

## Огнеупоры и футеровки плавильных агрегатов алюминиевого производства

© М. Ю. Кузьмина<sup>1</sup>, Е. С. Медведев<sup>2</sup>, И. Д. Матвеев<sup>3</sup>, П. Б. Кузьмин<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>4</sup> ООО «Объединённая Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр»,  
г. Красноярск, Российская Федерация

**Аннотация.** Целью данной статьи является изучение основных факторов, влияющих на проведение безопасной индукционной плавки чугуна на предприятиях компании РУСАЛ, в частности, в филиале ПАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов (ИркАЗ), правильного выбора футеровочных масс, их применения, а также факторов, влияющих на преждевременный износ футеровки. В работе показано, что стойкость тигля индукционной печи определяется физико-химическими свойствами футеровки, зависящими от химико-минералогического и гранулометрического состава огнеупорных материалов. Для футеровки индукционных печей плавки чугуна применяется кислая футеровка, состоящая из кремнеземистых огнеупорных материалов: mingo-sil 2001, finmix, cuarsil IS6-AN, КВМБ-1, КВМБ-2 (ТУ 1523-018-00187085-2002). Оптимальное содержание оксида кремния, составляющее 93,43–96,07 % (мас). Избыточное количество борного ангидрида ( $B_2O_3$ ), используемого в качестве связующего в футеровочной смеси, приводит к образованию хрупкого стекловидного слоя в футеровке печи. Учитывая оптимальное содержание  $B_2O_3$  в пределах 0,7–1,0 % (мас.), из готовых отечественных формовочных смесей оптимальным является содержание борсодержащей добавки в смеси КВМБ-1. Повышение химической стойкости кислой кварцевой футеровки можно достичь добавлением небольшого количества мелкодисперсного корунда  $Al_2O_3$ . Образующиеся в результате соединения (силикат алюминия и муллит) повышают огнеупорность и стойкость футеровки. Кроме этого, добавки корунда позволяют повысить качество выплавляемого чугуна, не допуская появления вредных примесей в его структуре. Наибольшее содержание корунда в смесях КВМБ-1 и КВМБ-2 составляет ~ 1,12 % (мас.). Был проанализирован состав футеровки, обладающий максимальной стойкостью, и исследовалась стойкость футеровки состава: 5 % зерен фракции 3–2 мм, 50 % – зерен 2–0,5 мм, 45 % – зерен < 0,5 мм. Стойкость футеровки составила 35–36 плавок до ремонта. Исследовалась вибронасыпная плотность футеровки, значительно влияющая на ее стойкость. Наибольшую вибронасыпную плотность можно получить, используя смесь КВМБ-2. Учитывая себестоимость и физико-химические свойства огнеупорных материалов показано, что из готовых смесей для футеровки индукционных тигельных печей подходят отечественные смеси КВМБ-1 и КВМБ-2. Их использование позволит значительно снизить стоимость оборудования и увеличить продолжительность эксплуатации тигля.

**Ключевые слова:** чугун, сталь, алюминий, индукционная тигельная печь, конструкция индукционной печи, тигель индукционной печи огнеупоры в алюминиевом производстве, свойства огнеупоров, футеровка печи

## Refractories and linings of aluminum smelting units

© Marina Yu. Kuzmina<sup>1</sup>, Evgeny S. Medvedev<sup>2</sup>, Igor D. Matveenko<sup>3</sup>, Petr B. Kuzmin<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation

<sup>4</sup> United Company RUSAL Engineering-Technological Centre LLC

**Abstract.** The purpose of the article is to study the main factors influencing the safe induction melting of cast iron at RUSAL enterprises, in particular at the Branch of PJSC RUSAL Bratsk in Shelekhov (IrkAZ), the correct choice of lining masses, their use, as well as factors affecting premature wear of the lining. The article shows that the resistance of the crucible of an induction furnace is determined by the physicochemical properties of the lining, depending on the chemical-mineralogical and granulometric composition of refractory materials. Acid lining consisting of silica refractory materials is used for lining induction furnaces for melting cast iron: mingo-sil 2001; finmix; cuarsil IS6-AN, KVMB-1, KVMB-2 (TU 1523-018-00187085-2002). The optimal content of silicon oxide was found to be 93.43–96.07% (wt). It was found that an excessive amount of boric anhydride ( $B_2O_3$ ) used as a binder in the lining mixture leads to the formation of a brittle glassy layer in the lining of the furnace. It is shown that, taking into account the optimal content of  $B_2O_3$  in the range of 0.7–1.0 % (wt.), the content of boron-containing additives in the KVMB-1 mixture is optimal from ready-made domestic molding mixtures. It is shown that an increase in the physicochemical resistance of acid quartz lining can be achieved by adding a small amount of fine corundum  $Al_2O_3$ . The resulting compounds (aluminum silicate and mullite) increase the fire resistance and durability of the lining. In addition, corundum additives can improve the quality of cast iron, preventing the appearance of harmful impurities in the structure of cast iron. The highest corundum content in the mixtures of KVMB-1 and KVMB-2 is ~

1.12 % (wt.). The composition of the lining with maximum durability was analyzed and the durability of the lining of the composition was studied: 5 % of grains of the 3–2 mm fraction, 50 % of grains of 2–0.5 mm, 45 % of grains < 0.5 mm. The durability of the lining was 35–36 heats before repair. The vibro-bulk density of the lining, which significantly affects its durability, was studied. It is established that the highest vibro-bulk density can be obtained using a mixture of KVMB-2. Taking into account the cost and physico-chemical properties of refractory materials, it is shown that domestic mixtures KVMB-1 and KVMB-2 are suitable for lining induction crucible furnaces. The use of these mixtures will significantly reduce the cost of equipment and increase the duration of use of the crucible.

**Keywords:** cast iron, steel, aluminum, induction crucible furnace, induction furnace design, induction furnace crucible refractories in aluminum production, properties of refractories, furnace lining

## Введение

Благодаря сочетанию физико-механических и химических свойств алюминий в настоящее время является широко используемым металлом после стали и чугуна. В числе этих свойств следует отметить его легкость и прочность при легировании другими металлами, стойкость против коррозии, высокую электро- и теплопроводность, прекрасную обрабатываемость и способность к рециклированию [1–5].

