

Дегазация алюминиевых расплавов электрическим током

Исследовано влияние параметров обработки алюминиевых расплавов электрическим током на процесс дегазации в стационарных условиях (ковш, печь) и в потоке при разливке. Рассмотрен механизм дегазации. Установлено, что направленное движение и перераспределение ионов H^+ между анодом и катодом под действием постоянного электрического тока не вносят существенного вклада в дегазацию. Значимыми факторами удаления водорода из расплава при пропускании электрического тока является электроперенос ионов примесей и увеличение скорости массообмена водорода между расплавом и окружающей средой, в которой парциальное давление водорода должно быть значимо меньшим.

Ключевые слова: алюминиевые расплавы, газосодержание, степень дегазации, электрический ток.

Введение. Плавка и литье алюминиевых сплавов сопровождается взаимодействием расплава с атмосферой печи и влагой, вносимой шихтовыми материалами, насыщением его водородом, образованием газовой и газо-усадочной пористости при затвердевании. Это отражается на качестве выпускаемой продукции, приводит к ухудшению механических свойств, снижению выхода годного и экономических показателей производства. В связи с этим актуальны исследования, направленные на разработку теории и практики экологически безопасных способов дегазации, эффективно уменьшающих содержание водорода в металлах и сплавах.

Постановка проблемы. В практике литейного и металлургического производства широко используются адсорбционные методы дегазации, в частности, инертными газами [1]. Однако, им присущ общий недостаток – невозможность охватить весь объем металла. Более эффективными являются неадсорбционные методы, основанные на принципе нарушения равновесия в системе металл – газ. Среди них: вакуумирование [2], воздействие ультразвуком [3], электромагнитным полем и электрическим током [4–10]. Влияние последнего мало изучено. Нет четких представлений о механизме дегазации расплавов электрическим током, позволяющем объяснить всю совокупность экспериментальных данных, описанных в литературе, их противоречивость [5, 6]. Это затрудняет анализ результатов, полученных разными авторами, не позволяет воспроизвести их в промышленных условиях, хотя с точки зрения реализации на производстве, процесс дегазации расплавов электрическим током прост и технологичен.

Цель работы – исследовать влияние технологических параметров выплавки, разливки и режимов пропускания электрического тока через алюминиевые расплавы на газонасыщение и дегазацию, установить механизм удаления водорода под воздействием электрического тока.

Материалы и методики исследований. Эксперименты по дегазации расплавов проводили на алюминии марки А7 и сплаве АК12М2МгН в лабораторных и промышленных условиях, с использо-

ванием устройств, схемы которых представлены на рис. 1–4.

Лабораторная установка для обработки потока расплава электрическим током (рис. 1) состоит из желоба (1), двух графитовых электродов (2, 3), один из которых зафутерован в корпус желоба, а другой перемещается вдоль его оси. Для изменения силы (плотности) тока в работе использовали выпрямитель сварочный (4) марки ВДГ-30ТУЗ или выпрямитель сварочный многопостовой (4) марки ВКСМ-1000, реостаты балластные (5) марки РБ-301А, внешние шунты (6) марок 75ШС на 1000, 500, 300 и 30 А.

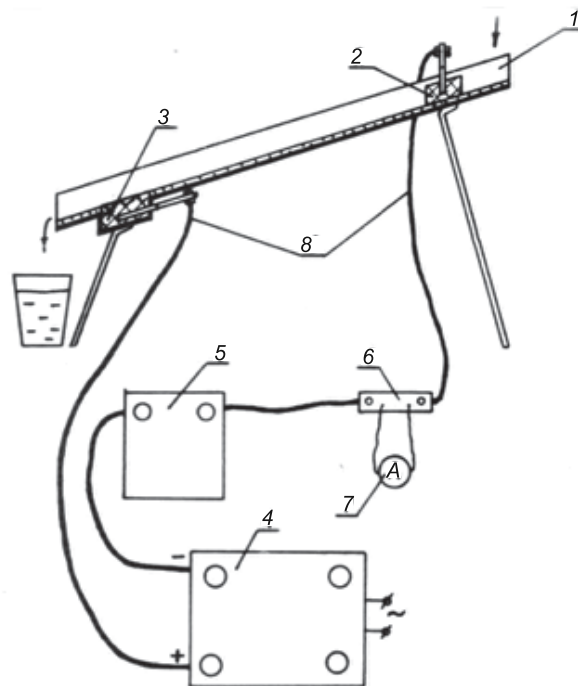


Рис. 1. Схема лабораторной установки для обработки потока расплава электрическим током на желобе: 1 – стальной футерованный желоб; 2 – графитовый электрод (катод); 3 – графитовый электрод (анод); 4 – выпрямитель сварочный; 5 – реостат балластный; 6 – внешний шунт; 7 – амперметр; 8 – токоподводящие кабели

