



УДК 669.715:621.746

Поступила 13.04.2015

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПЛАВКИ АЛЮМИНИЕВОЙ СТРУЖКИ И ШЛАКА В КОРОТКОПЛАМЕННОЙ РОТОРНОЙ ПЕЧИ

### THE ANALYSIS OF PROCESS OF MELTING OF ALUMINIUM SHAVING AND SLAG IN THE SHORT-FLAME ROTOR FURNACE

*Л. В. ТРИБУШЕВСКИЙ, Б. М. НЕМЕНЕНОК, Г. А. РУМЯНЦЕВА, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, В. С. РИМОШЕВСКИЙ, Московский институт стали и сплавов, Москва, Россия*

*L. V. TRIBUSHEVSKIY, B. M. NEMENENOK, G. A. RUMYANTSEVA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, V. S. RIMOSHEVSKIY, Moscow Institute of Steel and Alloys, Moscow, Russia*

*Проведен анализ результатов 180 плавов в короткопламенной роторной печи с использованием в качестве шихтовых материалов алюминиевой стружки, шлака и просева шлака. Оценено влияние состава шихты на металлургический выход и длительность плавки. Определены составы шихты, обеспечивающие максимальный металлургический выход.*

*The analysis of results of 180 casts in the short-flame rotor furnace with use in quality the batch mixture of aluminum shaving, slag and pro-sowing of slag is carried out. Influence of composition of furnace charge on a metallurgical exit and duration of melting is estimated. The compositions of furnace charge providing the maximum metallurgical exit are defined.*

**Ключевые слова.** *Короткопламенная роторная печь, стружка, шлак, металлургический выход, длительность плавки.*

**Keywords.** *Short-flame rotor furnace, shaving, slag, metallurgical exit, cast duration.*

Процессы рециклинга алюминия обеспечивают 35% мирового потребления алюминия и позволяют сохранять резервы ископаемого сырья для производства алюминия, обеспечивают 95%-ную экономию энергии и защиту окружающей среды [1]. Особую важность проблема рециклинга алюминия имеет в Республике Беларусь, где отсутствует производство первичного алюминия и сплавов на его основе. Поэтому переработка алюминиевой стружки и шлаков является важным резервом для расширения объемов производства литейных алюминиевых сплавов. В общем объеме накопления вторичного алюминиевого сырья, по данным ОАО «Белцветмет», доля стружки составляет более 26%, а шлака – более 13%.

Крупные производители алюминиевого литья переплавляют стружку самостоятельно и добавляют переплав в шихту при получении расплава. Использование стружки в местах ее образования, помимо экономии более дорогих и дефицитных первичных материалов, обеспечивает следующие экономические выгоды: сокращение нерациональных встречных перевозок стружки и первичных материалов, а также продолжительности ее хранения, что ведет к снижению потерь от окисления металла; экономятся топливо и электроэнергия за счет ликвидации одного этапа переработки металла; сокращаются неизбежные потери металла при транспортировании отходов; уменьшаются возможность смешивания стружки разных марок и, как следствие, объем некондиционных отходов, что приводит к прямой экономии дефицитных легирующих элементов, содержащихся в большом количестве в поршневых алюминиевых сплавах; уменьшаются объемы погрузочно-разгрузочных работ и потребности в складских помещениях [2].

Более мелкие производители алюминиевого литья и предприятия, специализирующиеся на механической обработке таких изделий, сдают стружку на ОАО «Белцветмет». В зависимости от степени засоренности стружка используется при выплавке марочных алюминиевых сплавов или раскислителей, а также реализуется другим организациям, которые специализируются на переработке алюминиевой стружки и шлаков. Одной из таких организаций является Научно-производственная фирма (НПФ) «Металлон», которая более 20 лет занимается переработкой отходов алюминия с высокой окисленностью

(стружка, шлаки, съемы). В качестве плавильного агрегата используется короткопламенная роторная печь емкостью 800 кг, работающая на жидком топливе. От других типов роторных печей данный плавильный агрегат отличается тем, что здесь пламя и отходящие газы не совершают петлеобразное движение, а покидают рабочее пространство через дымовое окно в противоположном конце печи, которое примыкает к борovu, переходящему в канал удаления дымовых газов. Отходящие газы в меньшей степени отдают свое тепло футеровке и шихте, чем у роторных печей с наклонной осью вращения. Однако такая конструкция печи обеспечивает меньший выброс пыли и газа в месте стыковки горелочного щита с корпусом печи, что улучшает санитарно-гигиенические условия труда плавильщиков.