Алюминий химически активен ( $E^{\circ}_{\text{Al}^{3+}/\text{Al}} = -1,662\text{В}$ ), на воздухе покрывается тончайшей (5–10 нм) оксидной пленкой, надежно защищающей металл от дальнейшего окисления<sup>1,2,3</sup>. Алюминий и его сплавы широко применяются в электротехнике в качестве проводникового материала и для производства фольги, в машиностроении, авиакосмической отрасли, автомобилестроении, а также в строительной, химической, атомной и пищевой промышленности [6–8]. В настоящее время увеличивается доля алюминия, произведенного из вторичного сырья [9].

На предприятиях России алюминий производят в чистом виде, а также в виде литейных и деформируемых сплавов на его основе. Отливки из алюминиевых сплавов получают всеми существующими способами литья: литье под давлением, в кокиль, в песчаные формы, литье по выплавляемым моделям. По содержанию основных легирующих элементов литейные сплавы делятся на пять групп [10–12]:

I – система Al–Si–Mg;

II – система Al–Si–Cu;

III – система Al–Cu;

IV – система Al–Mg;

V – система Al – прочие компоненты.

Для повышения механических свойств изделий деформируемые алюминиевые сплавы легируют различными элементами, среди которых Си, Mn, Si, Mg, Zn и другие [10, 11].

Ежегодный рост мирового производства и потребления алюминия и сплавов на его основе, расширение областей его применения способствуют увеличению спроса на огнеупорные материалы. Цветная металлургия ежегодно потребляет ~ 3–4 % от общего объема производимых в стране огнеупорных материалов. При этом около 50–75 % всех огнеупоров приходится на производство алюминия. Выбор огнеупорных материалов, их надежность и эксплуатационные свойства в значительной степени определяют качество и себестоимость производимого алюминия и сплавов на его основе [2, 3]. За последние пятнадцать лет объемы научных исследований, инвестиций и внедрение новых технологий в области разработки специализированных огнеупорных материалов для алюминиевой промышленности России резко возросли [1, 13–16]. Основные производители предлагают множество индивидуальных решений для выполнения футеровки агрегатов алюминиевого производства. Необходимость разработки новых, специализированных огнеупоров была продиктована конкуренцией предприятий, производящих алюминий и его сплавы, а также стремлением повысить качество металла и снизить его себестоимость за счет повышения стойкости огнеупоров и увеличения межремонтного периода эксплуатации футеровки [17–20].

**Огнеупоры в алюминиевом производстве.** Огнеупорные материалы на

<sup>1</sup> Галевский Г. В., Минцис М. Я., Сиразутдинов Г. А. Металлургия алюминия: М.: Теплотехник, 2013. 234 с.

<sup>2</sup> Равдель А. А., Пономарева А. М. Краткий справочник физико-химических величин. М.: ООО «ТИД «АРИС»,

2010. 240 с.

<sup>3</sup> Лидин Р. А. Константы неорганических веществ: справочник. М.: Дрофа, 2008. 685 с.

предприятиях компании РУСАЛ используются в футеровке вращающихся печей производства глинозема (в печах кальцинации и печах спекания), электролизеров для получения металлического алюминия и электролитического рафинирования алюминия, отражательных печей и руднотермических печей получения алюминиевых сплавов (силуминов), а также индукционных тигельных печей для плавки чугуна, используемого для фиксации обожженных анодов [19, 21–27].

*Вращающаяся обжиговая печь* сходна с печью для обжига цемента. Зону обжига футеруют высокоглиноземистым кирпичом, другие зоны – шамотом. Для предотвращения коррозии и перегрева металлического корпуса печи применяют двухслойную футеровку. Слой, прилегающий к корпусу, делают теплоизоляционным.

*Электролитическая ванна* состоит из корпуса, футерованного внутри углеродистыми блоками (катод), подовая часть которого соединена с источником тока. Металлический корпус ванны с внутренней стороны облицовывают шамотными изделиями, на которые укладывают углеродистые блоки. Вакуумный ковш выкладывается высокосортными шамотными или высокоглиноземистыми огнеупорами.

*Плавильная печь* футеруется высокоглиноземистыми огнеупорами с содержанием 80–85 % глинозема. Летки печей – карбидкремниевыми и цирконовыми огнеупорами. Температура в печи сравнительно низкая, коррозионное действие шлака слабое. Однако алюминий, вследствие высокой смачивающей способности, легко проникает внутрь огнеупорных изделий. В связи с этим для футеровки печей требуются низкопористые материалы. Печи для выплавки высокочистого алюминия облицовывают высокочистыми или чистыми муллитовыми и глиноземистыми огнеупорами.

*Индукционные печи* легче других очищаются от шлака, а их футеровка отличается большей долговечностью. В качестве

огнеупоров применяют глиноземистые и высокоглиноземистые набивные массы с содержанием глинозема 70–80 % [21–29].

В последнее время в алюминиевой промышленности России широко используют нитридкремниевые и плавленные кварцевые огнеупоры<sup>4,5,6</sup>.

Нитридкремниевые огнеупоры плохо смачиваются расплавом алюминия и обладают высокой коррозионной стойкостью. Кроме того, они характеризуются высокой механической прочностью и малым термическим расширением, следовательно, хорошей устойчивостью к скалыванию, шелушению, трещинообразованию. Все это благоприятствует изготовлению из них защитных трубок для термопар, литейных ковшей, леток, клапанов при непрерывной разливке, футеровки насосов по перекачиванию жидкого алюминия, плавильных печей.

Плавленные кварцевые огнеупоры, отличающиеся малым термическим расширением, высокой термостойкостью, низкой теплопроводностью, применяются для футеровки желобов плавильных печей, горловин, рукавов, каналов.

В настоящее время в литейном производстве большинства алюминиевых заводов для футеровки тепловых агрегатов используются, как правило, недорогие проверенные временем, но устаревшие материалы, позволяющие обеспечить стабильную работу печи в течение 24–30 месяцев.

