

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ПОВЫШАЮЩИХ ВЫХОД ГОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ПЕРЕПЛАВЕ АЛЮМИНИЕВЫХ ОТХОДОВ

© 2021 г. В.Н. Гушин, Д.А. Шпилев, Д.Л. Медведев

Нижегородский государственный технический университет (НГТУ)  
им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Россия

*Статья поступила в редакцию 27.01.20 г., доработана 02.08.20 г., подписана в печать 28.09.20 г.*

**Аннотация:** Приведены результаты исследований по выявлению наиболее эффективных технологий повышения выхода годного металла при переработке алюминийсодержащих отходов. Проанализированы особенности процессов выплавки алюминиевых сплавов с использованием комплексных методов печной и внепечной обработки шихтового материала, содержащего повышенное количество мелкого возврата и стружки. Исследования по определению влияния подготовки шихты и технологии переплавки алюминия на выход годного проведены в печах САТ-0,16 и ИАТ-0,4 на сплаве АК12М2. Экспериментально установлено, что порционная загрузка в печь САТ-0,16 по 20 кг брикетированной стружки, предварительно нагретой до 300–400 °С, с последующим добавлением флюса (состав: NaCl – 50 %, KCl – 35 %, Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> – 15 %) в количестве 3 % от металлозавалки является наиболее эффективной технологией и позволяет добиться выхода годного порядка 94 %. Изучение влияния технологии переплава на выход годного в печи ИАТ-0,4 показало, что наибольший эффект можно получить при загрузке садки (95 кг брикетированной стружки) частями по 2 кг в жидкую ванну массой 7 кг с порционной добавкой флюса (состав: NaCl – 62 %, KCl – 13 %, NaF – 25 %) в количестве 2 % от металлозавалки. Такая технология позволяет получить до 93,5 % годного металла. Проанализированы данные 10 серий по 5–9 плавок и приведены сравнительные результаты по определению выхода годного металла в зависимости от массы загружаемой брикетированной стружки в печь. Получена гистограмма изменения пористости образцов из сплавов АК12М2 и АК9 в зависимости от содержания стружки в шихте (от 0 до 45 %) при переплаве. Установлено, что при прочих равных условиях увеличение содержания стружки в шихте приводит к росту среднего балла по пористости, что свидетельствует о необходимости дополнительного рафинирования таких расплавов.

**Ключевые слова:** алюминий, расплав, подготовка отходов к переплаву, плавильная печь, гидродинамика, флюсы, неметаллические включения, легирование, модифицирование, рафинирование, качество литого металла, выход годного.

**Гушин В.Н.** – докт. техн. наук, проф. кафедры металлургических технологий и оборудования НГТУ им. Р.Е. Алексева (603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24). E-mail: mto@nntu.ru; guschinvn@rambler.ru.

**Шпилев Д.А.** – магистрант кафедры металлургических технологий и оборудования НГТУ им. Р.Е. Алексева. E-mail: mto@nntu.ru.

**Медведев Д.Л.** – магистрант кафедры металлургических технологий и оборудования НГТУ им. Р.Е. Алексева. E-mail: mto@nntu.ru.

**Для цитирования:** Гушин В.Н., Шпилев Д.А., Медведев Д.Л. Исследование технологических факторов, повышающих выход годного металла при переплаве алюминиевых отходов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27. № 1. С. 66–75. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-1-66-75.

### Research of process factors increasing metal yield during aluminum waste remelting

V.N. Gushchin, D.A. Shpilev, D.L. Medvedev

Nizhny Novgorod State Technical University (NNTSU) n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

*Received 27.01.2020, revised 02.08.2020, accepted for publication 28.09.2020*

**Abstract:** The article presents the results of research determining the most effective technologies for increasing metal yield in the processing of aluminum-containing waste. In particular, peculiarities of the processes of melting aluminum alloys were analyzed using complex methods of furnace and off-furnace processing of charge material containing an increased amount of shovelling scrap and swarf. Studies on the impact of charge preparation and aluminum remelting technology were carried out in SAT-0,16 and IAT-0,4 furnaces on the AK12M2 alloy. Experiments proved that batchwise loading 20 kg of swarf briquette preheated to 300–400 °C into the SAT-0,16 furnace with the addition of

flux (composition: NaCl – 50 %; KCl – 35 %,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  – 15 %) in the amount of 3 % of total metal mass is the most efficient technology. This technology makes it possible to achieve a metal yield of about 94 %. The study of the remelting technology influence on IAT-0,4 furnace metal yield showed that the greatest effect can be obtained in case of furnace charge (95 kg swarf briquette) by batches of 2 kg into the 7 kg liquid bath with modifier flux (composition: NaCl – 62 %; KCl – 13 %, NaF – 25 %) added in the amount of 2 % from the total metal mass. This technology provides up to 93.5 % of metal yield. Data from 10 series of 5–9 melts were also analyzed with the comparison of metal yield results depending on the mass of briquetted swarf charged into the furnace. A histogram of the change in the porosity of AK12M2 and AK9 samples depending on the content of swarf in the charge (from 0 to 45 %) during remelting. It was found that an increase in the content of swarf in the charge, all other things being equal, leads to an increase in the average porosity score, which indicates the need for additional refining of such melts.

**Keywords:** aluminum, melt, waste preparation for remelting, melting furnace, hydrodynamics, fluxes, non-metallic inclusions, alloying, modification, refining, cast metal quality, yield.