При использовании любых печей, у которых открытое пламя контактирует с металлом, необходимо предусматривать его защиту от окисления и угара. Алюминий имеет большое сродство к кислороду и в результате самопроизвольной реакции с окружающим воздухом образуется оксид алюминия. В жидком состоянии также образуется оксидная пленка, которая постоянно разрушается под действием температуры, вследствие чего происходит дальнейшее окисление расплава. Эффект усиливается, если расплавленный металл имеет достаточно большую удельную площадь поверхности. Реакцию окисления необходимо ограничивать при плавке, поскольку оксиды алюминия в процессе рециклинга не восстанавливаются и их образование определяет стоимость потерь в процессе переработки. Наиболее распространенным является процесс плавки под защитным слоем флюса, основу которого составляют хлориды натрия и калия. Флюсы необходимы не только для защиты металла от окисления, но и выполнения ряда других задач. Флюс, во-первых, покрывает загруженную в печь шихту и, тем самым, защищает ее от контакта с воздухом или атмосферой печи, уменьшая окисление металла. Во-вторых, каждая частица металла покрыта тонкой оксидной пленкой и задача флюса состоит в том, чтобы после расплавления металла эту оксидную пленку разрушить. В-третьих, образовавшиеся при плавлении капли жидкого металла должны коагулировать и слиться с расплавленной ванной, поэтому назначение флюса – стимулировать этот процесс, который при вращении корпуса печи ускоряется. В-четвертых, флюс должен растворять или отделять прилипшие к металлу примеси.

При плавке в пламенных печах следует учитывать, что слой флюса затрудняет передачу тепла от факела сжигаемого топлива к расплаву. В результате взаимодействия факела с расплавом образуется шлак, который является хорошим теплоизолятором. Так, при толщине шлака 100 мм на плавление алюминия затрачивается на 30% больше энергии, чем при слое шлака в 25 мм [3]. Поэтому с экономической и экологической точек зрения нежелательно иметь излишек флюса, поскольку его стоимость увеличивает производственные затраты, как и утилизация солевого шлака, удаляемого из печи в конце плавки.

В издержках на производство отливок из алюминиевых сплавов заметное место занимает стоимость потерь металла и расходуемой при приготовлении сплавов энергии. Эти статьи расходов достигают 50% в сумме общих производственных затрат и имеют в последние годы тенденцию к увеличению, обусловленному ростом цен на энергоносители [4]. Поэтому одним из важных направлений повышения конкурентоспособности предприятий, производящих отливки, является уменьшение потерь металла и энергии, а также использование более дешевых шихтовых материалов – стружки и шлаков.

Шлаки, образующиеся при плавке алюминия и его сплавов, представляют собой конгломерат высокотемпературных образований из смеси металла, оксидов и солей. При удалении шлаков вместе с ними захватывается значительное количество металла, достигающее 70–80% от массы шлака, для извлечения которого нужна специальная технология [5, 6]. В зависимости от содержания металла алюминиевые шлаки разделяют на «черные» шлаки (8–13% Al; 30–35% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; NaCl + KCl остальное) и «белые» шлаки (60–70% Al; 20–35% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; NaCl + KCl остальное).

Проблема переработки алюминиевого шлака с годами становится все более актуальной как с точки зрения экономической выгоды, достигаемой из-за извлечения металлического алюминия и побочных товарных продуктов, так и вследствие общемировой политики ужесточения требований по охране окружающей среды и захоронению отходов.

