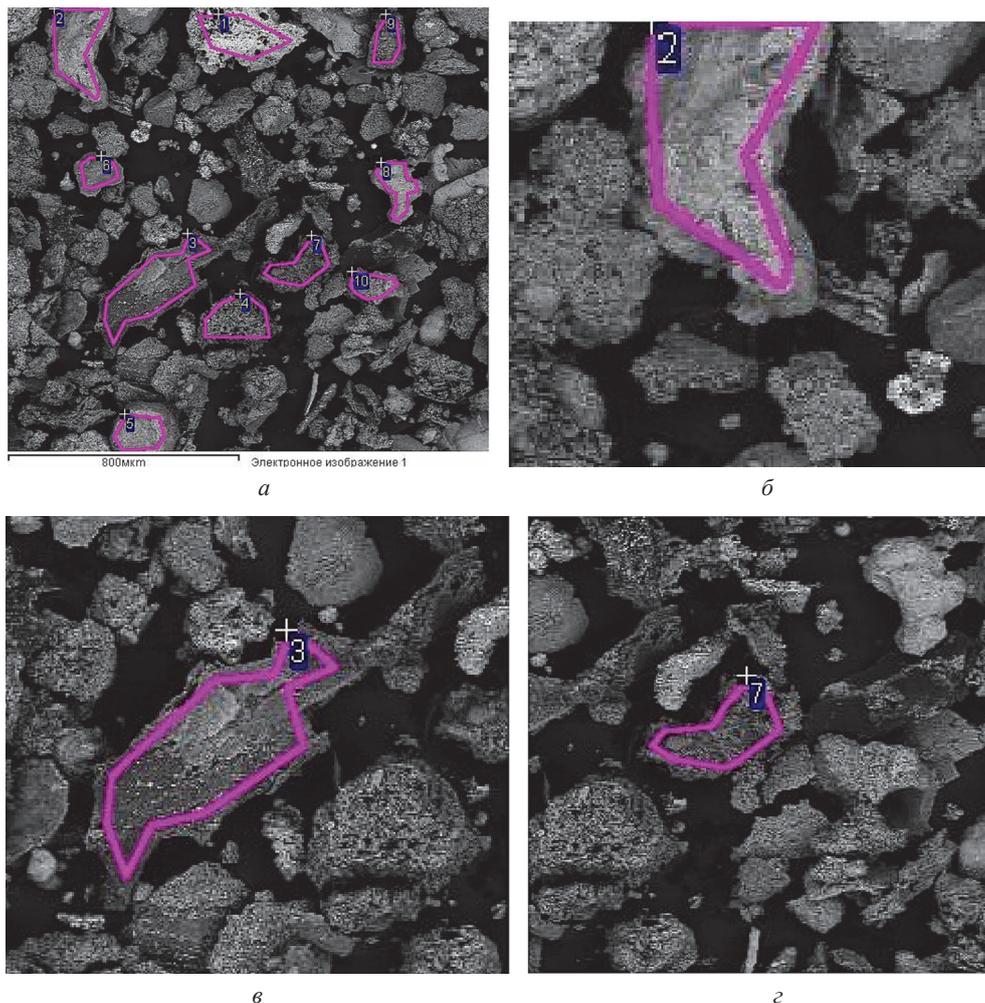


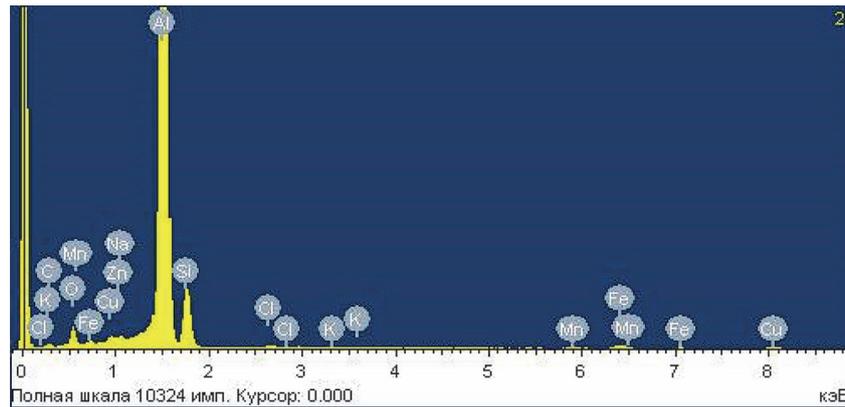
Рис. 2. Электронное изображение частиц пыли, отобранных из циклона при плавке в КППП (а) и частицы, выбранные для анализа энергетических спектров (б–г)

Как следует из рисунка, частицы пыли отличаются по размерам и цвету, что, очевидно, является признаком их разного химического состава. Для определения химического состава частиц пыли анализировали энергетические спектры рентгенофлуоресцентного излучения элементов, входящих в состав пыли для 10 частиц.

