

го воздуха. Как следствие, КПД на уровне 20–30 практически не достижим. В то же время, применение современной проходной (методической либо полуметодической) печи для нагрева заготовок перед ковкой-штамповкой вполне оправдано, так как в таком агрегате КПД 40–50 % реален.

3. В процессе расчетов следует учитывать, что применение рекомендаций Департамента по энергоэффективности Республики Беларусь относительно стоимости условного топлива приводят к некорректным результатам и завышению эффективности электронагрева. При выполнении обоснования энергосберегающих мероприятий более корректно использовать действующие тарифы на энергоресурсы. Допустима и необходима лишь сравнительная оценка энергопотребления при переводе различных источников энергии в условное топливо, а также сопоставление капитальных и эксплуатационных затрат.

УДК 669.71/531.262

**Г.А. РУМЯНЦЕВА, канд. техн. наук,
Б.М. НЕМЕНЕНОК, д-р техн. наук,
Е.А. ВОЛЬСКИЙ,
И.А. ГОРБЕЛЬ (БНТУ)**

ПОВЫШЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ФУТЕРОВКИ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПЛАВКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Анализ работы плавильных печей цехов и участков алюминиевого литья показал, что срок службы футеровки во многом зависит от типа, назначения, емкости печи, марок выплавляемых сплавов, режима работы печи, вида шихты и способа ее загрузки.

Футеровка печей в процессе эксплуатации подвергается воздействию многих разрушающих факторов, среди которых необходимо выделить следующие:

1) Механическое воздействие на футеровку ударов шихты в ходе ее загрузки и инструмента в процессе чистки стен и пода от шлаковых наростов и настывлей. В меньшей степени механическое воздействие проявляется от потоков движущегося расплава.

2) Физическое воздействие, связанное с проникновением расплава в футеровку по порам, швам и трещинам, с последующим ее разрушением из-за разницы в коэффициентах линейного расширения металла и огнеупора.

3) Химическое взаимодействие материала огнеупора с компонентами расплава, что сопровождается восстановлением кремния алюминием из SiO_2 и ошлаковыванием футеровки с образованием шлаковых настывлей и наростов. При этом изменения, происходящие с огнеупорами в результате этого взаимодействия, настолько значительны, что они существенно изменяют способность огнеупора противостоять всем другим воздействиям.

В таблице 1 приведено изменение состава шамотной футеровки печи для плавки алюминия после одного года ее эксплуатации [1].

Таблица 1 – Изменение состава футеровки печи для плавки алюминия [1]

Анализируемые огнеупоры	Состав футеровки, %				
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Al
Исходный состав	61,5	23,7	0,94	0,42	0
После года эксплуатации	2,06	82,5	0,65	1,7	7,6

Видно, что в ходе эксплуатации печей происходит восстановление кремнезема и оксида железа при значительной металлзации огнеупоров. Последнее приводит к увеличению теплопроводности рабочего, а затем и теплоизоляционного слоя вследствие кристаллизации металла в порах огнеупора. Взаимодействие алюмосиликатных огнеупоров с расплавами алюминия развивается от поверхности контакта вглубь кладки не равномерно, а с опережением в местах прохода металла по трещинам и неплотностям.

С целью выбора наиболее устойчивых к расплаву алюминия футеровок анализировали их составы (таблица 2) и зависимость стандартного изобарного потенциала образования некоторых оксидов от температуры (рисунок 1).

Таблица 2 – Химический состав огнеупоров, применяемых для футеровки печей при плавке алюминиевых сплавов [2, 3]

Материал	Химический состав, %				
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Прочие соединения
Шамот	20–45	50–75	–	1,0–3,0	(Na ₂ O + K ₂ O) < 3,5
Муллит	72–75	24–26	–	0,3–1,0	(Na ₂ O + K ₂ O) < 0,3–0,6
Андалузит	59,0	41,0	–	–	–
Боксит	90,0	10,0	–	–	–
Корунд	99,5	–	–	–	–
Resistal B85 Spezial	83,3	7,0	–	1,4	BaO – 1,8 P ₂ O ₅ – 3,1
MTNFL P-76	76,0	10,0	–	1,5	BaO – 5,0 P ₂ O ₅ – 4,0
ВГББ-3Ф	> 65,0	> 12			BaSO ₄ – 7–10 P ₂ O ₅ – 2,5–4,0
Алит-72 АРС-Ал	82,0	3,0	3,8	0,9	–
Алит-65 АРС-Ал	66,0	22,0	3,8	0,7	–
Алит-72 АР	85,0	9,0	2,9	1,0	–
Алит-42 АРС-Ал	52,0	36,0	3,8	0,9	–
Алкорит-53/1,5	54,0	43,0	1,5	0,7	–
Алкорит-85/1,5	86,0	8,0	1,5	1,1	–
Алкор-76 А	86,0	4,0	6,0	1,2	–
Алкор-37-25	40,0	43,0	11,0	4,0	–
Алак-1,4-1350	43,0	40,0	12,0	3,0	–
Алак-0,9-1000	32,0	28,0	17,0	12,0	–