Эффективность процессов переработки алюминиевой стружки и шлаков зависит от многих факторов. Для выбора наиболее рациональных параметров технологии плавки в короткопламенной роторной печи анализировали результаты 180 плавов. При проведении исследований в качестве компонентов шихты использовали алюминиевую стружку с засоренностью 6 и 25%; алюминиевые шлаки с содержанием 50–68% алюминия; просев алюминиевого шлака с фракцией более 10 мм. В ходе проведения плавов контролировали состав и массу шихты, засоренность стружки, металлургический выход, химический состав получаемого сплава и продолжительность плавки. Массу стружки в ходе плавов варьирова-

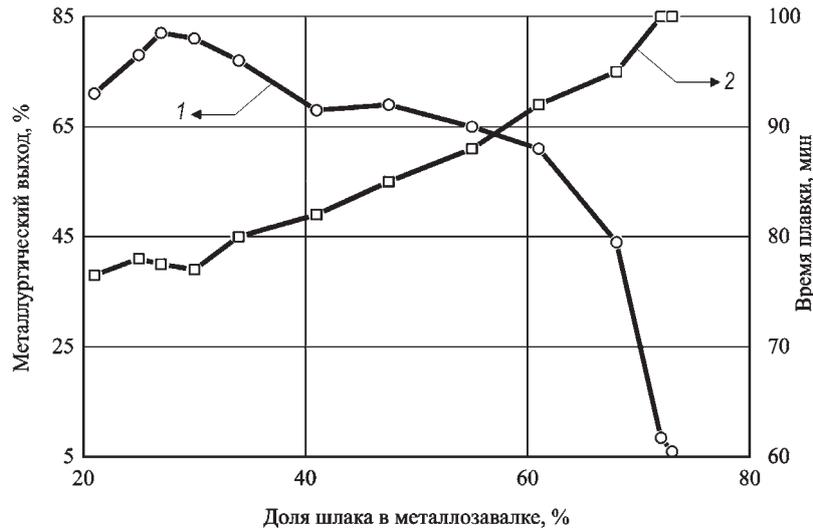


Рис. 1. Влияние доли шлака в металлозавалке на металлургический выход (1) и длительность плавки (2)



Рис. 2. Влияние отношения шлака к стружке с засором 25% в составе шихты на металлургический выход (1) и длительность плавки (2)

ли в пределах 140–440 кг, добавку шлака изменяли в пределах 0–360 кг, просев шлака добавляли в количестве 0–160 кг на плавку. Флюс при плавке не использовали. Установлено, что увеличение доли шлака с 22 до 30% в металлозавалке, состоящей из шлака и алюминиевой стружки, приводит к повышению металлургического выхода с 71 до 83% (рис. 1).

Длительность плавки при этом изменяется незначительно и находится в пределах 76–78 мин, что можно объяснить условиями хорошей теплопроводности шихты из-за заполнения шлаком промежутков между частицами стружки. С ростом добавки шлака шихта насыщается оксидом алюминия с низкой теплопроводностью, что задерживает процесс нагрева шихты и ее плавления и приводит в результате к увеличению продолжительности плавки. Так, при доле шлака в металлозавалке чуть больше 60% время плавки составляет 92 мин. С увеличением доли шлака с 30 до 68% отмечается устойчивое снижение металлургического выхода с 83 до 44%. При содержании шлака в металлозавалке более 68% металлургический выход падает до 7% при увеличении длительности плавки с 95 до 100 мин. Следует отметить, что при таком варианте плавки роль флюса выполняли только соли, которые содержались в шлаке. По мере увеличения доли шлака в шихте происходило накопление тугоплавких оксидов алюминия, вносимых шлаком, что приводило к росту вязкости флюсов и снижению их способности к растворению  $Al_2O_3$ . Это и привело в итоге к снижению металлургического выхода. Такая закономерность установлена при засоренности стружки 25%.