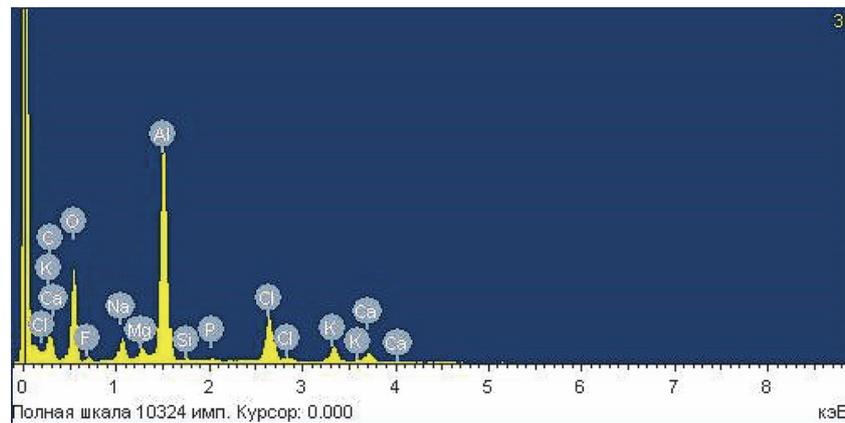
На рис. 3 показаны энергетические спектры частиц пыли, обозначенных на рис. 2 под номерами 2, 3, 7. Развернутый химический состав исследованных частиц пыли и их размеры приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что химический состав частиц пыли представлен широкой гаммой элементов как входящих в состав переплавляемых отходов алюминиевых сплавов, так и содержащихся в используемых флюсах.

Таблица 1. Химический состав и размер отдельных частиц пыли, отобранной из циклона от короткопламенной роторной печи

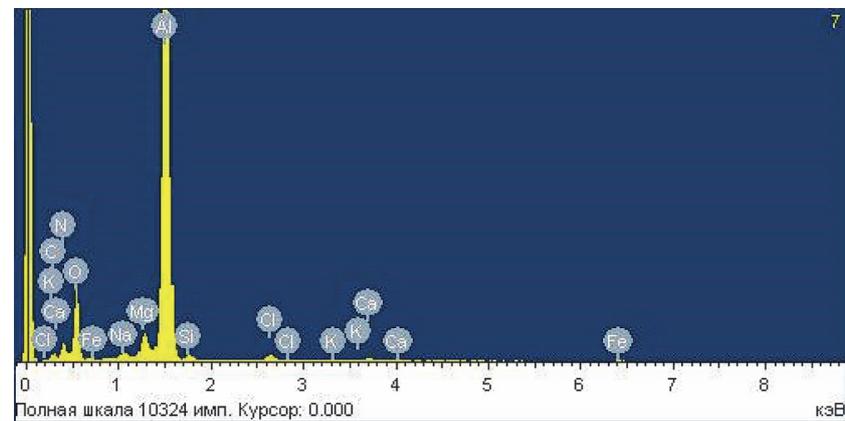
Номер частицы	Содержание элементов, мас.%													Средний размер частиц, мкм
	C	O	Al	Na	K	Ca	Cl	F	Si	Mg	Fe	Zn	Прочие элементы	
1	–	37,64	7,05	1,21	1,52	5,49	0,28	–	0,25	0,81	12,40	2,07	29,81 Ti; 1,46 Cr	250
2	5,84	8,68	70,66	0,21	0,12	–	0,23	–	10,39	–	1,56	0,78	0,59 Mn; 0,93 Cu	260
3	27,47	37,10	18,65	2,96	2,10	1,31	5,34	3,44	0,22	1,09	–	–	0,31 P	340
4	22,92	36,85	24,91	3,18	1,17	1,88	5,54	1,87	0,36	0,94	0,38	–	–	190
5	7,32	20,58	68,61	0,66	0,28	–	0,30	1,31	0,29	–	0,57	–	0,08 P	168
6	12,79	35,16	30,62	6,62	1,78	0,60	9,06	3,39	–	0,30	–	–	–	95
7	1,34	31,19	43,37	0,64	0,10	0,34	0,71	–	0,68	1,98	0,24	–	19,41 N	205
8	8,37	14,49	63,99	0,24	0,10	–	0,49	0,70	8,20	0,79	0,85	0,95	0,82 Cu	168
9	7,02	13,69	65,04	1,04	0,48	0,39	–	1,38	0,43	2,36	0,29	–	0,17 Ti; 7,71 N	135
10	13,20	32,38	40,87	1,66	0,21	0,71	1,52	–	2,15	1,20	0,96	4,56	0,38 Cu; 0,11 P; 0,08 S	145