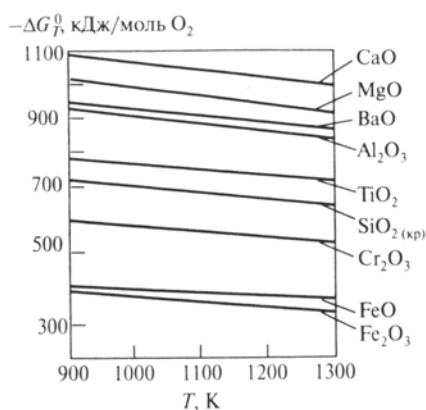
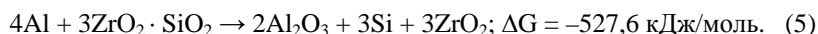
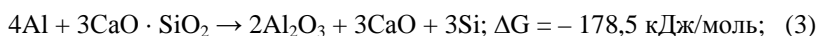
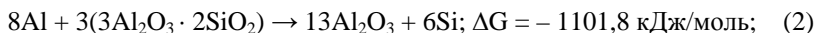
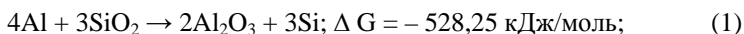


Рисунок 1 – Зависимость стандартного изобарного потенциала образования некоторых оксидов от температуры [2]

Учитывая, что степень химического взаимодействия огнеупорного материала с расплавом должна быть минимальна, в составе огнеупора нежелательно большое содержание оксидов, способных восстанавливаться жидким алюминием. Из рисунка 1 следует, что оксиды, расположенные выше Al_2O_3 , имеют более низкую свободную энергию и не могут быть восстановлены расплавленным алюминием.

Кристаллический кремнезем, оксиды железа, титана и хрома способны взаимодействовать с расплавом алюминия и восстанавливаться в процессе эксплуатации печей. Поэтому содержание SiO_2 в современных огнеупорах (Resistal B85 Spezial, MTNFL P-76 и ВГББ-3Ф) снижено до 7–12 % (таблица 2). Исходя из рисунка 1, на увеличении срока службы огнеупоров положительно может сказаться наличие в их составе оксидов кальция, бария и магния. Это подтверждается и данными таблицы 2. Так, все огнеупоры иностранного производства и ВГББ-3Ф содержат в своем составе 1,8–5,0 % BaO или 7–10 % BaSO_4 , а огнеупорные бетоны серии Алкор и Алакс содержат 6,0–17,0 % CaO . Расчеты показывают, что восстановление кремния алюминием возможно не только из кремнезема, но и из более сложных силикатов:



Объемный эффект большинства реакций алюминия с алюмосиликатами на поверхности отрицателен, и продукты реакций занимают меньший объем, а образовавшиеся полости заполняются поступающим расплавом алюминия, и продукты реакции не образуют сплошную пленку. Пористая пленка оксида алюминия не является барьером для дальнейшего взаимодействия алюминия с огнеупором. Поэтому расплав алюминия и магния (который входит в состав большинства литейных алюминиевых сплавов) проникает вглубь огнеупора по порам и полостям, образующимся при реакциях и уменьшении размеров зерен огнеупора. В отдельных случаях в та-

ких порах возможно взаимодействие алюминия и магния с кислородом, при этом продукты реакции будут расклинивать поры и вызывать растрескивание огнеупора с дальнейшим проникновением металла вглубь футеровки.

Принято считать [3], что степень взаимодействия футеровки с расплавом (коррозии) обратно пропорциональна содержанию оксида алюминия в огнеупорном материале. Однако эта зависимость нарушается, если алюминиевый сплав содержит магний. В этом случае оксид алюминия реагирует с магнием с образованием алюмомagneзильной шпинели, что способствует более быстрому нарастанию рабочего пространства печи и перерождению футеровки.

