

**ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА**

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ
МЕН ТЕХНИКАСЫ**

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



**НАУКА И ТЕХНИКА
КАЗАХСТАНА**

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 1680-9165

№ 4 (2020)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ**
выходит 1 раз в квартал

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ KZ63VPY00028965

выдано
Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация результатов фундаментальных и прикладных научных исследований
по широкому спектру проблем в области металлургии, машиностроения, транспорта,
строительства и естественных наук

Подписной индекс – 76129

Импакт-фактор РИНЦ – 0,344

Абишев Кайратолла Кайроллинович – к.т.н., профессор (главный редактор);
Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (заместитель главного редактора);
Мусина Жанара Керейовна – к.т.н., профессор (ответственный секретарь);
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

Члены редакционной коллегии:

Гумаров Гали Сагингалиевич – д.т.н., профессор (Уральск, Казахстан);
Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);
Клецель Марк Яковлевич – д.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Украинец Виталий Николаевич – д.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);
Богомоллов Алексей Витальевич - к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);
Жажибаева Галия Тулеуевна - к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);

Зарубежные члены редакционной коллегии:

Baigang Sun – профессор (Пекин, Китай);
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);
Magin Lapuerta – д.т.н., профессор (СьюДад Исаева КуралайСметкановна Реал, Испания);
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);
Ronny Berndtsson – профессор (Лунд, Швеция);
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Бочкарев Петр Юрьевич – д.т.н., профессор (Саратов, Россия);
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Чайкин Владимир Андреевич – д.т.н., профессор (Магнитогорск, Россия);
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия);
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

Б. Ш. Смайлов

АО «Казахстанский электролизный завод»,
Республика Казахстан, г. Павлодар

**ПРИМЕНЕНИЕ БОРА ПРИ РАФИНИРОВАНИИ
ПЕРВИЧНОГО АЛЮМИНИЯ**

В данной статье рассмотрено применение бора при рафинировании первичного алюминия. Приведены технологические решения по снижению содержания ванадия в первичном алюминии при его производстве.

Предложен новый комплексный способ рафинирования расплава алюминия от ванадия за счёт бора путём ввода флюсов на его основе в среде инертного газа во всасывающую трубу вакуум-ковша.

Ключевые слова: бор, рафинирование, алюминий, примеси, свойства.

ВВЕДЕНИЕ

При производстве первичного алюминия образуются различные примеси, которые оказывают влияние на свойства как первичного алюминия, так и изделия, производимые на его основе.

В таблице 1 приведены сведения об основных примесях, их источниках, влиянии на свойства сплава и распространённые способы рафинирования от перечисленных примесей [1, 2].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Первичный алюминий АО «Казахстанский электролизный завод» марок А7, А7Е, А8 поставляется на внешний и внутренний рынок. Из местных предприятий, основным потребителем чушкового алюминия является АО «Казэнергокабель», производящий алюминиевую катанку и электрический кабель [3].

Для алюминия, используемого для производства электрокабелей, большое значение имеет предельное содержание ванадия. Из работ [4–7] известно, что ванадий сильно снижает электропроводимость алюминия. В данных работах указывается, что содержание ванадия более 0,01 % стремительно понижает электропроводность алюминия с 38 мкОм до 30 мкОм и при увеличении на 1 % содержания в твёрдом растворе титана и ванадия электропроводность алюминия возрастает на 2,88 и 3,58 мкОм соответственно.

Таблица 1 – Примеси алюминия и их влияние на физико-химические свойства [1, 2]