Для футеровки подины применяют огнеупорный шамотный кирпич марок ШБ-5, ШБ-9 производства Богдановичского ОАО «Огнеупоры». В качестве основного теплоизолятора используют диатомовый кирпич в сочетании с прослойками теплоизоляционной плиты марки МКРП-340 производства ОАО «Сухоложский огнеупорный завод» и листовой асбест. Кладку свода также выполняют из шамотного кирпича с теплоизолирующим слоем, выполненным из МКРП-340 толщиной 100 мм и минеральной ваты толщиной 200–250 мм.

<sup>4</sup> Темлянцев М. В. Огнеупоры и футеровки плавильных и литейных агрегатов алюминиевого производства. М.: Теплотехник, 2008. 192 с.

<sup>5</sup> Кривандина В. А. Теплотехника металлургического производства: учебное пособие для вузов. М.: МИСИС,

2002. 733 с.

<sup>6</sup> Гринберг И.С. Электрометаллургия алюминия: учебное пособие для вузов. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2009. 403 с.

Также существуют огнеупоры из волластонита, применяемые для литейного производства алюминия. Назначение: литьё слитков и изделий из алюминия (вставки и тепловые насадки в кристаллизатор, плиты, желоба, трубы, фильтры, питатели, лотки, мостики, втулки, стаканы, дюзы, дозаторы, трубы, регулирующие устройства, поплавки). Технические характеристики: отсутствие химического взаимодействия с расплавами алюминия; рабочая температура 700–800 °С; высокая термостойкость – до 50 теплосмен; низкая теплопроводность – 0,2–0,6 Вт/м·К<sup>4, 6</sup>.

Компанией Capital Refractories Limited предложены следующие материалы, используемые в желобах для разлива алюминия:

– Capiral 40 (Кэпирэл 40) – алюмосиликатный, низкоцементный огнеупорный бетон на водной связке. Материал используется в разливочных желобах с длительным сроком службы, высокопрочный;

– Capisil 90 (Кэписил 90) – низкоцементный бетон с хорошей стойкостью на основе плавленого кварца, на водной связке. Содержит вещества, повышающие качество обработки алюминия, в том числе в разливочных желобах. Это огнеупорный бетон общего назначения с высокой устойчивостью к термоудару, благодаря чему его можно использовать в зонах, наиболее подвергающихся перепадам температур;

– Capiral 85 (Кэпирэл 85) – низкоцементный огнеупорный бетон на основе боксита, на водной связке с длительным сроком службы. Материал содержит вещества, повышающие эффективность обработки расплавленного алюминия. Это высокопрочный огнеупорный бетон общего назначения, применение которого наиболее эффективно для ковшей и разливочных желобов.

– Capilight 70 (Кэпилайт 70) – низкоцементный огнеупорный бетон на основе плавленого кварца, на водной связке. Это теплоизоляционный огнеупорный бетон общего назначения, особенно подходящий для литых разливочных желобов.

В настоящее время конструкционные изменения тепловых агрегатов не дают эффективного снижения себестоимости продукции за счет снижения энергопотребления из-за применения прежних огнеупорных материалов.

Таким образом, в настоящее время в алюминиевой промышленности стоит вопрос о возможности использования новых современных огнеупорных материалов, применение которых позволит получить значительный экономический эффект при производстве алюминия.

**Применение отечественных огнеупоров для футеровки индукционных печей плавки чугуна.** Индукционная плавка чугуна приобрела широкое распространение как по числу действующих установок, так и по разнообразию технологических применений в самых разных областях промышленности и металлургии [21–26]. Индукционные печи относятся к числу относительно несложных в условиях эксплуатации плавильных агрегатов. В индукционных печах возможна выплавка любых марок чугунов на холодной и жидкой завалке [21–23]. Индукционная плавка имеет ряд преимуществ перед другими видами плавок, например, в вагранках и дуговых печах.

Однако есть ряд недостатков, среди которых небольшой ресурс работы тигля, низкая температура шлаков и высокая стоимость оборудования, которые не позволяют полностью использовать все способности современных индукционных тигельных печей. В работе рассматривались возможности совершенствования конструкции индукционных тигельных печей, используемых в анодно-монтажном отделении ИркАЗа. В настоящее время, чтобы уменьшить потери электромагнитного поля между индуктором и металлом, тигли производятся небольшой толщины. Кроме этого, между плавками постоянно возникает разность температур, что еще больше уменьшает стойкость футеровки. В настоящее время актуальным является применение отечественных огнеупоров, способных значительно улучшить рабочие свойства футеровки тигля индукционной печи, что в свою очередь позволяет обеспечить высокое качество выплавляемого металла и повысить продолжительность работы печи.

*Огнеупорными* называют материалы, способные длительное время противостоять действию высоких температур и физико-химическим воздействиям. Огнеупоры должны обладать специфическими, характерными только для них, свойствами<sup>4, 5</sup>.

Улучшение огнеупорных свойств футеровки тигля позволяет обеспечить высокое качество выплавляемого металла, повысить продолжительность работы печи [17–20, 30, 31].

Стойкость тигля определяют физико-химические свойства футеровки [19, 32–34]:

- объемная масса;
- пористость;
- водопоглощение;
- газопроницаемость;
- термостойкость;
- трещиностойкость;
- шлакоустойчивость;
- химическая инертность к воздействию печной атмосферы.

Эти свойства зависят от химико-минералогического и гранулометрического состава футеровки<sup>1,4,5</sup>.

Для футеровки индукционных печей плавки чугуна применяется кислая футеровка, состоящая из кремнеземистых огнеупорных материалов с содержанием оксида кремния в пределах от 93 до 98 % (рис. 1).

Примеры кислой футеровки: minro-sil 2001; finmix; cuarsil IS6-AN, КВМБ-1, КВМБ-2 (ТУ 1523-018-00187085-2002)<sup>7</sup> (рис. 2).