Существенное влияние на стойкость футеровки оказывает ее смачиваемость расплавом алюминия. При краевом угле смачивания менее 90° поры любого диаметра проницаемы для расплава. Для снижения смачиваемости расплавом керамики в состав алюмосиликатных огнеупорных масс вводят различные добавки, такие, как сульфат бария $BaSO_4$, фторид кальция CaF_2 , фторид алюминия AlF_3 , борат алюминия $AlBO_3$, титанат алюминия $AlTi$, волластонит $CaSiO_3$, карбид кремния SiC , нитрид алюминия AlN и их композиции [3]. Как видно из рисунка 2, добавки $BaSO_4$ увеличивают краевой угол смачивания до $105-125^\circ$.

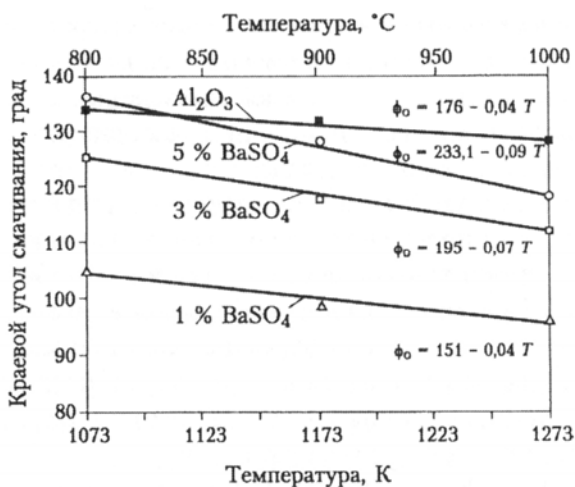
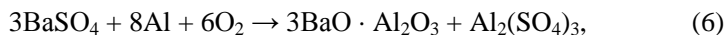


Рисунок 2 – Влияние температуры и добавок $BaSO_4$ на краевой угол смачивания расплавом алюминия подложки из Al_2O_3 [3]

В присутствии сульфата бария, расплавленного алюминия и кислорода воздуха протекает реакция



которая приводит к зарастанию пор продуктами реакции. В дальнейшем $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ может претерпевать химическое превращение с образованием цельзиана $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$.

Создание огнеупорных материалов, обладающих комплексом требуемых свойств, не всегда представляется возможным. Поэтому элементы футеровки пламенных печей должны выполняться из разных материалов, которые в максимальной степени могут противостоять факторам ее износа (таблица 3).

Таблица 3 – Влияние различных факторов на износ элементов футеровки пламенных печей [1]*

Элемент футеровки	Механические повреждения	Эрозия	Проникновение расплава	Абразивный износ	Термоудар	Рост настывшей корунда	Химическое взаимодействие
Под печи	2	1	1	1		1	1
Стены ниже уровня металла	1	1	3	1		2	2
Загрузочный откос	3		1	3	1	1	
Порог загрузочного окна	3			2	2		
Стены выше уровня металла	1				1	1	1
Свод	1				1		
Горелочный камень					3		1
Дверь	1				2		1
Боров					1		1
* Степень влияния: 1 – малая; 2 – средняя; 3 – сильная							

Части футеровки, которые контактируют с жидким расплавом, следует выполнять многослойными. При этом для исключения коррозии огнеупоров можно использовать материалы, плохо смачиваемые расплавом, или защищать их рабочие поверхности специальными огнеупорными и теплостойкими покрытиями, полученными с использованием СВС-технологий [4].

Это позволит, во-первых, повысить срок службы огнеупорной футеровки, и, во-вторых, исключить загрязнение расплава продуктами реакций, протекающих между расплавом и составляющими футеровки.

Литература

- 1. Непрерывное** литье алюминиевых сплавов / В.И. Напалков [и др.]. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 512 с.
- 2. Макаров, Г.С.** Слитки из алюминиевых сплавов с магнием и кремнием для прессования. Основы производства / Г.С. Макаров. – М.: Интермет Инжиниринг, 2011. – 528 с.
- 3. Волочко, А.Т.** Алюминий: Технологии и оборудование для получения литых изделий / А.Т. Волочко, М.А. Садох. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 387 с.
- 4. Жукова, А.А.** Керамические материалы и покрытия для тепловых агрегатов, полученные с использованием синтезированного сырья и отходов металлургического производства: автореф. дисс. ...канд. техн. наук: 05.16.09 / А.А. Жукова; ФТИ НАНБ. – Минск, 2012. – 23 с.

УДК 621.74

С.В. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук (БНТУ)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПЛАВКИ СТАЛИ В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ*

Введение. Плавка стали в электрических печах является одним из основных технологических методов получения жидкого расплава в металлургическом и литейном производстве в Республике Беларусь.