Анализ влияния соотношения шлака к стружке в составе шихты на металлургический выход и длительность плавки при засоренности стружки 25% показал, что максимальный металлургический выход характерен при отношении шлака к стружке в диапазоне 35–40% (рис. 2).

При таком соотношении отмечается и низкая продолжительность плавки 77–78 мин. Дальнейшее увеличение количества шлака в составе шихты приводит к снижению металлургического выхода и повышению продолжительности плавки. Кроме указанных ранее причин снижения металлургического выхода при изменении состава шихты, можно отметить также негативное влияние на данный процесс



Рис. 3. Влияние отношения просева шлака к стружке на металлургический выход (1) и длительность плавки (2)

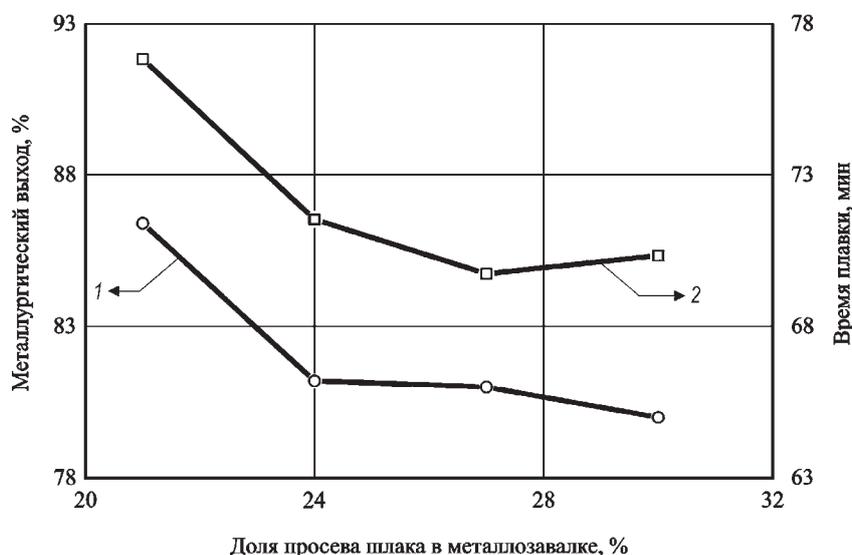


Рис. 4. Влияние доли просева шлака в металлозавалке на металлургический выход (1) и время плавки (2) алюминиевой стружки с засоренностью 25%

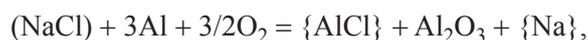
и увеличение времени плавки, которое проявляется в повышении безвозвратных потерь металла за счет его угара. При засоре стружки 6% металлургический выход увеличивается до 91–93% при времени плавки 70–71 мин и отношении шлака к стружке 30–40%.

Проведение серии плавки на шихте, состоящей из стружки с засоренностью 25% и просева шлака, показало, что максимальный металлургический выход характерен при отношении просева шлака к стружке в диапазоне 25–27% (рис. 3).

Дальнейшее увеличение количества просева шлака в составе металлозавалки приводит к устойчивому снижению металлургического выхода. Минимальный металлургический выход (около 80%) отмечается при отношении просева шлака к стружке в районе 36% и в дальнейшем изменяется незначительно. Для данного соотношения характерно и минимальное время плавки, которое составляет менее 69 мин (рис. 3).

При оценке влияния доли просева шлака в составе металлозавалки на металлургический выход и продолжительность плавки (рис. 4) установлено стабильное снижение металлургического выхода с увеличением доли просева шлака.

Для выяснения данного явления были проанализированы обменные реакции между жидким алюминием и компонентами солевой фазы (NaCl, KCl) в присутствии компонентов газовой фазы. С большой вероятностью можно считать, что имеет место реакция, протекающая с образованием монохлорида алюминия:



что подтверждает расчет значений изменений энергии Гиббса,  $\Delta G^\circ_{1050\text{K}} = -1166240$  Дж.