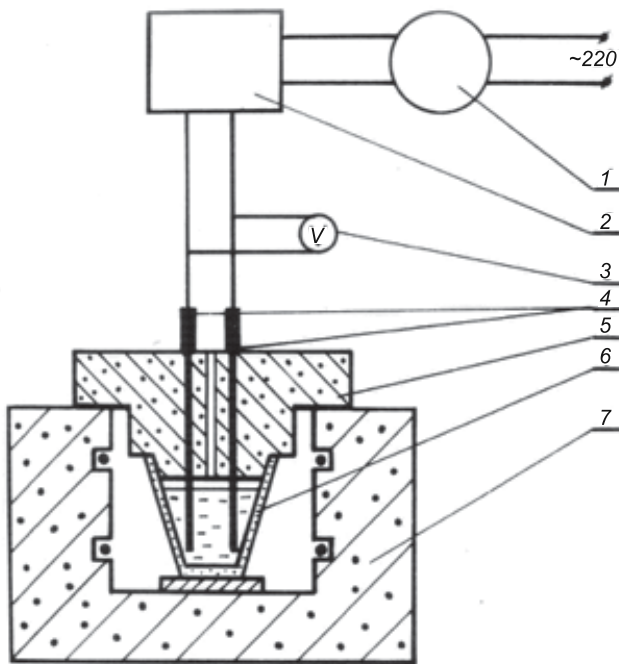


Рис. 2. Схема лабораторной установки для обработки расплава электрическим током в тигле: 1 – лабораторный трансформатор; 2 – выпрямитель ВСА-5К; 3 – вольтметр; 4 – графитовые электроды; 5 – шамотная крышка; 6 – тигель с расплавом; 7 – электропечь

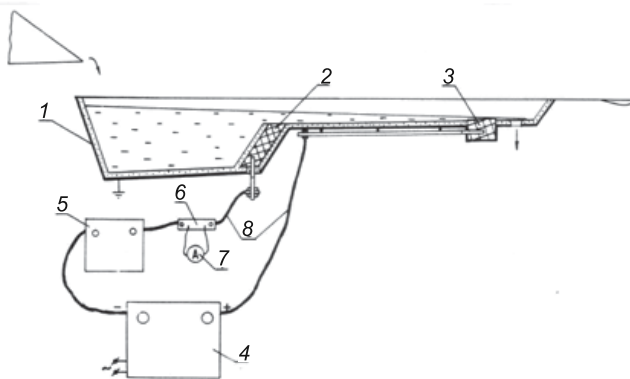


Рис. 3. Схема промышленной установки для обработки расплава электрическим током в процессе разлива: 1 – стальной футерованный желоб; 2 – графитовый электрод (катод); 3 – графитовый электрод (анод); 4 – выпрямитель сварочный; 5 – реостат балластный; 6 – внешний шунт; 7 – амперметр; 8 – токоподводящие кабели

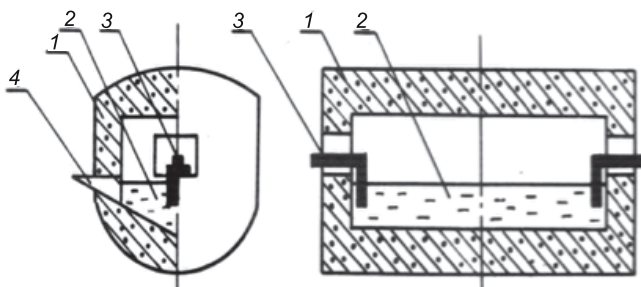


Рис. 4. Схема расположения электродов в печи: 1 – электропечь; 2 – расплав; 3 – графитовые электроды; 4 – летка

Величина силы электрического тока контролировалась амперметром (7) марки М2001. При обработке расплава переменным током использовали понижающий трансформатор переменного тока (4) с трансформатором тока марки ТНШЛ-0,6643 и амперметром П4650.