**Gushchin V.N.** – Dr. Sci. (Eng.), prof. of the Department of metallurgical technologies and equipment, Nizhny Novgorod State Technical University (NNSTU) n.a. R.E. Alekseev (603950, Russia, Nizhny Novgorod, Minin str., 24).  
E-mail: mto@nntu.ru; guschinvn@rambler.ru.

**Shpilev D.A.** – postgraduate student of the Department of metallurgical technologies and equipment of NNSTU.  
E-mail: mto@nntu.ru.

**Medvedev D.L.** – postgraduate student of the Department of metallurgical technologies and equipment of NNSTU.  
E-mail: mto@nntu.ru.

**For citation:** Gushchin V.N., Shpilev D.A., Medvedev D.L. Research of process factors increasing metal yield during aluminum waste remelting. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2021. Vol. 27. No. 1. P. 66–75 (In Russ.).  
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-1-66-75.

## Введение

Мировое потребление алюминия ежегодно растет на 5–6 %. В развитых странах оно увеличивается за счет роста автопрома, в развивающихся — для обеспечения строительной и электротехнической отраслей. Среднедушевое потребление алюминия в мире по итогам 2015 г. оценивается в 7,7 кг. Ожидается, что к концу 2020 г. этот показатель возрастет до 9 кг [1]. В связи с этим повышается и спрос на более широкое использование вторичного сырья. Вовлечение вторичного металла в оборот, в свою очередь, уменьшает добычу руд, обеспечивает сохранение природных ресурсов и снижает загрязнение окружающей среды. Эффективно организованный переплав только одной алюминиевой стружки позволил бы сэкономить до 10 % шихтовых материалов [2–4].

Одной из главных проблем применения вторичного сырья при производстве алюминиевых сплавов является наличие в сырье примесей и загрязняющих веществ, включая масло, влагу и продукты коррозии. Это обуславливается тем, что среди алюмосодержащих отходов много стружки, фольги и мелкого лома, зачастую извлекаемого из бытовых отходов. Все это отрицательно сказывается на свойствах литья, в частности на выходе годного металла [5–7].

На сегодняшний день существует ряд методик и технологий, которые повышают выход годного металла при переплаве алюминиевых отходов для

дальнейшего получения сплава, но все они обладают как преимуществами, так и недостатками.

Наиболее распространены способы переплава вторичных материалов и стружки в отражательных газовых и индукционных канальных печах [8–10]. Также переплав стружки алюминиевых сплавов осуществляется и в индукционных тигельных печах — согласно данной технологии плавки, в тигле предварительно создают переходящую ванну жидкого металла путем расплавления вначале крупных отходов, а затем загрузки стружки до полной вместимости. Перед разливом расплав рафинируют дегазирующими флюсами [11, 12]. Недостатком этого способа переплава является низкое качество получаемого металла, обусловленное замешиванием неметаллических включений и окисных плен в расплав.

Для устранения этого недостатка (при переплаве мелких отходов и стружки алюминиевых сплавов) в работе [13] предлагаются наплавление ванны расплава в количестве 20–30 % от емкости тигля и ввод твердого активатора с положительной плавучестью в металлическом расплаве. В качестве активатора применяют кусковый углеродистый материал, который загружают в печь одновременно с флюсом, взятым в количестве 10–40 % от объема тигля, а порционную загрузку шихты производят при температуре расплавленного флюса, превышающей его температуру плавления на 70–150 °С. При этом используется углеродный материал в виде

округлых кусков размером 0,005—0,2 от внутреннего диаметра тигля, а объем углеродного материала, загружаемого в тигель, составляет 3—15 % от объема тигля [14, 15].

Мелкий лом и стружку в индукционных тигельных печах промышленной частоты плавят обычно с переходящей жидкой ванной в объеме 30—35 % от емкости тигля без перегрева «болота» (остатка расплава в печи от предыдущей плавки). Температура расплава поддерживается на 30—40 °С выше температуры ликвидуса для данного сплава. На начальной стадии плавки рекомендуется загружать куски шихты размером не менее 8—10 см. Стружку предварительно сушат в барабанных сушильных печах, просеивают для отделения засора и подвергают магнитной сепарации. Подготовленная к плавке стружка не должна содержать (по ТУ ряда предприятий) более 0,2 % влаги, 0,05 % масла, 0,15 % железа. Стружку загружают непрерывно или отдельными порциями со скоростью, равной скорости ее плавления при регулировании мощности печи. Общее количество флюсов на основе KCl—NaCl с добавкой фтористых солей составляет при плавке 0,5—3,0 % от массы шихты и зависит от степени окисленности и засоренности сырья [16, 17].

В большинстве случаев плавки мелкие отходы и особенно стружку после ее просушки, сепарации и магнитной обработки подвергают брикетированию, что повышает выход годного примерно на 1 % [18]. Попадая в печь, брикеты стружки быстро погружаются в расплав и нагреваются до температуры плавления. Выплавленный и доведенный до нужного химического состава металл в индукционной печи, несмотря на взаимодействие с покровным флюсом, требует дегазации и рафинирования [19].

Согласно [13], для нахождения оптимального технического и технологического решения необходимо учитывать следующие факторы:

- 1) высокий угар при переплаве мелких отходов и стружки, возникающий вследствие их огромной удельной поверхности и большого содержания кислорода в загружаемой массе (более 30 % даже в брикетах);
- 2) загрязненность полученного расплава оксидами, в том числе и грубыми;
- 3) низкая теплопроводность загружаемой массы стружки — даже в брикетах ее теплопроводность в 1,5—2,0 раза ниже основного металла;
- 4) высокая степень загрязнения окружающей

среды при использовании в процессе переплава покровных и рафинирующих флюсов на основе хлоридов, фторидов и криолитов;

5) большие проблемы в утилизации отходов переплава, в основном шлаков.