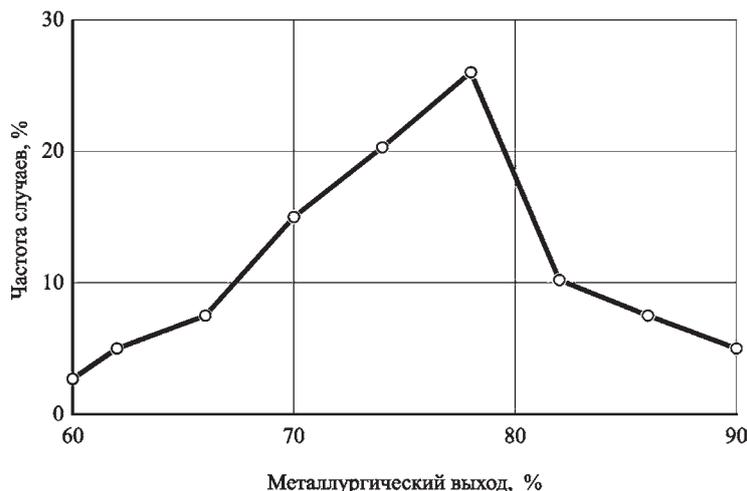


Рис. 5. Частотная кривая распределения показателей металлургического выхода при использовании в шихте стружки, шлака и просева шлака

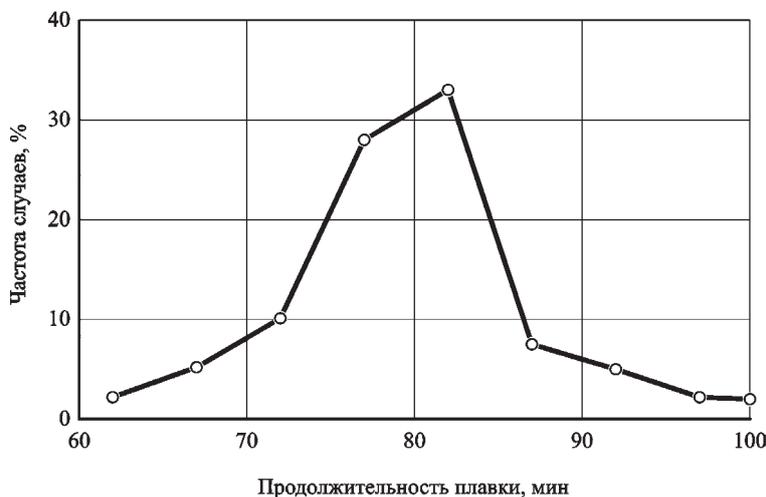
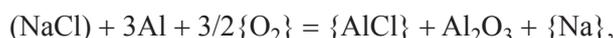
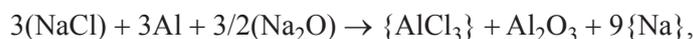


Рис. 6. Частотная кривая распределения значений длительности плавки при использовании в шихте стружки, шлака и просева шлака

Образовавшийся натрий диффундирует к поверхности солевого расплава, окисляется, образуя практически нелетучий оксид натрия  $\text{Na}_2\text{O}$  (при 1050 К), но неограниченно растворимый в хлоридах натрия и калия. Образование субсоединений и натрия может протекать также по реакциям:



$\Delta G^\circ_{1050\text{K}}$  – соответственно –329 940 Дж; –365 570; –3050; –1 166 240 Дж.

По мнению С. Б. Новичкова [7], образующийся натрий играет роль переносчика кислорода к границе раздела «жидкий алюминий – солевой расплав» и обеспечивает окисление алюминия до  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Выделяющийся при этом летучий субхлорид алюминия покидает реакционную зону и вместе с образованием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  вызывает безвозвратные потери металла.

Продолжительность плавки до содержания просева шлака в металлозавалке на уровне 27% постоянно снижается, что можно объяснить увеличением в составе шихты доли компонента с более низкой температурой плавления. При превышении данного соотношения отмечается незначительное увеличение продолжительности плавки, что можно связать с насыщением ванны расплава оксидом алюминия с высокой температурой плавления.