Элемент	Происхождение	Следствие и влияние на свойства сплава	Способ удаления
Водород, H ₂	Реакция с атмосферой и продуктами сгорания, сырые загружаемые материалы	Газовая, газоусадочная, вторичная пористость; снижение механических свойств	Продувка газами, флюсовое рафинирование, вакуумная обработка
Литий, Li	Электролит первичного алюминия, шихтовые материалы	Склонность к окислению, голубая коррозия, снижение плотности, пластичности, увеличение микропористости	Обработка газами, флюсовое рафинирование, угольное фильтрование
Натрий, Na	Электролит первичного алюминия, взаимодействие с солями	Склонность к окислению, увеличение усадки, микропористости, газонасыщенности, снижение механических свойств	
Кальций, Ca	Электролит первичного алюминия, взаимодействие с солями, реакция с огнеупорами	Склонность к окислению, увеличение усадки, пористости, снижение механических свойств и коррозионной стойкости	
Оксиды Al ₂ O ₃ , MgO	Реакция с атмосферой	Снижение механических свойств, электропроводности и жидкотекучести, образование расслоения, газовой пористости, повреждение и износ инструментов при обработке	Флюсовое рафинирование, фильтрование, обработка газами, отстаивание
Шпинель Al ₂ O ₃ , MgO	Карналлит		
Нитрид AlN	Обработка азотом		
Силикат CaSiO ₃	Эрозия огжупоров		
Алюминат CaAl ₂ O ₄			
Карбиды SiC, TiC, Al ₄ C	Лигатуры, реакция с углеродом, первичный алюминий		
Интерметаллиды Al ₃ Ti, Al ₃ Zr, AlTiZr, AlV ₃	Лигатуры, реакция в расплаве при неблагоприятном составе сплава		

Повышенное содержание ванадия наблюдается в алюминиевых электролизерах при производстве первичного алюминия в АО «Казахстанский электролизный завод», связанным с его повышенным содержанием в сырье (прокалённом коксе) для производства обожжённых анодов [2]. Данный факт приводит к снижению объёма потребления местного прокалённого кокса (производимого ТОО «УПНК-ПВ», г. Павлодар) и его частичную замену импортируемым из Китая и Российской Федерации.

Таким образом, поиск технологических решений по снижению содержания ванадия в первичном алюминии при его производстве имеет большую актуальность.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Литературный обзор позволил выявить перспективность использования бора для рафинирования расплава алюминия от ванадия [8–17].

Механизм взаимодействия алюминия с ванадием и бором описан рядом авторов [8–13].

Из диаграммы состояния Al-V [8] видно, что соединения Al₂₁V₂, Al₄₅V₇, Al₂₃V₄, Al₃V, Al₉V₅ образуются по перитектическим реакциям при температурах 670, 688, 736, 1360, 1670 °С соответственно (рисунок 1). Кроме того, при температуре 661,9 °С имеет место перитектическая реакция Ж + Al₂₁V₂ ↔ (Al). Растворимость V в (Al) при температурах 735, 660 и 500 °С составляет 0,91; 0,2 и 0,11 % (ат.), соответственно. Растворимость Al в (V) составляет 50,5; 53,5 и 44 % (ат.) при температурах 1670, 980 и 900 °С соответственно. Растворимость Al в (V) при температуре 1000 °С равна 45 % (ат.).