Цель работы — исследование технологических факторов, повышающих выход годного металла при переплаве алюминиевых отходов. Основными задачами выступают:

- анализ влияния температуры отжига, технологии загрузки стружки и обработки флюсами на выход годного;
- определение выхода годного металла при изменении процентного содержания стружки в шихте;
- оценка изменения пористости образцов в зависимости от содержания брикетированной стружки в шихте при переплаве.

## Методика исследований

Исследования влияния подготовки шихты и технологических режимов плавки на выход годного металла проводились в печах САТ-0,16 и ИАТ-0,4 на сплавах АК12М2 и АК9.

В качестве шихтового материала использовались: чушковый алюминий, крупногабаритные отходы, отходы литейных и механических цехов, переплав, лигатуры (в таком порядке проходила и загрузка компонентов в печь).

Компоненты шихты вводились в жидкий металл при следующих температурах:

- стружка и мелкий лом — не выше 730 °С;
- медь — при 740—750 °С (для сплава АК12М2);
- кремний и лигатуры — при 700—740 °С (для сплавов АК12М2 и АК9).

Физико-механические свойства сплавов, а именно временное сопротивление разрыву и относительное удлинение, определяли на образцах диаметром 6 мм на машине ЦДМУ-30 при мягких режимах нагружения со скоростью 8 Н/(мм<sup>2</sup>·с) (согласно ГОСТ 1497-84).

Твердость образцов по Бринеллю (НВ) (ГОСТ 9012-59) измеряли с помощью прибора ТШ-3М на шлифованной поверхности образцов при диаметре шарика 2,5 мм и нагрузке 613 Н (ГОСТ 23677-79).

Однородность и размеры структурных составляющих оценивали по фотографиям шлифов (ГОСТ 25536-82).

Химический состав определяли по концентрациям методом спектрального анализа (атомно-эмиссионного) с точностью  $2 \cdot 10^{-6}$  %.

Пористость измеряли на кокильных пробах методом гидростатического взвешивания с точностью до 0,001 г.

Выход годного (в %) получали как отношение массы отливки (выплавленного металла) к металлоемкости формы.

На первоначальном этапе исследования определяли влияние предварительной подготовки стружки и различных способов ее загрузки на выход годного металла. Для этого в электропечи САТ-0,16 был проведен ряд плавов с отличающимися друг от друга технологическими режимами, сочетающими различные условия температурного отжига стружки и ее загрузки с добавками флюса (вариативно, по мере расплавления отдельных порций) [20] составом 50%NaCl + 50%KCl.

Варианты температурного отжига, проводившегося в течение 30 мин, были следующие: без отжига; отжиг до 200 °С; отжиг до 400 °С.

Варианты загрузки стружки:

1) одной порцией (брикет стружки массой 108 кг, без флюса);

2) 50 кг стружки (без флюса) + 1 кг флюса (после расплавления 50 кг стружки) + 58 кг стружки (одной порцией, без флюса);

3) 50 кг стружки (без флюса) + 0,5 кг флюса (после расплавления 50 кг стружки) + 58 кг стружки (порциями по 7–8 кг с добавкой 0,1 кг флюса после каждой порции);

4) 50 кг стружки (без флюса) + 0,5 кг флюса (после расплавления 50 кг стружки) + 58 кг стружки (порциями по 7–8 кг с добавкой 0,1 кг флюса после каждой порции) и дополнительное перемешивание.

В качестве контрольного варианта выступала брикетированная стружка массой 108 кг без предварительной сепарации, ручной переработки и выжигания примесей.

На следующем этапе исследования аналогичную брикетированную и отоженную при температуре 400 °С стружку общей массой 100 кг загружали и переплавляли порциями в печи САТ-0,16. Первоначально было загружено 50 кг стружки, после ее расплавления (через 30 мин) была осуществлена добавка 0,5 кг флюса и брикета стружки массой 10 кг. Далее (через 30 мин, после расплавления всех ранее указанных компонентов) порционно добавлялось по 10 кг брикетов стружки (через каждые 7,5–10 мин), а затем был введен флюс массой 0,5 кг. Состав применяемого флюса, мас.% [21]: 50NaCl–35KCl–15Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> (криолит).

На данной стадии исследования при осуществ-

лении вышеописанной технологии рассматривалось влияние разных вариантов подготовки стружки на выход годного металла:

— когда дополнительной подготовки стружки не было (контрольный вариант);

— в случае проведения отжига стружки до полного окончания выделения дыма из ее брикетов;

— с предварительной сепарацией стружки и ее ручной подготовкой (с удалением ветоши и прочих крупных инородных примесей);

— с загрузкой каждого отоженного брикета стружки при температуре 400 °С (это температура каждого брикета непосредственно перед загрузкой в печь, в то время как в других вариантах брикеты стружки после отжига могли находиться продолжительное время при температуре окружающей среды).

Параллельно с этим этапом проводилось исследование по влиянию массы флюса на выход годного металла. Брикетированную стружку массой 100 кг переплавляли в печи САТ-0,16 в 5 этапов. Каждый этап представлял собой загрузку отделенного от общей массы брикета весом 20 кг (который предварительно подогревался на краю печи до 300–400 °С), а также порционной добавки флюса в количестве от 1 до 4 % (шаг добавки флюса 1 %) от общей массы брикетированной стружки в 100 кг. Состав применяемого флюса, мас.% [21]: 50NaCl–35KCl–15Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> (криолит).