Использование в металлозавалке стружки, шлака и просева шлака обеспечило получение максимального металлургического выхода на уровне 90% (рис. 5) для 5% плавки. При этом разброс показате-

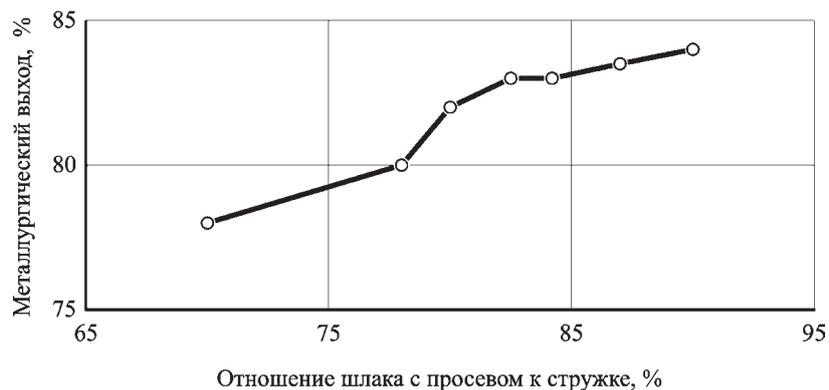


Рис. 7. Зависимость металлургического выхода от отношения шлака с просевом к массе стружки

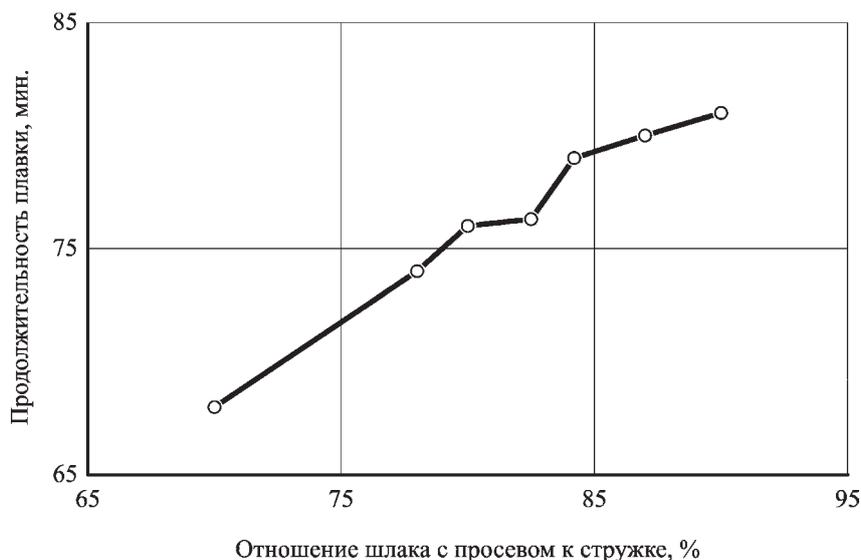


Рис. 8. Зависимость продолжительности плавки от отношения шлака с просевом к массе стружки

лей металлургического выхода составил от 60 до 90% при максимальном количестве плавков (25%) с металлургическим выходом 78%.

Продолжительность плавков на такой шихте также хорошо описывается частотной кривой с нормальным распределением случайных величин (рис. 6).

Продолжительность плавков изменяется от 62 до 100 мин, при этом максимальное количество плавков (33%) имеют продолжительность около 82 мин.

При исследовании зависимости металлургического выхода от отношения шлака с просевом к стружке (рис. 7) установлено, что с увеличением массы шлака с просевом в составе шихты с 70 до 90% наблюдается увеличение изучаемого показателя с 78 до 84%.

Одновременно отмечается и рост продолжительности плавки с 67 до 81 мин для исследуемых соотношений шлака с просевом к массе стружки (рис. 8).