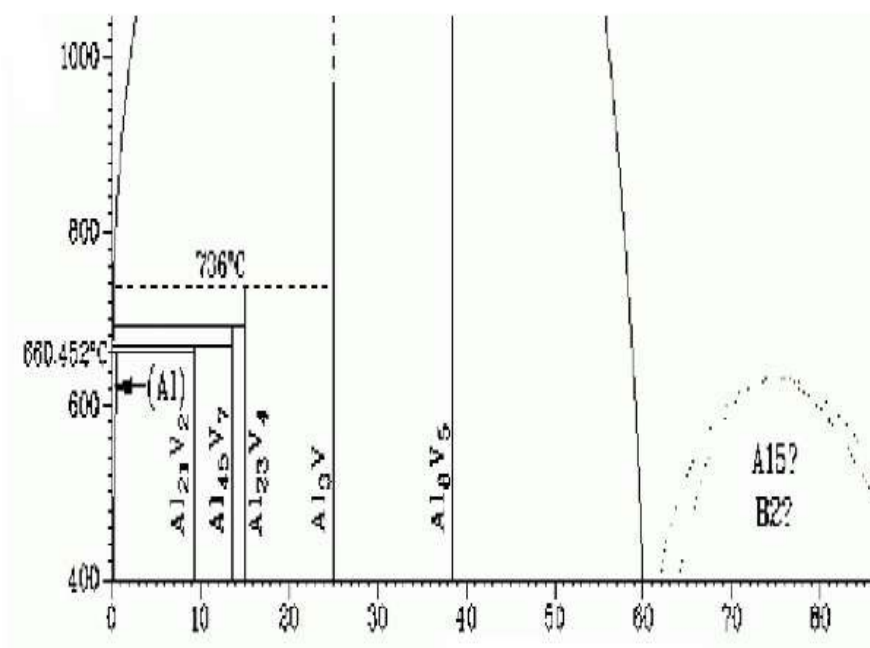


Рисунок 1 – Диаграмма состояния Al-V (перитектические превращения ванадия в диапазонах температур 500–1080 °С) [8]

Согласно работе [9] процесс растворения ванадия в жидком алюминии происходит в диффузионном режиме. Скорость растворения ванадия в жидком алюминии существенно ниже, чем металлов группы железа. В работе [10, 11], приводятся данные константы скорости растворения при температуре 750 °С в диапазоне скорости вращения (метод вращающегося диска) $\omega = 6,61 - 36,8$ рад/с и выражается как:

$$K_p = (5,2 + 0,1) - 10 - 5\omega 0,54$$

По данным Ермолаева К. Н. [9], величина скорости растворения при 900 °С $K_p 10^{-4} = 0,65 \text{ г}/(\text{см}^2\text{с})$ с содержанием ванадия в расплаве алюминия после растворения 0,4V.

По данным тех же авторов [10, 11], при температуре 700 – 950 °С зависимость коэффициента диффузии от температуры подчиняется уравнениям:

$$D = (2,184) - 10 - 7 - \exp(-45,64 / RT) \quad [10]$$

$$D = 0,44 - 10 - 3 - \exp(-7,7 / RT) \quad [11]$$

В работе [12, 13], представлена диаграмма состояния Al-B (рисунок 2). Видно, что бор с алюминием образует два соединения: AlB_2 и AlB_{12} . Соединение AlB_2 образуется в результате перитектической реакции из соединения AlB_{12} , температура этого фазового перехода по разным данным может составлять величину от 927 до > 1400 °С.

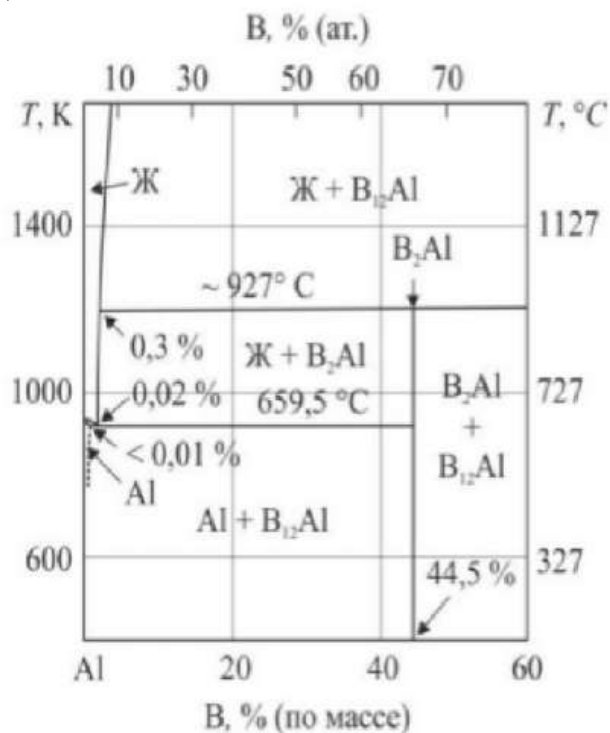


Рисунок 2 – Фрагмент диаграммы состояния Al-B [12]

Взаимодействие ванадия с бором описано в работе [13]. На рисунке 3 видно, что в системе V-B образуется шесть боридов: V_3B_2 , VB , V_5B_6 , V_3B_4 , V_2B_4 , VB_2 .