Как уже говорилось ранее, влияние технологических режимов плавки и подготовки шихты на выход годного изучалось не только для печи САТ-0,16, но и печи ИАТ-0,4. В ходе данного исследования отоженные до 400 °С брикеты алюминиевой стружки массой по 10 кг переплавлялись в печи ИАТ-0,4 с добавкой 2 % флюса от общей массы садки (100 кг). Состав применяемого флюса, мас.% [22]: 62NaCl–13KCl–25NaF. При этом варьировались следующие технологические режимы плавки:

— загрузка всей садки (100 кг брикетированной стружки) в печь без жидкой ванны;

— загрузка садки (95 кг брикетированной стружки) в переходящую жидкую ванну массой 5 кг (подразумевается, что 5 кг брикета стружки не полностью образовали на дне тигля печи жидкую ванну расплава);

— загрузка садки (95 кг брикетированной стружки) частями по 2 кг в жидкую ванну массой 5 кг;

— загрузка садки (95 кг брикетированной стружки) частями по 2 кг в жидкую ванну массой 7 кг.

После серии экспериментальных плавов в печах типа САТ-0,16 и ИАТ-0,4 на малых завалках стружки, были проведены опыты по подшихтовке брикетами отожженной стружки при выплавке алюминиевых сплавов в индукционной печи ИАТ-0,4 в количестве от 0 до 45 % от общей металлозавалки (до 400 кг) с разливкой в различные земляные и металлические формы. Для этого были проанализированы данные 10 серий по 5–9 плавов (под серией подразумеваются плавки, проведенные в течение одной кампании печи при равных технологических условиях). Между собой серии отличались не только количеством проведенных плавов, но и различным процентным содержанием брикетированной стружки. Погрешность массы, загружаемой в течение одной плавки стружки, допускалась в пределах  $\pm 0,05$  %. Время расплавления и нагрева расплава до 760–770 °С во всех случаях не превышало 1,1–1,6 ч.

Еще одним этапом исследования являлось определение усредненных значений пористости нескольких образцов (сплавы АК12М2 и АК9), для которых алюминий был получен благодаря плавке с различным содержанием стружки в шихте. При этом содержание стружки в шихте варьировалось от 0 до 45 %.

В заключение были проведены исследования выхода годного металла после выплавки сплава АК9 в печи ИАТ-0,4 при загрузке 400 кг шихты с 40 % брикетированной стружки и различным содержанием стандартных флюсов, а также изучены механические свойства образцов, полученных из выплавленного металла.

## Результаты и их обсуждение

Исследования на основе контрольного варианта показали, что в течение 1 ч происходит интенсивное выгорание примесей. Часть всплывших брикетов образовала прочную сплошную корку, что не позволило провести необходимую обработку сплава рафинированием, легированием и модифицированием. Общее время плавки при этом достигло 2 ч. Выход годного составил 31 %, отлитые чушки были поражены газовыми раковинами размером 3 мм и более, наблюдался грубокристаллический излом с вкраплениями большого числа неметаллических включений.

Химический состав полученного сплава, мас. %: 0,09 Mg; 12,75 Si; 1,3 Fe; 1,31 Cu; 0,25 Mn; 0,02 Ti; 0,5 Ni; 0,14 Zn; Al (ост.) — не соответствует ни одно-

му алюминиевому сплаву по ГОСТ 1583-93. Твердость сплава по Бринеллю не превышала 56 НВ.

Наилучший результат был достигнут в случае нагрева стружки до 400 °С и загрузки 50 кг стружки + 0,5 кг флюса + 58 кг стружки (порциями по 7–8 кг с добавкой 0,1 кг флюса после каждой порции) в совокупности с дополнительным перемешиванием. Химический состав полученного металла для плавов 3 и 4 соответствует сплаву АК12М2 по ГОСТ 1583-93. Выход годного при этом достигал 49 и 67 % соответственно (рис. 1).

При технологическом режиме плавки с первоначальной загрузкой 50 кг стружки и добавлением по 0,5 кг флюса и 10 кг брикетов после ее расплавления выход годного значительно повышался (рис. 2). Общее время плавки (с учетом времени

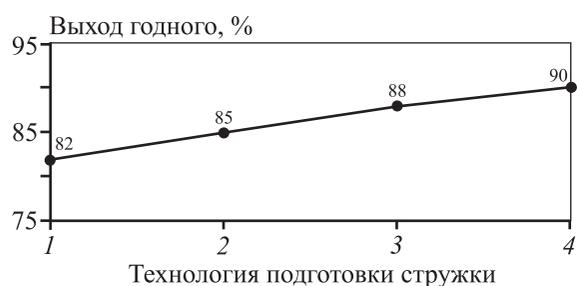


**Рис. 1.** Влияние температуры отжига и технологии загрузки стружки на выход годного металла

*I* — загрузка одной порцией (брикет стружки массой 108 кг, без флюса);  
*2* — загрузка 50 кг стружки (без флюса) + 1 кг флюса (после расплавления 50 кг стружки) + 58 кг стружки (одной порцией, без флюса);  
*3* — загрузка 50 кг стружки (без флюса) + 0,5 кг флюса (после расплавления 50 кг стружки) + 58 кг стружки (порциями по 7–8 кг с добавкой 0,1 кг флюса после каждой порции);  
*4* — загрузка 50 кг стружки (без флюса) + 0,5 кг флюса (после расплавления 50 кг стружки) + 58 кг стружки (порциями по 7–8 кг с добавкой 0,1 кг флюса после каждой порции), а также дополнительное перемешивание  
 Температура отжига стружки, °С: 0 (*I*), 200 (*II*), 400 (*III*)