### Выводы

Проведенные исследования показали, что при плавке в короткопламенной роторной печи алюминиевой стружки с засоренностью 25% и шлаков максимальный металлургический выход (около 86%) обеспечивается при использовании в металлозавалке вместе с алюминиевой стружкой просева шлака в количестве 21%. В случае плавки алюминиевой стружки и непросеянного шлака максимальный металлургический выход 81–82% достигается при доле шлака в металлозавалке 28–30%. Продолжительность плавки в обоих случаях составляет 76–77 мин.

### Литература

- Макаров Г. С. Развитие производства вторичного алюминия в России // Цветные металлы. 2004. № 1. С. 62–66.
- Галдин Н. М. Использование отходов металлообработки в литейных цехах машиностроительных заводов // Литейное производство. 1996. № 12. С. 10–13.

3. Пискарев Д. В., Казаков П. В., Ульянов Д. С. Флюсовая обработка – просто и доступно // Цветные металлы. 2010. № 12. С. 64–68.
4. Макаров Г. С. Слитки из алюминиевых сплавов с магнием и кремнием для прессования. М.: Интермет Инжиниринг, 2011. 528 с.
5. Шмитц К., Домагала Й., Хааг П. Рециклинг алюминия. Справочное руководство. М.: Алюсил МВиТ, 2008. 528 с.
6. Фомин Б. А., Москвитин В. И., Мазов С. В. Metallurgy вторичного алюминия. М.: ЭКОМЕТ, 2004. 240 с.
7. Новичков С. Б. Теория и практика переработки отходов алюминия в роторных наклонных печах: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Иркутск, 2007. 40 с.

### References

1. Макаров Г. С. Развитие производства вторичного алюминия в России [Development of production of secondary aluminum in Russia]. *Cvetnye metally – Non-ferrous metals*, 2004, no.1, pp. 62–66.
2. Галдин Н. М. Использование отходов металлообработки в литейных цехах машиностроительных заводов [Use of waste of metal working in foundries of engineering plants]. *Litejnoe proizvodstvo – Foundry*, 1996, no.12, pp. 10–13.
3. Пискарев Д. В., Казаков П. В., Ул'янов Д. С. Флюсовая обработка – просто и доступно [Flux processing – simple and available]. *Cvetnye metally – Non-ferrous metals*, 2010, no.12, pp. 64–68.
4. Макаров Г. С. *Slitki iz aljuminievyh splavov s magniem i kremniem dlja pressovanija* [Ingots from aluminum alloys with magnesium and silicon for pressing]. Moscow, Intermet Inzhiniring Publ., 2011. 521 p.
5. Shmitc K., Domagala J., Haag P. *Recikling aljuminija* [Recycling of aluminum]. Moscow, Aljusil MViT Publ., 2008. 528 p.
6. Fomin B. A., Moskvitin V. I., Mazov S. V. *Metallurgija vtorichnogo aljuminija* [Metallurgy of secondary aluminum]. Moscow, EKOMET Publ., 2004. 240 p.
7. Novichkov S. B. *Teorija i praktika pererabotki othodov aljuminija v rotornyh naklonnyh pechah* [Theory and practice of aluminum waste processing at rotor inclined furnaces]. *Avtoref. dokt. diss.* Irkutsk, 2007. 40 p.

### Сведения об авторах

Трибушевский Леонид Владимирович, тел. +375(29)663-19-55, Немененок Болеслав Мечеславович, e-mail: nemenenok@tut.by, Румянцева Галина Анатольевна, Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, Минск, Беларусь.

Римошевский Владислав Сергеевич, Московский институт стали и сплавов, Москва, Россия, тел. +7(962)969-58-02.

### Information about the authors

Tribushevskiy Leonid, tel. +375(29)663-19-55, Nemenenok Boleslav, e-mail: nemenenok@tut.by, Rumyantseva Galina, Belarusian National Technical University, pr. Nezavisimosti 65, Minsk, Belarus.

Rimoshevski Vladislav, Master's Degree Student, Moscow Institute of Steel and Alloys, Moscow, Russia, tel. +7(962)969-58-02.