Футеровка MINRO-SIL 2001 представляет собой новейшее поколение высокочистых, сухих виброуплотняемых огнеупорных материалов на основе кремнезема, предназначенных для футеровки индукционных тигельных электропечей. Химический состав (за исключением связующего), % (мас.):  $\text{SiO}_2$  – 99,2;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0,5;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0,1; другие – 0,2. Плотность – 2180 кг/м<sup>3</sup>; гранулометрический состав – 4,75 мм и меньше; максимальная температура – 1650 °С; метод укладки – сухая трамбовка или виброуплотнение. Используя высококачественные кремнеземы и тщательную сортировку по крупности, MINRO-SIL 2001 обеспечивает более прогнозируемый срок службы и увеличенные кампании между сменами футеровки. Это улучшенное решение позволяет повысить монтажные свойства, обеспечивает плотную укладку зерен и хорошее истечение сухого порошка. Футеровка MINRO-SIL 2001

подходит для плавки серого, белого и высокопрочного чугуна при всех типах чугунолитейных операций. Этот материал может также использоваться для многих ферросплавов и легированных чугунов, таких как ферроникель, нирезист и для тугоплавких цветных металлов [35].



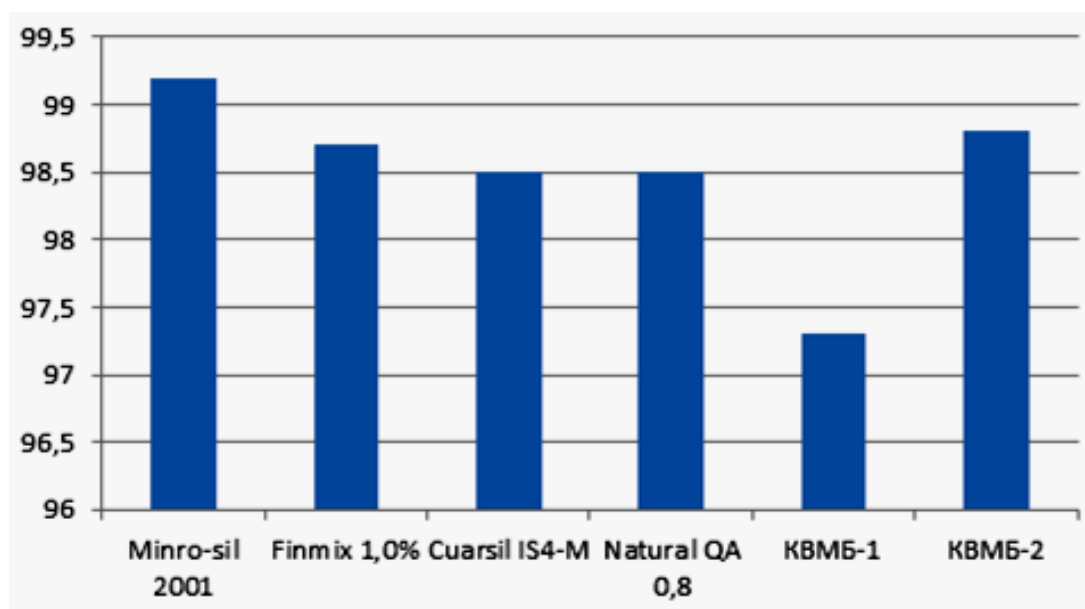
Рис. 1. Футеровочная масса для индукционных печей

Для футеровки тигля индукционной печи плавки чугуна может применяться также футеровочный материал FINMIX 1,0 %, состав которого, % (мас.) – 98,8  $\text{SiO}_2$  и 1,0  $\text{V}_2\text{O}_5$ . Рабочая температура – 1450–1550 °С [35].

Марка Cuarsil IS6 0,6AN, используемая как футеровка для плавки чугунов, представляет собой сухую набивную массу на основании кварцита фракции 0–6 мм с борным ангидридом. Химический состав, % (мас.):  $\text{SiO}_2$  – 98,0–99,0;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  < 1,0; максимальная температура – 1550 °С. Процедура набивки представляет собой ручную или механическую трамбовку. Для максимального уплотнения смеси рекомендуется использовать пневматический вибратор [35].

Массы огнеупорные кварцевые с добавкой борной кислоты марок КВМБ-1 и КВМБ-2 также предназначены для футеровки индукционных печей плавки черных и цветных металлов. Физико-химические показатели продукции представлены в табл.

<sup>7</sup> У 1523-018-00187085-2002 Масса огнеупорная кварцевая с добавкой борной кислоты (КВМБ-1; КВМБ-2).

Рис. 2. Содержание SiO<sub>2</sub> в футеровочных массахТаблица. Технические характеристики массы огнеупорной кварцитовой с добавкой борной кислоты по ТУ 1523-018-00187085-2002<sup>7</sup>

Показатели	Норма для марки	
	KBMB-1	KBMB-2
Содержание компонента, % (мас.)		
SiO <sub>2</sub> , не менее	96	96
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , в пределах	0,7–1,5	0,7–1,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не более	1,3	1,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не более	0,6	0,6
Содержание влаги	0,3	0,3
Зерновой состав, %		
Остаток на сетке № 6, в пределах	1–3	–
Остаток на сетке № 3, в пределах, не более	10–16	–
	–	3
Остаток на сетке № 1, в пределах	26–33	34–42
Остаток на сетке № 05, в пределах	8–14	7–13
Проход через сетку № 05, в пределах	42–48	49–55
в т. ч. проход через сетку № 0063, в пределах	21–29	28–33

Высококачественная сухая огнеупорная набивная масса Natural QA 0,5–1,2 В<sub>2</sub>O<sub>3</sub> предназначена для футеровки индукционных тигельных печей для плавки чугуна, меди и сплавов на её основе (бронзы, латуни) при температуре до 1650 °С. В зависимости от количества и типа связующего агента может применяться для плавки нелегированной стали (связующее В<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,5 % (мас.)) или в качестве футеровки тигля (связующее Н<sub>3</sub>ВО<sub>3</sub> – 1,2 % (мас.)). Способ уплотнения – вибрация, трамбовка. Основной огнеупор – кварцит. Natural QA – это виброуплотняемый материал