**Fig. 1.** Effect of annealing temperature and chip loading technology on metal yield

*I* — single-batch loading (108 kg swarf briquette, without flux);  
*2* — 50 kg swarf loading (without flux) + 1 kg of flux (after 50 kg swarf melting) + 58 kg of swarf (single-batch, without flux);  
*3* — 50 kg swarf loading (without flux) + 0.5 kg of flux (after 50 kg swarf melting) + 58 kg of swarf (by 7–8 kg batches with 0.1 kg of flux added after each batch);  
*4* — 50 kg swarf loading (without flux) + 0.5 kg of flux (after 50 kg swarf melting) + 58 kg of swarf (by 7–8 kg batches with 0.1 kg of flux added after each batch), as well as additional stirring  
 Swarf annealing temperature, °C: 0 (*I*), 200 (*II*), 400 (*III*)



**Рис. 2.** Влияние технологии подготовки стружки на выход годного металла

1 – отжиг брикетированной стружки до 400 °С, загрузка 50 кг брикета стружки + 0,5 кг флюса + 10 кг брикета стружки (через 30 мин) + 10 кг брикета стружки (каждые 7,5–10 мин) + 0,5 кг флюса по завершении добавки брикетов (контрольный вариант);  
 2 – аналогично контрольному варианту, отжиг осуществлялся до полного окончания выделения дыма из брикетов стружки;  
 3 – аналогично контрольному варианту, но с предварительной сепарацией стружки и ее ручной подготовкой;  
 4 – аналогично контрольному варианту, но с загрузкой каждого отожженного брикета при  $t = 400$  °С

**Fig. 2.** Effect of swarf preparation technology on metal yield

1 – briquetted swarf annealing to 400 °C, 50 kg swarf briquette loading + 0.5 kg of flux + 10 kg of swarf briquette (in 30 min) + 10 kg of swarf briquette (each 7.5–10 min) + 0.5 kg of flux after briquette loading is completed (control case);  
 2 – similar to the control case, annealing was conducted until no smoke is released from swarf briquettes;  
 3 – similar to the control case, but with preliminary swarf separation and its manual preparation;  
 4 – similar to the control case, but with each annealed briquette loaded at  $t = 400$  °C

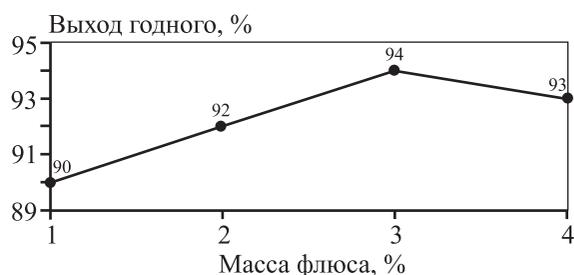
перемешивания и снятия шлака) составило 4,5 ч при температуре печного пространства 760–770 °С. Во время перемешивания и снятия шлака наблюдалось интенсивное выделение белого дыма. Выход годного достиг 90 % (угар 1,0 %), и получено 9 % шлака (8 % шлака и 1 % флюса). Химический состав полученного сплава соответствовал сплаву АК12М2 по ГОСТ 1583-93. Пористость по шкале ВИАМ составила 2–3 балла, размеры зерна после разливки в изложницы имели средние размеры. Твердость сплава по Бринеллю была 64 НВ. Следует отметить, что при подготовке стружки до брикетирования желательна операция ее ручной разборки с удалением ветоши и прочих крупных инородных примесей. Процесс выжигания необходимо доводить до конца выгорания всех примесей, а загрузку брикетов лучше осуществлять в нагретом состоянии (экономия электроэнергии и ускорение процесса плавки).

Исследование по влиянию массы флюса на выход годного показало, что максимальное значение

выхода годного — 94 % — достигается при содержании флюса в количестве 3 % (от общей массы загрузки металла в 100 кг) (рис. 3). При этом угар составил 0,9 %, шлак — 5,1 % (2,1 % шлака и 3 % флюса). Химический состав полученного сплава соответствует сплаву АК12М2 по ГОСТ 1583-93. Пористость по шкале ВИАМ в среднем составила 2 балла, размеры зерна после разливки в изложницы имели средние размеры, в изломе наблюдались небольшие вкрапления неметаллических включений. Твердость сплава по Бринеллю — 63 НВ.

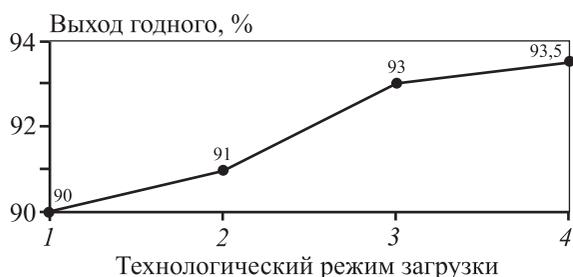
Исследования технологических режимов плавки в печи ИАТ-0,4 показали, что общее время плавки (включая время перемешивания и снятия шлака) составило 0,7 ч при температуре печного пространства 760–770 °С. Выход годного достиг 93,5 % (угар 1 % и 5,5 % шлака). Химический состав полученного сплава соответствует сплаву АК12М2 по ГОСТ 1583-93. Пористость по шкале ВИАМ не превысила 2 балла, размеры зерна после разливки в изложницы были выше среднего. Твердость сплава по Бринеллю составила 66 НВ. Исходя из результатов исследования можно заключить, что загрузка брикетов стружки частями в жидкую переходящую ванну позволяет повысить выход годного (рис. 4). При этом, как показывает опыт, время плавки снижается на 10–15 %. Но для повышения качества литья по неметаллическим включениям требуется дополнительная операция внепечного рафинирования расплава.