Эксперименты, моделирующие обработку расплава электрическим током в ковше, проводили на установке, представленной на рис. 2. Для получения постоянного тока использовали выпрямитель (2) марки ВСА5К со следующими параметрами: выпрямленное напряжение 0–65 В, выпрямленный ток 0–12 А. Металл плавил в электропечи (7) в тигле (6) из шамота – материала футеровок печей и ковшей. Тигель закрывали крышкой (5) с отверстиями для термопары и графитовых электродов (4) диаметром 10 мм.

Опытно-промышленные испытания проводили на Запорожском алюминиевом комбинате. Вариант установки для обработки расплава электрическим током в процессе разлива (рис. 3) представляет собой футерованный желоб (1) с электродами (2, 3), связанными токоподводящими кабелями (8) с источником тока (4), который размещается между леткой нагревательной печи и изложницами. Графитовые электроды в виде пластин установлены в донной части желоба. Со стороны летки нагревательной печи желоб выполнен в виде кармана-накопителя, который плавно сочленен с остальной частью желоба в виде зауженного носка. Желоб закреплен шарнирно с возможностью поворота в горизонтальной плоскости на угол 0–25°. Установка проста в эксплуатации и позволяет варьировать плотность электрического тока в широком диапазоне. Также эксперименты по дегазации расплава электрическим током осуществляли в ковше и непосредственно в раздаточной печи (рис. 4).

Плотность тока, проходящего через расплав, движущийся по желобу (см. рис. 1, 3), рассчитывали как отношение величины силы тока к площади поперечного сечения потока металла. В стационарных условиях (тигель, ковш, печь) – отношением величины силы тока к площади сечения расплава, ограниченной электродами (см. рис. 2, 4).

Содержание водорода в металле определяли методом первого газового пузырька (ГОСТ 21132.0). Степень дегазации (δ) рассчитывали по выражению: $\delta = [(c_0 - c_k)/c_0] \cdot 100 \%$, где c_0 и c_k соответственно концентрация газа до и после дегазации.

Экспериментальные результаты. Моделирование процесса дегазации электрическим током в ковше осуществляли на установке, представленной на рис. 2. Исследование проведено на расплаве алюминия марки А7 с содержанием примесей, %мас.: Fe – 0,16–0,20; Si – 0,13–0,15; Cu – 0,004–0,007; Ti – 0,005–0,07, при температурах 725 и 800 °С.

Степень дегазации расплава алюминия как функция плотности постоянного тока описывается экстремальной зависимостью (рис. 5, а). Наиболее высокая степень удаления водорода при обработке током плотностью 11–14 кА/м². Снижение температуры расплава с 800 °С (2) до 725 °С (1) повышает эффективность дегазации (см. рис. 5, а).

Исследование влияния времени обработки расплава электрическим током (τ) на степень дегазации (δ) алюминия проводили при оптимальной плотности тока 13 кА/м² (рис. 5, б). Характер функциональных зависимостей $\delta = f(\tau)$ при температурах 800 и 725 °С одинаковый. Они свидетельствуют о нецелесообразности увеличения времени обработки расплава свыше 15 мин при величине плотности тока 11–14 кА/м².

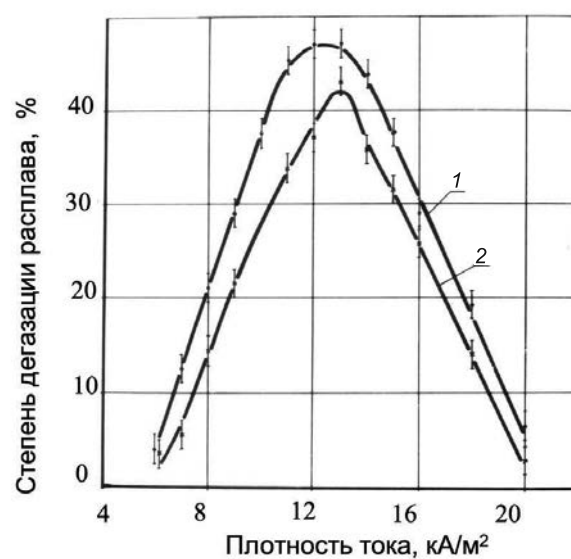
Для экспериментальной проверки полученных результатов в условиях электролизного цеха Запорожского алюминиевого комбината была осуществлена дегазация расплава алюминия в ковше. Результаты, представленные на рис. 6, хорошо коррелируют с данными, полученными в лабораторном эксперименте: увеличение плотности тока свыше 14 кА/м² снижает эффект дегазации постоянным электрическим током. При дегазации алюминия в ковше по режимам: $t = 780\text{--}810$ °С, $I = 650$ А ($j = 13$ кА/м²), $\tau = 15$ мин, газосодержание понижалось с 0,37–0,28 см³/100 г до 0,22–0,17 см³/100 г. Однако, после перелива расплава из ковша в раздаточную печь, что предусмотрено технологическим процессом, оно резко повышалось до 0,26–0,38 см³/100 г. Последнее связано с увеличением площади контакта зеркала металла с воздухом, нарушением сплошности окисной пленки, замешиванием ее в расплав.