для футеровки индукционных тигельных печей производства компании EKW (Европа) представляет из себя готовую сухую смесь чистого микрокристаллического кварца с добавлением оксида бора В<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или Н<sub>3</sub>ВО<sub>3</sub>. Гранулометрический состав специального кварцита идеально подходит для улучшения параметров процесса уплотнения и достижения высокой плотности, прочности и теплоизоляционных свойств футеровки. Количество добавляемого оксида бора зависит от температуры применения и марки выплавляемого сплава. В частности, область применения материала

Natural QA 0,8 – плавка серого и ковкого чугуна. Содержание связующего  $B_2O_3$  в нем – 0,8 % (мас.); максимальная рабочая температура – 1500–1550 °С [35–37]. Набивные массы и футеровочные смеси Natural широко известны во всем мире. Несмотря на более высокую цену, по сравнению с отечественными аналогами, импортные футеровки находят все более широкое применение в России благодаря ряду преимуществ:

- высокое сопротивление к эрозии и проникновению расплава металла (низкая смачиваемость расплавом металла);
- идеальны для производства стального литья, отливок из чугуна и меди;
- кислые футеровки допускают периодичность в работе, что соответствует технологическому процессу многих литейных производств;
- стойкость футеровки в несколько раз выше, чем у аналогов (до года или 400 плавов);
- позволяет быстро разогреть металл до требуемой температуры (низкая аккумуляция тепла);
- достигается экономия тепла и электричества (низкая теплопроводность);
- увеличение качества чугунного, стального и медного литья;
- набивные массы готовы к применению (не требуют прокалики, рассева и смешения со связующим);

– при набивке футеровки используются традиционные технологические приемы.

По результатам теоретических исследований и практических испытаний в работе установлено, что оптимальным является содержание  $SiO_2$  в пределах от 93,43 до 96,07 % [17–20, 32, 34].

В качестве связующего в футеровочной смеси выступает борный ангидрид ( $B_2O_3$ ). Содержание  $B_2O_3$  в футеровочных массах разных производителей и назначения массы может быть различным (рис. 3).

Установлено, что избыточное количество борной кислоты или борного ангидрида приводит к образованию хрупкого стекловидного слоя в футеровке печи. Риск температурного повреждения тигля стремительно растет при толщине остеклованной зоны более 1/3 толщины футеровки тигля, но при этом увеличивается износостойкость к размыванию расплавом. При недостаточном количестве борсодержащей добавки происходит повышенный равномерный износ, рабочая зона футеровки при этом при недостаточно спеченная – толщина не спеченной и переходной зон больше 2/3 толщины всей футеровки [32, 34].

Учитывая оптимальное содержание  $B_2O_3$  в пределах 0,7–1,0 % (мас.), из готовых отечественных формовочных смесей оптимальным является содержание борсодержащей добавки в смеси КВМБ-1.

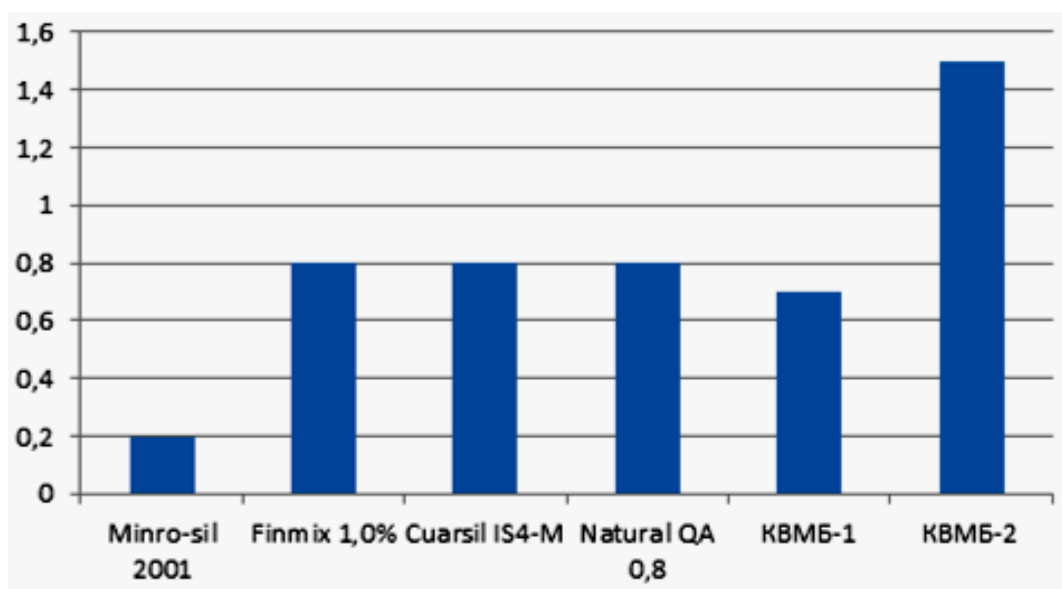


Рис. 3. Содержание  $B_2O_3$  в футеровочных массах

Повышения физико-химической стойкости кислой кварцевой футеровки можно достичь добавлением небольшого количества мелкодисперсного корунда  $Al_2O_3$  (рис. 4) [34]. В результате применения электрокорунда образуются соединения, силикат алюминия и муллит ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), повышающие огнеупорность и стойкость футеровки<sup>5</sup>. Кроме этого, добавки корунда позволяют повысить качество выплавляемого чугуна, обволакивая минимальным слоем частицы кварца и ограждая их от химического взаимодействия с металлическим расплавом и углеродом, тем самым не допуская появления вредных примесей в структуре чугуна [34].

По результатам исследований оптимальным соотношением компонентов является от 2,75 до 4,15 % электрокорунда марки 0315 и от 0,51 до 1,21 % электрокорунда марки 0125. В готовых футеровочных смесях содержание корунда ниже [34]. Из рассматриваемых составов выше содержание корунда в смесях КВМБ-1 и КВМБ-2.

В настоящей работе был проанализирован состав футеровки, обладающей максимальной стойкостью и исследовалась стойкость футеровки состава: 5 % зерен фракции 3–2 мм, 50 % – зерен 2–0,5 мм, 45 % – зерен < 0,5 мм. Стойкость футеровки составляет 35–36 плавов до ремонта.