Результаты исследований по подшихтовке брикетами отожженной стружки в количестве от 0 до 45 % (от общей массы металла в 400 кг) для 10 серий по 5–9 плавок приведены на рис. 5. Полученный в этих плавках металл был применен в дальнейшем для изготовления кокильных отливок, а также литья под давлением и частично заливался в песчано-глинистые формы. При этом были выявлены наиболее часто встречающиеся дефекты получен-



**Рис. 3.** Влияние массы флюса на выход годного металла

**Fig. 3.** Effect of flux mass on metal yield



**Рис. 4.** Влияние технологии переплава в печи ИАТ-0,4 на выход годного металла

- 1 – загрузка всей садки (100 кг брикетированной стружки) в печь без жидкой ванны;
- 2 – загрузка садки (95 кг брикетированной стружки) в переходящую жидкую ванну массой 5 кг;
- 3 – загрузка садки (95 кг брикетированной стружки) частями по 2 кг в жидкую ванну массой 5 кг;
- 4 – загрузка садки (95 кг брикетированной стружки) частями по 2 кг в жидкую ванну массой 7 кг

**Fig. 4.** Effect of remelting technology in the IAT-0,4 furnace on metal yield

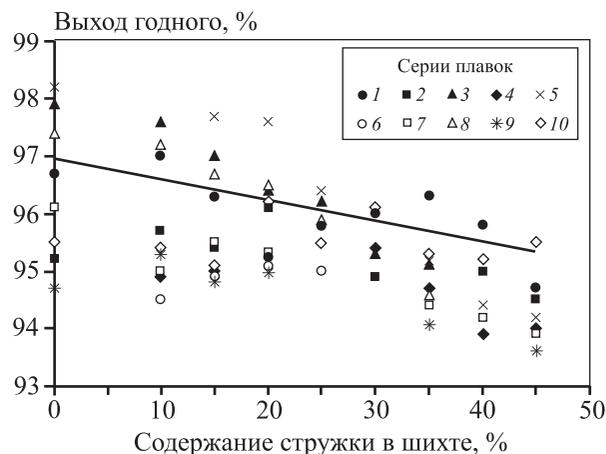
- 1 – full charge loading (100 kg of briquetted swarf) to the furnace without liquid bath;
- 2 – charge loading (95 kg of briquetted swarf) to 5 kg transfer liquid bath;
- 3 – charge loading (95 kg of briquetted swarf) by 2 kg batches to 5 kg transfer liquid bath;
- 4 – charge loading (95 kg of briquetted swarf) by 2 kg batches to 7 kg transfer liquid bath

ных отливок из этих сплавов — это неметаллические включения в виде шлака и окисных плен, а также газосадоочная пористость. Кроме того, для каждого вида форм проявлялись и специфические дефекты.

**Выход годного металла и механические свойства образцов**

**Metal yield and mechanical properties of samples**

Номер плавки	Содержание флюса, % от массы шихты	Механические свойства образцов			Выход годного, %
		Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Отн. удлинение $\delta$ , %	Твердость сплава по Бринеллю, НВ	
1	0	187,7	2,81	66,0	82,0
2	1,0	199,2	2,95	68,9	90,0
3	2,0	204,2	3,38	72,0	92,0
4	3,0	223,7	5,18	70,9	94,0
5	4,0	211,2	4,18	69,5	93,0
6	5,0	207,8	3,91	67,6	91,0
7	6,0	205,3	3,82	66,8	92,0
8	7,0	199,6	3,72	65,9	93,0
9	8,0	198,7	3,57	66,1	92,0
10	9,0	196,5	3,40	66,2	91,0



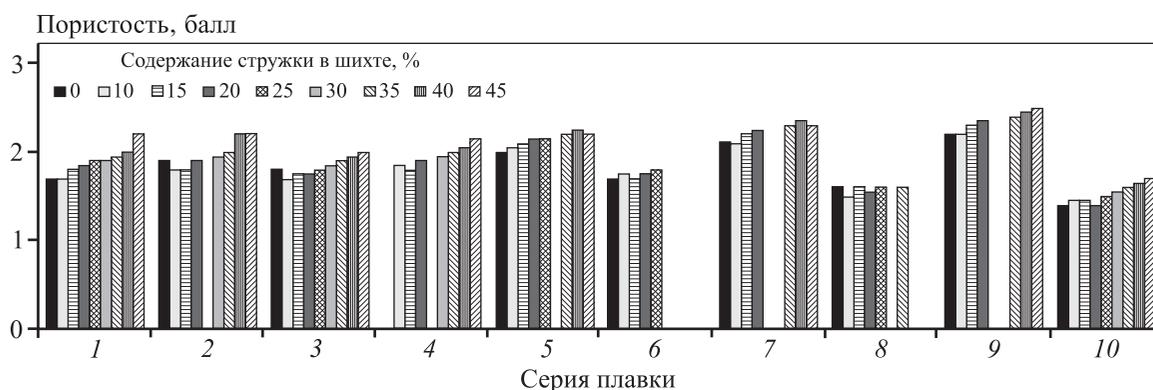
**Рис. 5.** Диаграмма выхода годного металла в зависимости от содержания стружки в шихте  
1–5 – сплав АК12М2; 6–10 – сплав АК9

**Fig. 5.** Diagram of metal yield as a function of swarf content in charge

- 1–5 – АК12М2 alloy; 6–10 – АК9 alloy

Как видно из данных рис. 5, увеличение массы стружки, обработанной по вышеописанной технологии и загружаемой в пределах 0–45 %, как правило, приводит к снижению выхода годного на 1,5–4,7 %. Основными причинами этого являются повышение угара на 0,5–1,5 % и возрастание потерь со шлаком (остальное).