Поэтому следующий этап исследований заключался в определении технологических режимов обработки расплава током в раздаточной печи. Опыты проводили в электрической печи типа И6 мощностью 400 кВт. Вес плавки составлял 7,040 т. Схема расположения электродов приведена на рис. 4. Площадь сечения расплава между электродами составляла 7×10^{-2} м². Для очистки расплава от взвеси твердых неметаллических включений перед пропуском электрического тока он отстаивался в печи в течение 30 мин.

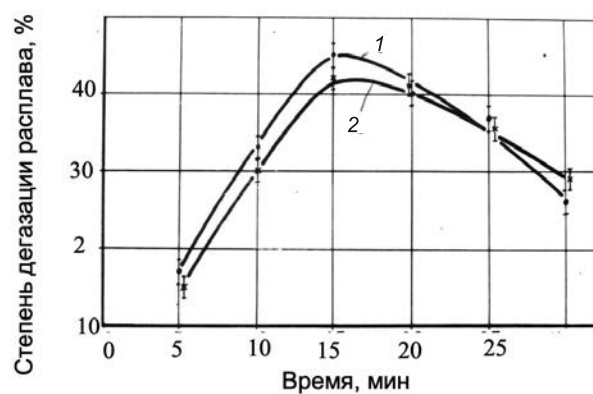
Обработку расплава постоянным электрическим током осуществляли после снятия шлака при температуре 690 ± 5 °С. Величина тока составляла 825 А (плотность 11,2 кА/м²), общее время пропускания тока через расплав – 120 мин. Пробы отбирали у анода на глубине 200 мм от поверхности расплава через каждые 10–20 мин. Наиболее интенсивное удаление водорода происходит в первые 10–15 мин. Увеличение времени обработки свыше 60–90 мин (рис. 7, а) приводит к повторному насыщению металла газами печной атмосферы.

Аналогичная зависимость имеет место и для расплава АК12М2МгН (рис. 7, б). Полученные результаты коррелируют с данными работ [4–7], в которых приведено изменение газосодержания расплава алюминия [4], пористости отливок из сплава АЛ9 [7] в зависимости от продолжительности пропускания электрического тока через жидкую ванну. Поскольку в процессе разлива расплав длительное время находится в печи – от 2 до 6 часов, изучали влияние этого фактора на изменение эффекта дегазации после воздействия на жидкий металл постоянного электрического тока. Пробы отбирали у анода. Результаты изменения газосодержания алюминия в за-

висимости от времени выдержки в жидком состоянии после отключения электрического тока представлены на рис. 8. На приведенных зависимостях можно



а



б

Рис. 5. Зависимость степени дегазации расплава алюминия от плотности постоянного электрического тока (а) и времени обработки (б): 1 – температура 725 °С; 2 – температура 800 °С (лабораторный эксперимент)