На основе исследований выяснено, что гранулометрический состав футеровки может быть завязан только на кварцевом песке с долей  $SiO_2$  более 97 %. Содержание

крупнозернистой составляющей должно быть около 80 %, а тонкой и пылевидной фракций – 20 %. Стойкость футеровки составляет 32–36 плавов до ремонта [34].

Кремнезем, являющийся компонентом номер один данных смесей, присутствует, в мелком, разнофракционном состоянии. Пыль, состоящая из частиц диоксида кремния ( $SiO_2$ ), при систематическом воздействии на легкие вызывает заболевание – силикоз легких. Исходя из минимального вреда для людей, проводящих работы по замене футеровки, лучше использовать смеси с меньшим содержанием пылевидной фракции<sup>4</sup>.

Еще один показатель, качественно влияющий на стойкость футеровки – вибронасыпная плотность, которая в свою очередь зависит от многих факторов, не исключая даже форму огранки молотого диоксида кремния.

Сравнение показателей плотности масс представлено на рис. 5.

Из диаграммы видно, что наибольшую вибронасыпную плотность можно получить, используя смесь КВМБ-2.

Если объединить все требования и выводы по анализу диаграмм, а также учитывая экономическую составляющую цены последних лет, то в большей степени из готовых смесей для футеровки подходят смеси КВМБ-1 и КВМБ-2. Сравнивая показатели опытной эксплуатации печей на смесях КВМБ разного состава, к постоянному применению было предложено использование КВМБ-2 (КВМБ состава 2). Основным аргументом к эксплуатации –

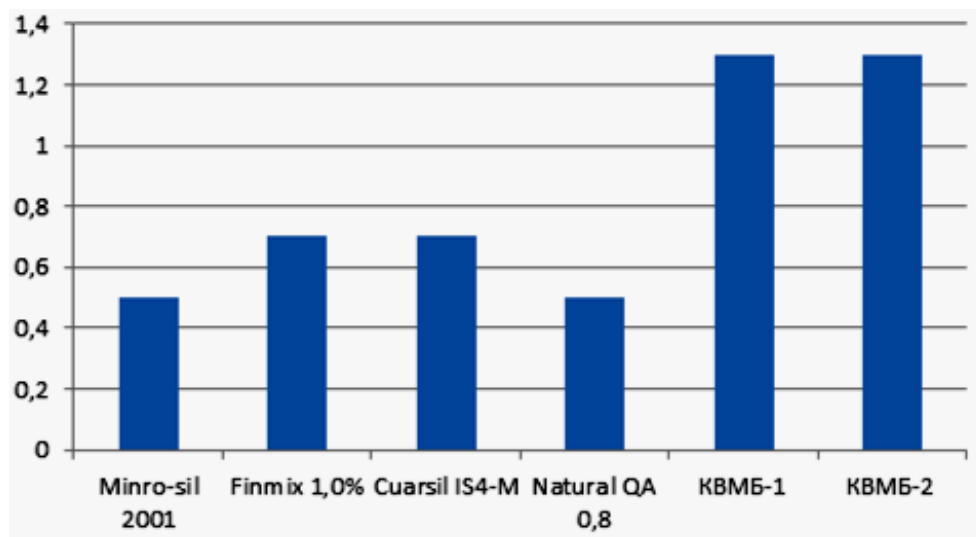


Рис. 4. Содержание  $Al_2O_3$  в футеровочных массах



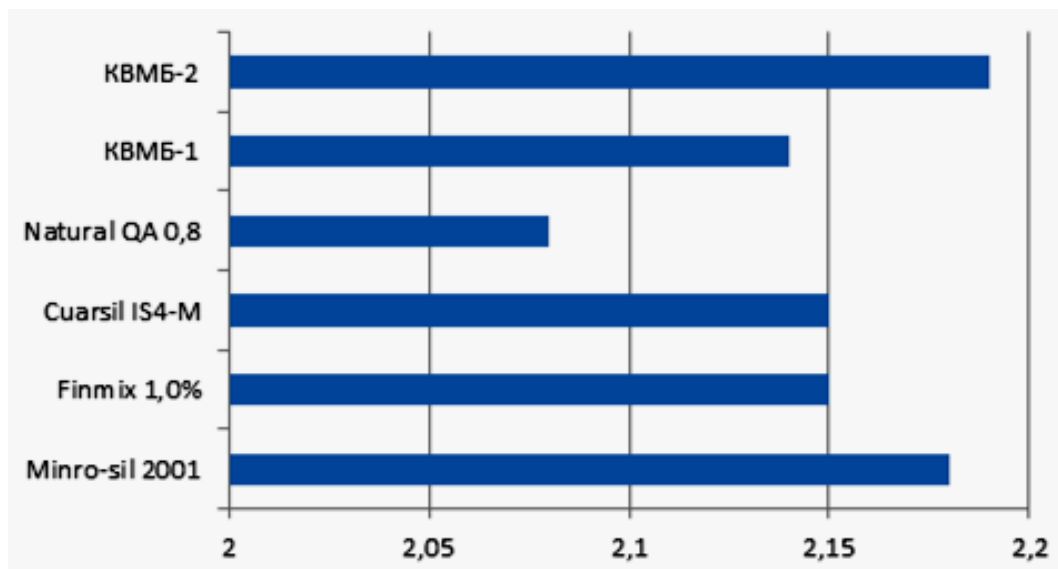


Рис. 5. Плотность, г/см<sup>3</sup>, обеспечиваемая футеровочными смесями

высокая износостойкость при рабочих температурах, риск трещинообразования стекловидного слоя, при термическом шоке остановки печи, нивелирован изменением режима работы печи, который принят как безостановочный – от футеровки до остановки на капремонт тигля.

### Заключение

В работе решалась задача использования для футеровки тигля индукционной печи отечественных огнеупорных материалов.

По результатам проведенных исследований показано, что для футеровки индукционных печей плавки чугуна, используемых в анодно-монтажном отделении ИркаЗа, можно применять отечественные огнеупорные материалы КВМБ-1, КВМБ-2 (ТУ 1523-018-00187085-2002). Оптимальное содержание оксида кремния составляет 93,43–96,07 % (мас).