a



б



в

Рис. 3. Энергетические спектры рентгенофлуоресцентного излучения элементов от частиц пыли № 2 (*a*), № 3 (*б*), № 7 (*в*)

Присутствие углерода в составе частиц пыли, очевидно, связано с образованием сажистого углерода на их поверхности из-за разложения CO, неполного сгорания углеводородов жидкого топлива и образованием карбидов алюминия [1]. Наличие натрия, калия, кальция, хлора и фтора можно объяснить использованием покровного флюса, содержащего NaCl, KCl и CaF₂. Присутствие Si, Mg, Fe, Zn, Ti, Mn, Cu в составе частиц пыли связано с химическим составом переплавляемых отходов алюминия. Такие элементы, как сера и фосфор, могли оказаться в циклоне благодаря сгоранию остатков лакокрасочных покрытий и смазочных материалов. Соединения азота, присутствующие в частицах пыли, очевидно, соответствуют нитриду алюминия, образование которого возможно при плавке алюминия в пламенных печах [1, 2].

Содержание алюминия в анализируемых частицах колеблется от 7,05 до 70,66%, а концентрация кислорода изменяется от 8,68 до 37,64%, что связано с образованием широкой гаммы оксидных соединений. Размерный диапазон частиц пыли изменяется от 95 до 340 мкм и может включать отдельные частицы размером более 600 мкм [3].

При проведении опытных плавки с небольшими добавками покровно-рафинирующего флюса поверхность расплава покрывали слоем шлака из смеси хлоридов и оксидов, из которых в результате механического перемешивания при вращении печи образовывались сухие комочки (окатыши), не смачиваемые расплавом и легко уносимые отходящими газами. В результате анализа осевшей в дымоотводящей системе и циклоне пыли установлено наличие в ней шпинели, корунда, карбидных соединений, нитрида алюминия и хлоридов щелочных металлов, что хорошо согласуется с данными работ [1, 2].

На втором этапе исследовали состав пыли при плавке стружки с использованием жидкого флюса. В процессе плавки первоначально загружали флюс в количестве 40% от массы переплавляемой стружки, а после его расплавления и образования жидкой флюсовой ванны загружали порциями стружку. В результате вращения печи стружку замешивали в флюсовой расплав, при этом запыленность в газоходе не превышала 0,09 г/м³ при повышенных концентрациях хлоридов в газоходе от боровов. Для анализа потерь шихтовых материалов в виде мелкой пыли отбирали пробы пыли из циклона. Результаты микро-рентгеноспектрального анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты анализа химического состава пыли, отобранной из циклона, при плавке алюминиевой стружки с использованием 40% флюса

Номер пробы	Содержание элементов, мас.%								
	O	F	Cl	Na	K	Mg	Al	Si	C
1	14,96	8,89	32,56	18,14	9,29	0,58	3,00	0,48	12,10
2	16,30	9,46	31,96	17,48	9,36	0,25	2,88	0,34	11,97
3	14,26	8,76	33,06	17,69	9,84	0,53	2,78	0,50	12,58
4	13,62	7,98	34,46	18,02	10,18	0,62	2,24	0,36	12,52
5	15,53	9,23	32,71	17,76	9,39	0,59	2,34	0,38	12,07
Среднее	14,93	8,86	32,95	17,82	9,62	0,52	2,65	0,41	12,24