На рис. 6 представлены результаты определения усредненных значений пористости (в баллах по шкале ВИАМ) нескольких образцов металла,



Содержание стружки в шихте, %	Пористость, балл									
	Серия 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1,7	1,9	1,8	0	2,0	1,7	2,1	1,6	2,2	1,4
10	1,7	1,8	1,7	1,85	2,05	1,75	2,1	1,5	2,2	1,45
15	1,8	1,8	1,75	1,8	2,1	1,7	2,2	1,6	2,3	1,45
20	1,85	1,9	1,75	1,9	2,15	1,75	2,25	1,55	2,35	1,4
25	1,9	0	1,8	0	2,15	1,8	0	1,6	0	1,5
30	1,9	1,95	1,85	1,95	0	0	0	0	0	1,55
35	1,95	2,0	1,9	2,0	2,2	0	2,3	1,6	2,4	1,6
40	2,0	2,2	1,95	2,05	2,25	0	2,35	0	2,45	1,65
45	2,2	2,2	2,0	2,15	2,2	0	2,3	0	2,5	1,7

Рис. 6. Гистограмма пористости образцов из сплавов АК12М2 и АК9 в зависимости от содержания стружки в шихте при переплаве

Серии плавки 1–5 – сплав АК12М2, 6–10 – сплав АК9

Fig. 6. Porosity histogram of samples made of AK12M2 and AK9 alloys as a function of swarf content in charge at remelting

1–5 heat series – AK12M2 alloy, 6–10 – AK9 alloy

полученного из плавки с различным содержанием брикетированной стружки в шихте.

Было установлено, что увеличение содержания стружки в шихте приводит при прочих равных условиях к повышению среднего балла пористости, из чего следует вывод о необходимости дополнительного рафинирования таких расплавов.

В таблице приведены результаты исследования выхода годного после выплавки сплава АК9 в печи ИАТ-0,4 при загрузке 400 кг шихты с 40 % брикетированной стружки и различным содержанием стандартных флюсов, а также механические свойства образцов, полученных из выплавленного металла.

Из данных таблицы следует, что в ходе массовой выплавки алюминиевых сплавов с отходами производства в виде стружки для получения выхода

годного металла не ниже трендовых значений необходимо вести плавку с малым содержанием хлоридно-фторидных флюсов. Проведение нагрева и плавки в атмосфере паров хлоридов и фторидов уменьшает температуру появления первых капель расплава, что, в свою очередь, позволяет повысить выход годного на 1–2 %.

Также можно отметить, исходя из анализа выхода годного и механических свойств отобранных образцов, что в увеличении массы флюса при плавке имеется определенный оптимум. Для плавки с подшихтовкой до 40 % брикетированной стружкой оптимальное количество добавки флюса находится в пределах 3,0–4,0 % от массы шихтового материала. При уменьшении в шихте брикетированной стружки необходимое количество флюса снижается.

## Выводы

1. Опытным путем установлено, что максимальный выход годного металла при переплаве алюминиевых отходов массой 100 кг в печи САТ-0,16 составляет 94 %. Данный эффект достигается путем отжига брикетированной стружки до температуры 300–400 °С с дальнейшей ее загрузкой в печь в 5 этапов по 20 кг при порционной добавке флюса (составом 50%NaCl–35%KCl–15%Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> (криолит)) в количестве 3 % от общей массы загрузки металла.

Исследования влияния технологических режимов плавки в печи ИАТ-0,4 на выход годного металла при переплаве алюминиевых отходов показали, что максимальный эффект — 93,5 % — достигается путем загрузки садки (95 кг брикетированной стружки) частями по 2 кг в жидкую ванну массой 7 кг. При этом брикеты алюминиевой стружки предварительно отжигались до температуры 400 °С, а количество добавки флюса (составом NaCl — 62 %, KCl — 13 %, NaF — 25 %) составляло 2 % от общей массы загрузки металла. При использовании данного технологического режима общее время плавки снижалось на 10–15 %, а именно до 0,7 ч.

2. Эмпирическим путем была установлена зависимость выхода годного металла от содержания стружки в шихте для сплавов АК12М2 и АК9. Так, увеличение массы стружки, обработанной по предложенным технологиям и загружаемой в пределах 0–45 %, приводит к снижению выхода годного на 1,5–4,7 %. Это происходит из-за повышения угара на 0,5–1,5 % и роста потерь со шлаком.

3. Изучение пористости образцов при изменении содержания брикетированной стружки в шихте при переплаве показало, что в случае использования наиболее оптимальных технологий плавки (отжига стружки, добавки флюсов) в печи САТ-0,16 пористость находится в пределах 2 баллов по шкале ВИАМ. При аналогичных исследованиях в печи ИАТ-0,4 была достигнута пористость менее 2 баллов. В обоих случаях в качестве шихтового материала было задействовано до 100 % стружки и мелкого возврата производства. Анализ полученных результатов показывает, что в отсутствие необходимых технологий плавки или при их нарушениях пористость в ряде случаев достигает 2 баллов по шкале ВИАМ уже при содержании стружки в шихте ≥15 %.