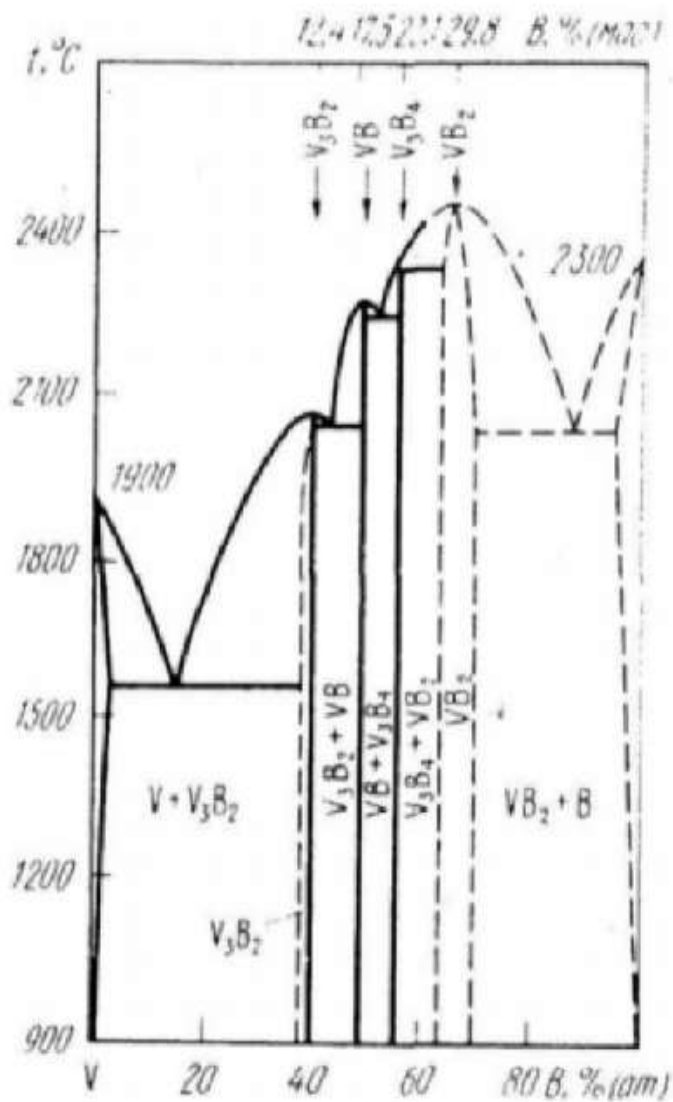


Рисунок 3 – Диаграмма состояния V-B [13]

Следует отметить высокую температуру плавления боридов ванадия, далеко выходящих за рабочие температуры процесса электролиза алюминия и дальнейшей обработки расплавов.

Анализ применения бора для рафинирования алюминия от ванадия показал, что бор в основном вводится в алюминиевый электролизёр [14–17].

В работе [14] описан способ очистки алюминия от примесей тяжёлых металлов (Ti, V, Cr) путём введения бора в электролит промышленных электролизёров. В электролизёре происходит образование тяжёлых интерметаллидных соединений ванадия с бором, которые в дальнейшем оседают на подине электролизёра. Очевидным недостатком способа является загрязнение подины, что снижает

технико-экономические показатели электролиза. Вторым недостатком является повышенный расход бора (в четыре раза выше стехиометрических расчётов) из-за образования газообразного фтористого бора и длительности процесса электролиза.

В работе [15] описан способ удаления примесей тяжёлых цветных металлов из расплавленного алюминия, включающий введение в расплав алюминия бора, перемешивание расплава в режиме вихревого потока и дальнейшую разливку. Недостатком способа является дополнительное использование специальных флюсов, кроме борсодержащих веществ, что снижает технико-экономические показатели процесса.

В работе [16] описан способ очистки расплава алюминия от примесей Ti, V, Cr, который заключается в подаче бора с одновременным воздействием на расплав электромагнитного поля, которое поддерживают в течение всего периода разливки.