Из таблицы следует, что пыль содержит в своем составе вдвое меньшее количество компонентов и является более стабильной. Это объясняется отсутствием прямого контакта металла с факелом пламени и атмосферой печи, что исключало интенсивное окисление компонентов сплава, разрушение хрупких оксидных плен и унос их отходящими газами. Основную массу пыли составляли частицы NaCl и KCl, являющиеся основой флюса и обладающие высокой летучестью [4]. Характерная особенность пылевых отходов при такой технологии плавки – низкое содержание в них алюминия (менее 3%) при значительных концентрациях хлора и фтора (в сумме около 40%) [3]. Такой состав пыли практически исключает возможность ее дальнейшего использования и возникает необходимость переработки или захоронения значительных объемов солевых шлаков с уплатой соответствующего экологического налога.

Поэтому в дальнейших исследованиях основной упор был сделан на безфлюсовую плавку, особенно при переплаве алюминиевых шлаков или их просева. Принимая данное решение, исходили из соображения, что такие материалы еще содержат некоторое количество остатков флюсов, которого достаточно для разрушения оксидной пленки на корольках алюминия. Это необходимо для формирования бассейна из капель жидкого алюминия.

Результаты фазового анализа образцов пыли из циклона при безфлюсовой плавке приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты фазового анализа образцов пыли при безфлюсовой плавке, полученные на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3

Фаза	Al	Al ₂ O ₃	Al _{2,144} O _{3,2}	Mg _{0,388} Al _{2,408} O ₄	Al ₂ O	Al ₂ O ₃	Al ₅ SiO _{9,5}	KAlSi ₃ O ₈	CaAl ₄ O ₇	Na _{0,3835} K _{0,6165} Cl
Номер карточки из базы данных	4-787	78-2426	79-1558	76-306	75-277	71-1128	88-2049	72-77	76-706	75-299
Концентрация, %	12,2	36,8	5,7	4,9	21,7	10,4	3,9	1,9	1,1	1,4

Как следует из таблицы, в пыли циклона при таком варианте плавки преобладают оксиды алюминия различных форм с общей концентрацией около 75 %, шпинели, содержащие в своем составе оксиды алюминия (~12 %) и 12 % чистого алюминия. Образование субоксида алюминия (Al₂O) характерно для плавки алюминия без покровного флюса в пламенных печах [5]. Следует отметить, что на долю хлорсодержащих соединений приходится только 1,4 %. Такой состав отходов позволяет использовать их при производстве раскислительных смесей для внепечной обработки стали или разжижителей рафинировочных шлаков.

Для оценки распределения материалов по ходу плавки в КППП проводили 16 опытных плавков с определением их материального баланса. Для этого взвешивали все компоненты шихты и полученные продукты в виде расплава, вторичного шлака и пыли, осевшей в циклоне.

Металлозавалка каждой плавки состояла из 250 кг роллет, 200 кг пробки, 70 кг просева шлака и 60–70 кг лома из алюминиевых радиаторов и конденсаторов. Общая масса шихты составляла 580–590 кг. Перед проведением балансовых плавков циклон полностью очищали от пыли, а после окончания серии балансовых плавков всю собравшуюся в циклоне пыль извлекали и взвешивали. Общая масса пыли по итогам 16 плавков составила 496 кг или в среднем 31 кг на плавку. Большие объемы образующейся пыли (примерно 31 кг на плавку) связаны с особенностями конструкции КППП, характеризующейся прямоточным движением горячих газов с высокой скоростью в рабочем пространстве печи. Это и обуславливает существенные потери шихты с развитой поверхностью во время плавки. Результаты балансовых плавков приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты балансовых плавков в короткопламенной роторной печи