## Литература/References

1. Потребление алюминия, основные потребители — Алюминиевая ассоциация. [http://www.aluminas.ru/aluminum/in\\_the\\_world/](http://www.aluminas.ru/aluminum/in_the_world/) (дата обращения: 15.07.2020). Consumption of aluminum, basic consumers' — Aluminum association. [http://www.aluminas.ru/aluminum/in\\_the\\_world/](http://www.aluminas.ru/aluminum/in_the_world/) (accessed: 15.07.2020) (In Russ.).
2. Деев В.Б., Пономарева К.В., Куценко А.И., Приходько О.Г., Сметанюк С.В. Влияние условий плавки алюминиевых сплавов на свойства и качество отливок, полученных по газифицируемым моделям. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2017. No. 4. С. 39–45.  
*Deev V.B., Ponomareva K.V., Kutsenko A.I., Prikhodko O.G., Smetanyuk S.V.* The influence of the conditions of melting of aluminum alloys on the properties and quality of castings obtained by gasified models. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya (Izvestiya. Non Ferrous Metallurgy)*. 2017. No. 4. P. 39–45 (In Russ.).
3. *Nappi C.* The global aluminum industry 40 years from 1972. *World Aluminum*. 2013. P. 1–27.
4. *Velasco E., Proulx J.* Metal quality of secondary alloys for Al castings. *Light Metals (The Minerals, Metals & Materials Society)*. 2006. P. 721–724.
5. *Gesing R., Wolanski M.* Recycling light metals from end-of-life vehicles. *JOM*. 2001. Vol. 53. P. 21–23.
6. *Waite P.* A technical perspective on molten aluminum processing. *Light Metals*. 2002. P. 841–847.
7. *Leonard S., Aubrey, Dawid D., Smith, Luiz C.B., Martins.* New product developments for aluminum cast houses. In: *Aluminum cast house technology: Mater. 7-th Australian Asia Pacific Conf. (Australia, Hobart, 23–26 Sept. 2001)*. Warrendale: TMS, 2001. P. 23–43.
8. *Neff D., Sigworth G., Gallo R.* Melting and melt treatment of aluminum alloys. *Aluminum Sci. Technol.* 2018. Vol. 2A. P. 143–164.
9. *Ji-min Wang, Peng Xu, Hong-jie Yan, Jie-min Zhou, Shixuan Li, Guang-chen Gui, Wen-ke Li.* Burner effects on melting process of regenerative aluminum melting furnace. *Trans. Nonfer. Met. Soc. China*. 2013. Vol. 23. No. 10. P. 3125–3136.
10. *Nieckele A., Naccache M.F., Gomes S.P., Joao N.E.* Combustion performance of an aluminum melting furnace operating with natural gas and liquid fuel. *J. Brazil. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2010. Vol. 32. No. 4. P. 275–283.
11. *Anyalebechi P.N.* Critical review of reports values of hydrogen diffusion in solid and liquid aluminum and its alloys. *Light Metals (The Minerals, Metals & Materials Society)*. 2003. P. 857–872.
12. *Belov N.A., Alabin A.N.* Energy efficient technology for

- Al—Cu—Mn—Zr sheet alloys. *Mater. Sci. Forum.* 2013. No. 765. P. 13—17.
13. Гаврилин И.В. Переплав алюминиевой стружки в литейных цехах. *Литейн. пр-во.* 1998. No. 8. С. 7—9. Gavrilin I.V. Remelting aluminum shavings in foundries. *Liteinoe proizvodstvo.* 1998. No. 8. P. 7—9 (In Russ.).
14. Casatti R., Vedani M. Metal matrix composites reinforced by nano-particles: A review. *Metals.* 2014. Vol. 4. P. 65—83.
15. Badowsky M., Droste W. Hydrogen measurement practices in liquid aluminum at low hydrogen levels. *Light Metals (The Minerals, Metals & Materials Society).* 2009. P. 701—706.
16. Calvo-Dahlborg M. Structure of molten Al and eutectic Al—Si-alloy studied by neutron diffraction. *J. Non-Cryst. Solids.* 2013. Vol. 361. P. 63—69.
17. David H. DeYoung. Salt fluxes for alkali and alkaline earth element removal from molten. In: *Aluminum cast house technology*: Mater. 7-th Australian Asia Pacific Conf. (Australia, Hobart, 23—26 Sept. 2001). Warrendale: TMS, 2001. P. 99—113.
18. Грачев А.Н., Леушин И.О., Леушина Л.И. Схема использования промышленных отходов на литейных предприятиях. *Литейн. пр-во.* 2016. No. 8. С. 34—37. Grachev A.N., Leushin I.O., Leushina L.I. Scheme of the use of industrial waste in foundries. *Liteinoe proizvodstvo.* 2016. No. 8. P. 34—37 (In Russ.).
19. Bel S., Davis B., Javaid A., Essadiqi E. Final report on refining technologies of aluminum. Report No. 2003-21(CF). Canada, 2003. P. 1—3.
20. Velasco E., Nino J. Recycling of aluminium scrap for secondary Al—Si alloys. *Waste Manag. Res.* 2011. Vol. 29. No. 7. P. 686—693.
21. Yongxiang Yang, Yanping Xiao, Bo Zhou, Markus A. Reuter. Aluminium recycling scrap melting and process simulation. In: *Sustainable developments in metals processing*: Proc. John Floyd Int. Symp. (Australia, Melbourne, 3—6 July 2005). Carlton: AusIMM, 2005. P. 150—160.
22. Лютова О.В., Волчок И.П. Свариваемость вторичных алюминиевых сплавов. *Литье и металлургия.* 2013. No. 4. С. 45—50. Lyutova O.V., Volchok I.P. Welding characteristics of secondary aluminum alloys. *Lit'e i metallurgiya.* 2013. No. 4. P. 45—50 (In Russ.).