В АО «Казахстанский электролизный завод» [17] проводились промышленные испытания по ряду направлений.

Первый вариант включал ввод борной кислоты (H_3BO_3) в электролизёр (ежесуточно по 3 кг). Данный способ показал хорошие результаты рафинирования, но снижение стойкости подины электролизёра.

Второй способ заключался в подаче флюса на основе борной кислоты в процессе разливки алюминия в литейном отделении непосредственно в изложницу литейной машины. Данный способ показал незначительное содержание ванадия (на 4-6 ррт).

Третьим вариантом использования бора являлся его ввод в состав анодной массы при производстве обожжённых анодов (до 3 кг на один анод). Данный способ также не дал ощутимых результатов по снижению содержания ванадия.

Основываясь на вышеуказанных данных, авторами работы предложен новый комплексный способ рафинирования расплава алюминия от ванадия за счёт бора путём ввода флюсов на его основе в среде инертного газа во всасывающую трубу вакуум-ковша (рисунок 4).

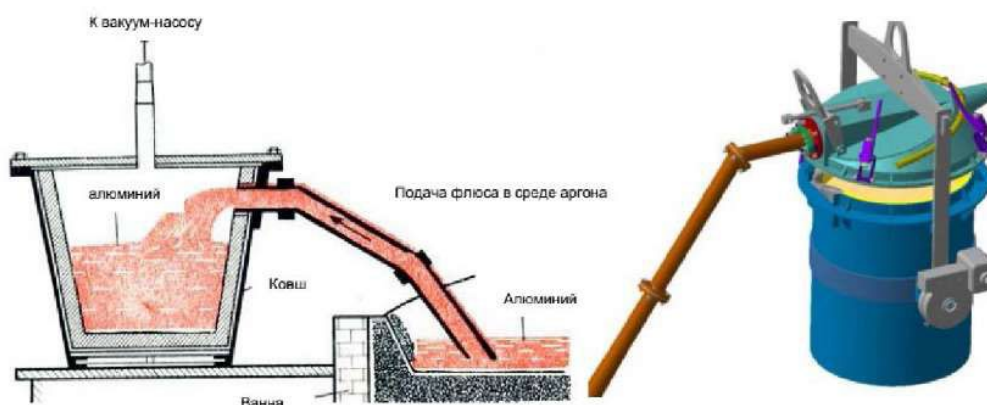


Рисунок 4 – Схема осуществления способа (а) и конструкция вакуум-ковша (б)
ВЫВОДЫ

Новый комплексный способ рафинирования расплава алюминия от ванадия за счёт бора путём ввода флюсов обеспечивает ряд преимуществ:

- равномерное перемешивание алюминиевого расплава и флюса без дополнительных материальных затрат на механизмы по созданию перемешивания (индукционное перемешивание и т.п.);
- достаточное время на проведение процесса рафинирования в период перемещения вакуум-ковша в литейное отделение цеха электролиза;
- удобство удаления боридов ванадия в виде осадков в ковше путём фильтрации при выпуске металла из вакуум-ковша в литейный миксер.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Пискарев, Д. И.** Разработка технологии рафинирования алюминия от примесей щелочных и щёлочноземельных металлов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М. : ГИНЦВЕТМЕТ, 2007. – 182 с.

2 **Куандыков, А. Б., Смайлов, Б. Ш., Быков, П. О.** Перспективы развития технологии рафинирования первичного алюминия от ванадия // *Материалы международной научно-практической конференции «XI Торайгыровские чтения»*. Т. 5. – Павлодар : ПТУ имени С. Торайгырова, 2019. – С. 63–71.

3 Рождение крылатого металла // *Казахстанская правда*. – 29 декабря 2016 г. [Электронды ресурс]. – <https://www.kazpravda.kz/articles/view/rozhdenie-krilatogo-metalla> 1.

4 **Троицкий, И. А., Железнов, В. А.** *Металлургия алюминия*. – М. : *Металлургия*, 1984. – 400 с.