Номер плавки	Масса компонентов шихты, кг				Масса шихты, кг	Масса продуктов плавки, кг			
	роллета	пробка	просев шлака	лом		металл	шлак	пыль	всего
1	250	200	70	70	590	339	235	31	605
2	250	200	70	70	590	362	243	31	636
3	250	200	70	70	590	376	230	31	637
4	250	200	70	70	590	366	236	31	633
5	250	200	70	70	590	322	204	31	557
6	250	200	70	70	590	387	162	31	580
7	250	200	70	70	590	349	177	31	557
8	250	200	70	70	590	340	193	31	564
9	250	200	70	70	590	345	212	31	588
10	250	200	70	70	590	349	203	31	583
11	250	200	70	70	590	335	221	31	587
12	250	200	70	70	590	348	201	31	580
13	250	200	70	60	580	364	196	31	591
14	250	200	70	60	580	330	214	31	575
15	250	200	70	60	580	352	172	31	555
16	250	200	70	60	580	349	182	31	562
Средн.					587,5	350,8	205	31	586,87

Из таблицы следует, что для некоторых плавков масса полученных продуктов превышает массу исходных материалов, хотя средние значения загруженных и полученных материалов по 16 плавкам практически совпадают. Причину превышения массы конечных продуктов по отдельным плавкам над массой исходной шихты можно, очевидно, объяснить частичным зависанием шлака в виде настывшей на футеровке печи по ходу плавки и последующим их смыванием во время следующих плавков. Это в итоге и обеспечило изменение металлургического выхода в диапазоне 55–64 %.

Анализ химического состава образовавшегося шлака показал, что остаточное содержание корольков алюминия в нем составляет 9–11%, а основным компонентом является Al_2O_3 , доля которого колеблется в пределах 69–74%. В меньшей степени представлены оксиды магния, кремния, железа, щелочных металлов.

Таким образом, вторичный шлак и пыль, образующиеся при безфлюсовой плавке отходов алюминия в КППП, являются подходящими компонентами для раскислительной смеси или разжижителей рафинировочного шлака. При этом масса используемых продуктов плавки (расплав+шлак+пыль) составляет 99,89% от массы загружаемой шихты, что позволяет отнести данную технологию переработки отходов алюминия к безотходной, обеспечивающей экономический и экологический эффект. В этом случае полностью реализуется концепция академика И. П. Бардина, когда отходы одного производства являются сырьем для другого производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Повышение** экологической безопасности процессов плавки и рафинирования алюминиевых сплавов / С. П. Задруцкий [и др.]. Минск: БНТУ, 2012. 231 с.
2. **Шмитц К.** Рециклинг алюминия. Справ. руковод. / К. Шмитц, Й. Домагала, П. Хааг. М.: Алусил МВиТ, 2008. 528 с.

3. **Пылегазовые выбросы** при плавке алюминиевых отходов в короткопламенной роторной печи / Б. М. Немененок [и др.] // *Металлургия машиностроения*. 2010. № 1. С. 15–19.
4. **Флюсовая обработка и фильтрование** алюминиевых расплавов / А. В. Курдюмов [и др.]. М.: *Металлургия*, 1980. 196 с.
5. **Фомин Б. А.** *Металлургия вторичного алюминия* / Б. А. Фомин, В. И. Москвин, С. В. Махов. М.: ЭКОМЕТ, 2004. 240 с.

REFERENCES

1. **Zadrutskiy S. P., Nemenenok B. M., Rumyantseva G. A., Sletova N. V.** *Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti protsesov plavki i rafinirovaniya alyuminievykh splavov* [Increase of ecological safety of processes of melting and refining of aluminum alloys]. Minsk, BNTU Publ., 2012. 231 p.
2. **Shmitc K., Domagala J., Haag P.** *Recikling alyuminija* [Recycling of aluminum]. Moscow, Aljusil MViT Publ., 2008. 528 p.
3. **Nemenenok B. M., Rumyantseva G. A., Tribushevskiy L. V., Zadrutskiy S. P.** *Pylegazovye vybrosy pri plavke alyuminievykh otkhodov v korotkoplamennoy rotornoy pechi* [Dust emissions of aluminum waste melting in a short-rotary furnace]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2010, no 1, pp. 15–19.
4. **Kurdyumov A. V., Inkin S. V., Chulkov V. S., Grafas N. I.** *Flyusovay obrabotka i fil'trovaniye alyuminievykh rasplavov* [Flux processing and filtration of aluminum melts]. Moscow, Metallurgija Publ., 1980. 196 p.
5. **Fomin B. A., Moskvin V. I., Makhov S. V.** *Metallurgiya vtorichnogo alyuminiya* [Metallurgy of secondary aluminum]. Moscow, Ekomet Publ., 2004. 240 p.