Избыточное количество борного ангидрида ( $B_2O_3$ ), используемого в качестве связующего в футеровочной смеси, приводит к образованию хрупкого стекловидного слоя в футеровке печи. Показано, что из готовых отечественных формовочных смесей оптимальным является содержание борсодержащей добавки в смеси КВМБ-1 (содержание  $B_2O_3$  ~ 0,7 % (мас)).

Повышение химической стойкости кислотоустойчивой футеровки можно достичь

добавлением небольшого количества мелкодисперсного корунда  $Al_2O_3$ . Образующиеся в результате силикат алюминия и муллит повышают огнеупорность и химическую стойкость футеровки. Кроме этого, добавки корунда позволяют повысить качество выплавляемого чугуна, не допуская появления вредных примесей в его структуре. Для футеровки рекомендовано использовать смеси КВМБ-1 и КВМБ-2, содержащие наибольшее количество мелкодисперсного корунда  $Al_2O_3$  (~ 1,12 % (мас)).

В работе был проанализирован состав футеровки, обладающей максимальной стойкостью и исследовалась стойкость футеровки состава: 5 % зерен фракции 3–2 мм, 50 % – зерен 2–0,5 мм, 45 % – зерен < 0,5 мм. Стойкость футеровки составила 35–36 плавов до ремонта.

Исследовалась вибронасыпная плотность футеровки, значительно влияющая на ее стойкость. Наибольшую вибронасыпную плотность можно получить, используя смесь КВМБ-2.

Учитывая себестоимость и физико-химические свойства огнеупорных материалов, из готовых смесей для футеровки индукционных тигельных печей подходят отечественные смеси КВМБ-1 и КВМБ-2. Их использование позволит значительно снизить стоимость обслуживания и увеличить продолжительность эксплуатации тигля индукционной печи.

## Список источников

1. Григорьев В. Г., Тепикин С. В., Пьянкин А. П., Кузаков А. А., Высотский Д. В., Кузьмин М. П. Оптимизация некоторых элементов технологии производства алюминия // Цветные металлы и минералы – 2018: сборник докладов XX Международного конгресса (Красноярск, 10–14 сентября 2018 г.). Красноярск: Изд-во: Научно-инновационный центр, 2018. С. 541–545.
2. Кузьмин М. П., Шестаков С. С., Кузьмина М. Ю., Журавлёва А. С. Инновационное развитие металлургического комплекса Иркутской области // Вестник ИРГТУ. 2015. № 5 (100). С. 236–240.
3. Сизяков В. М., Власов А. А., Бажин В. Ю. Стратегические задачи металлургического комплекса России // Цветные металлы. 2016. № 1. С. 32–37.
4. Летов А. В., Немчинова Н. В., Тузов А. В. Управление процессом электролиза криолит-глиноземных расплавов // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: материалы XII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 20–21 апреля, 2022 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2022. С. 10–12.
5. Бурдонов А. Е., Зелинская Е. В., Немчинова Н. В., Новиков Ю. В. Переработка глиноземсодержащего шлама для использования в производстве первичного алюминия // Цветные металлы. 2022. № 8. С. 15–22.
6. Кузьмина М. Ю., Кузьмин М. П. Исследование анодного окисления алюминиевой катанки // Материалы научно-технической конференции молодых ученых и специалистов алюминиевой и электродной промышленности, посвященной 50-летию ОАО «СибВАМИ» (Иркутск, октябрь, 2008). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2008. С. 104–106.
7. Ситникова В. Г., Кузьмина М. Ю. Возможности химического оксидирования алюминия // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Иркутск, 24–26 апреля 2019 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. С. 33–35.
8. Кузьмина М. Ю., Белик О. Д. Применение титана и алюминия в технологических аппаратах пищевой промышленности // Актуальные проблемы химии, биотехнологии и сферы услуг: материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Иркутск, апрель 2018 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ 2018. С. 108–113.
9. Немчинова Н. В., Бараускас А. Э., Тютрин А. А., Вологин В. С. Переработка мелкодисперсного техногенного сырья производства алюминия с целью извлечения ценных компонентов // Известия вузов. Цветная металлургия. 2021. Т. 27. № 5. С. 38–49.
10. Кузьмин П. Б., Стрелов А. В., Кузьмина М. Ю. Особенности производства литейных алюминиевых сплавов, модифицированных стронцием // Цветные металлы и минералы, 2014. Красноярск: ГУЦМиЗ, 2014. С. 360–361.
11. Кузьмин П. Б., Кузьмина М. Ю. О производстве чешек первичных силуминов, модифицированных стронцием // Литейное производство. 2014. № 8. С. 2–5.
12. Кузьмин П. Б., Стрелов А. В., Кузьмина М. Ю. Использование новых методов экспресс-анализа и контроля расплава для подтверждения качества литейных сплавов // Цветные металлы и минералы – 2015: сборник докладов 7-го Международного конгресса (Красноярск, 14–17 сентября 2015 г.). Красноярск: Изд-во: Научно-инновационный центр, 2015. С. 1174–1177.
13. Кузьмин М. П., Ларионов Л. М., Кузьмина М. Ю., Кузьмина А. С. Получение заэвтектических силуминов с использованием аморфного диоксида кремния // Цветные металлы. 2019. № 12 (924). С. 29–36.
14. Kuz'min M. P., Kondrat'ev V. V., Larionov L. M., Kuz'mina M. Y., Ivanchik N. N Possibility of preparing alloys of the Al–Si system using amorphous microsilica // Metallurgist. 2017. Vol. 61. P. 86–91.
15. Kuz'min M. P., Paul K. Chu, Abdul M. Qasim, Larionov L. M., Kuz'mina M. Yu., Kuz'min P. B. Obtaining of Al–Si foundry alloys using amorphous microsilica – Crystalline silicon production waste // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 806. P. 806–813.
16. Kuz'min M. P., Larionov L. M., Paul K. Chu, Abdul M. Qasim, Kuz'mina M. Yu., Kondratiev V. V., Kuz'mina A. S., Jia Q. Ran New methods of obtaining Al–Si alloys using amorphous microsilica // International Journal of Metalcasting. 2019. P. 1–11.
17. Матвеев И. Д., Кузьмина М. Ю. Исследование свойств огнеупорных материалов, используемых для литейной оснастки алюминиевого производства // Переработка природного и техногенного сырья: сборник научных трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых Института высоких технологий. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. С. 45–50.
18. Матвеев И. Д., Кузьмина М. Ю. Совершенствование огнеупорных материалов для футеровки литейных агрегатов алюминиевого производства // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Иркутск, апрель 2020 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2020. С. 56–59.
19. Матвеев И. Д., Кузьмина М. Ю. Разработка методики определения основных свойств огнеупорных изделий, используемых при производстве алюминия // Молодежный вестник ИРГТУ. 2020. Т. 10. № 2. С. 49–55.
20. Евсеев Н. В., Матвеев И. Д., Кузьмина М. Ю., Дрожженко А. П. Уменьшение пористости алюмосиликатных огнеупоров как способ улучшения их эксплуатационных характеристик // Переработка природного и техногенного сырья: сборник научных трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых Института высоких технологий. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2020. С. 86–90.
21. Лузгин В. И., Петров А. Ю., Рачков С. А., Якушев К. В. Высокоэффективные индукционные среднечастотные плавильные комплексы с печами вместимостью 1–16 т для литейного производства // Литье и металлургия. 2006. № 2 (38). С. 58–63.
22. Левшин Г. Е. Пути совершенствования