5 **Банчила, С. Н., Филиппов, Л. П.** Изучение электропроводности металлов // *Теплофизика высоких температур*. – 1973. – Т. 11. – № 3. – С. 668–671.

6 **Фомин, Н. Е., Ивлев, В. И., Юдин, В. А.** Влияние примесей на электросопротивление меди и алюминия // *Вестник Мордовского университета*. – 2014. – № 1–2. – С. 50–57.

7 **Мирзоев, Ф. М.** Теплофизические свойства алюминия различной степени чистоты и сплавов системы Al-Si: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Душанбе : Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, 2019. – 116 с.

8 **Лякишев, Н. П.** *Диаграммы состояния двойных металлических систем : справочник* : В 3 т.: Т. 1. – М. : *Машиностроение*, 1996. – 992 с.

9 **Напалков, В. И., Махов, С. В.** *Легирование и модифицирование алюминия и магния*. – М. : *МИСИС*, 2002. – 376 с.

10 **Еременко, В. Н., Натанзон, Я. В., Титов, В. П.** // *Известия АН СССР. Металлы*. – 1975. – № 6. – С. 42–45.

11 **Darby, J. V., Jugle, D. V., Kleppa, O. T.** // *Trans. Me. Soc. AIME*. – 1963. – V. 227. – № 1. – P. 179–185.

12 **Червякова, К. Ю.** Исследование и разработка технологии получения слитков и листов боралюминия повышенной прочности : диссертация на

соискание ученой степени кандидата технических наук. – М. : Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС», 2019. – 116 с.

13 **Лякишев, Н. П., Плинер, Ю. Л., Лаппо, С. И.** Борсодержащие стали и сплавы. – М. : Металлургия, 1986. – 192 с.

14 Цветные металлы, № 6. – С. 45–49.

15 Патент Франции № 2536090, кл. С 22 В 21/06, 1984.

16 Патент РФ № 2084548, кл. С 22 В 21/06 Способ очистки алюминия и его сплавов от примесей тяжёлых металлов, 1997.

17 **Ибрагимов, А. Т., Пак, Р. В.** Электрометаллургия алюминия. Казахстанский электролизный завод : монография. – Павлодар : Дом печати, 2009. – 276 с.

Материал поступил в редакцию 21.12.20.

Б. Ш. Смайлов

«Қазақстан электролиз зауыты» АҚ,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
Материал 21.12.20 баспаға түсті.

БАСТАПҚЫ АЛЮМИНИЙДІ ТАЗАРТУДА БОРДЫ ҚОЛДАНУ

Бұл мақалада бастапқы алюминийді тазартуда борды қолдану қарастырылған. Бастапқы алюминийде ванадий құрамын оны өндіру кезінде төмендету бойынша технологиялық шешімдер келтірілген.

Вакуум-шөміштің сору құбырына инертті газ ортасында оның негізінде флюстерді енгізу арқылы бор есебінен алюминий балқымасын ванадийден тазартудың жаңа кешенді тәсілі ұсынылды.

Кілтті сөздер: бор, тазарту, алюминий, қоспалар, қасиеттері.

B. Sh-A. Smaylov

JSC «Kazakhstan Electrolysis Plant»,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Material received on 21.12.20.

APPLICATION OF BORON IN THE REFINING OF PRIMARY ALUMINUM

This article discusses the use of boron in the refining of primary aluminum. Technological solutions for reducing the vanadium content in primary aluminum during its production are presented.

A new complex method for refining aluminum melt from vanadium at the expense of boron by introducing fluxes based on it in an inert gas medium into the suction pipe of the vacuum bucket is proposed.

Keywords: boron, refining, aluminum, impurities, properties.

Теруге 29.12.20. ж. жіберілді. Басуға 10.01.21. ж. қол қойылды.
Форматы 297*420/2. Кітап-журнал қағазы.
Шартты баспа табағы 6,04. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген З. С. Исакова
Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3721

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69

e-mail: kereku@psu.kz
www.vestnik.psu.kz
www.nitk.psu.kz