- индукционных тигельных печей // Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 2. С. 97–102.
23. Маляров А. И. Некоторые особенности технологии плавки в среднечастотных тигельных печах // Металлургия машиностроения. 2017. № 4. С. 7–9.
24. Сахаревич А. Н. Индукционные тигельные печи. Конструктивные отличия, эксплуатация // Литье и металлургия. 2012. № 3 (67). С. 242–245.
25. Роговский А. Н., Шипельников А. А. Технологические операции плавки чугуна и стали в индукционной тигельной печи. Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2015. 20 с.
26. Платонов Б. П., Акименко А. Д., Богуцкая С. М. Индукционные печи для плавки чугуна. М.: Машиностроение, 1976. 176 с.
27. Лузгин В. И., Петров А. Ю., Фаерман Л. И. Индукционные печи средней частоты нового поколения // Черные металлы. 2006. С. 14–25.
28. Мортимер Дж. Х. Завтрашние технологии индукционной плавки существуют уже сегодня // Литейщик России. 2002. № 1. С. 32–37.
29. Теслев С. А. Исследование увеличения срока эксплуатации футеровки индукционных печей при переплаве ферросилиция // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов IV Международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодых ученых (Юрга, 20-21 мая 2010 г.). Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. С. 282–285.
30. Яковлева А. А., Немчинова Н. В. Перспективы использования глин локального проявления в металлургической практике // Вестник ИрГТУ. 2019. Т. 23. № 2. С. 415–425.
31. Кузьмин М. П., Ларионов Л. М., Кузьмина М. Ю., Григорьев В. Г. Промышленное использование отхода производства плавиковой кислоты – фторгипса // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9. № 2. С. 324–333.
32. Сасса В. С. Футеровка индукционных электропечей. М.: Металлургия, 1989. 232 с.
33. Маляров А. И. Некоторые особенности технологии плавки в среднечастотных тигельных печах // Металлургия машиностроения. 2017. № 4. С. 7–9.
34. Медведев Е. С., Кузьмина М. Ю. Капитальный ремонт тигля индукционной печи // Переработка природного и техногенного сырья: сборник научных трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых Института высоких технологий. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2021. С. 71–75.
35. Сизов В. И., Гороховский А. М., Карпец А. А. Применение отечественных огнеупоров для футеровки агрегатов плавки и переработки алюминия и его сплавов // Новые огнеупоры. 2006. № 4. С. 86–89.
36. Перепелицин В. А., Сизов В. И., Рытвин В. М., Игнатенко В. Г. Износостойчивость огнеупоров в пирометаллургии алюминия // Новые огнеупоры. 2007. № 9. С. 15–19.
37. Гришенков Е. Е. О выборе огнеупоров для печей алюминиевой промышленности // Новые огнеупоры. 2003. № 5. С. 66–68.

## Информация об авторах/ Information about the Authors

**Марина Юрьевна Кузьмина,**  
кандидат химических наук, доцент,  
доцент кафедры металлургии цветных металлов,  
Институт высоких технологий,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
kuzmina.my@yandex.ru

**Евгений Сергеевич Медведев,**  
магистрант,  
Институт высоких технологий,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
ev.medvedev1983@yandex.ru

**Игорь Дмитриевич Матвеев,**  
магистрант,  
Институт высоких технологий,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
Matveenko2011@yandex.ru

**Marina Yu. Kuzmina,**  
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,  
Department of Metallurgy of Nonferrous Metals,  
Institute of High Technologies,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,  
Russian Federation,  
kuzmina.my@yandex.ru

**Evgeny S. Medvedev,**  
Master's Degree Student,  
Institute of High Technologies,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,  
Russian Federation,  
ev.medvedev1983@yandex.ru

**Igor D. Matveenko,**  
Master's Degree Student,  
Institute of High Technologies,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,  
Russian Federation,  
Matveenko2011@yandex.ru

**Петр Борисович Кузьмин,**  
кандидат технических наук,  
начальник отдела литья ИркАЗ  
ЛЦ ООО «РУСАЛ ИТЦ»,  
660111, г. Красноярск,  
ул. Пограничников, д. 37/1,  
Российская Федерация,  
Petr.Kuzmin@rusal.com

**Petr B. Kuzmin**  
Cand. Sci. (Technics),  
Head Cast Shop Technology “  
RUSAL ETC’s branch in Shelekhov”,  
United Company RUSAL Engineering-Technological  
Centre LLC,  
37/1 Pogranichnikov St., 660111 Krasnoyarsk,  
Russian Federation,  
Petr.Kuzmin@rusal.com