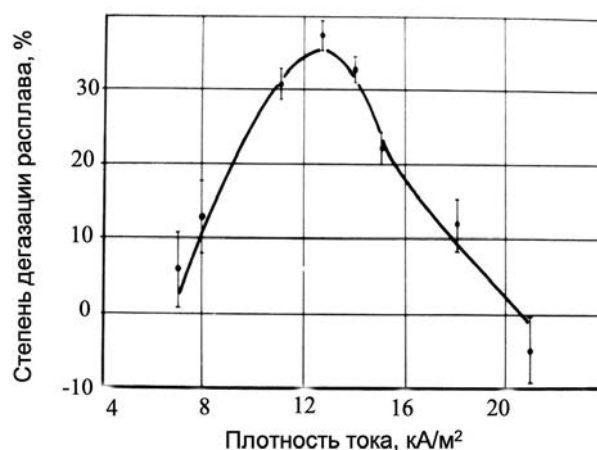
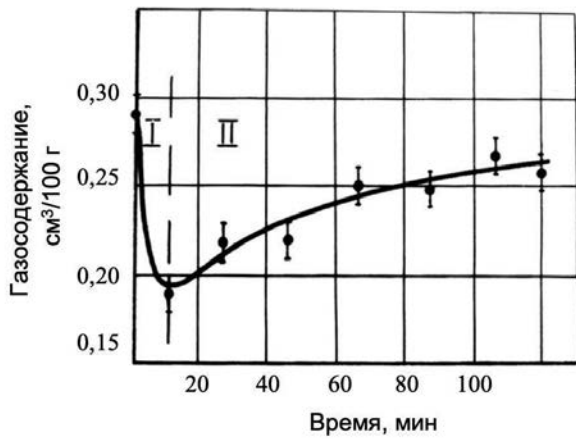
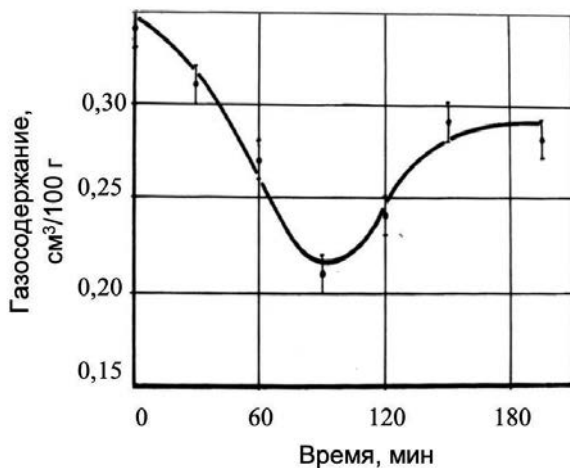


Рис. 6. Зависимость степени дегазации расплава алюминия от плотности постоянного электрического тока в промышленных условиях, в ковше



а



б

Рис. 7. Зависимость газосодержания в алюминии (а) и сплаве АК12М2МгН (б) от времени обработки расплава постоянным электрическим током в промышленных печах: а – электрическая печь типа ИБ; б – печь с газопламенным нагревом

выделить два участка: снижения и повышения содержания газа в расплаве. Наиболее высокая степень дегазации наблюдается в течение 5–20 мин после отключения тока. Можно считать, что за этот период процесс всплывания газовых пузырьков завершается. При выдержке металла в жидком состоянии свыше указанного времени происходит его повторное насыщение газами печной атмосферы. Аналогичный эффект имеет место и после дегазации расплавов гексахлорэтаном, аргоном.

Следовательно, дегазированный расплав обладает повышенной способностью к поглощению газа из окружающей среды. Учитывая это, исследовали возможность дегазации расплава электрическим током на желобе в процессе разлива.

Опыты проводили на устройстве, схема которого приведена на рис. 3, при температуре 725 ± 5 °С. Площадь поперечного сечения потока расплава не превышала 2 см². Величину силы тока варьировали в пределах 2,0–500 А – для постоянного тока и 5,0–1000 А – для переменного. Время обработки составляло 8–20 с. Данные о степени дегазации расплава алюминия на желобе в зависимости от величины плотности постоянного тока приведены на рис. 9.

Установлено, что дегазация осуществляется не при всех режимах электрического тока. При некоторых из них происходит насыщение расплава газами (см. рис. 9). Поэтому для получения качественного металла плотность тока (j) не должна превышать 50 кА/м² ($\ln j = 2,3$). Оптимальная – 5,0–20 кА/м² ($\ln j = -0,69$ –0,69).

Зависимость $\delta = f(j)$, полученная для сплава АК12М2МгН, качественно совпадает с аналогичной зависимостью для алюминия. Отличия заключаются в некотором увеличении диапазона плотностей тока, обеспечивающих дегазацию. Последнее, как будет показано далее, связано с влиянием легирующих элементов. Снижение газосодержания наблюдается и при обработке расплава переменным электрическим током. Однако плотность тока должна быть в 2–4 раза большей.

Таким образом, проведенный комплекс лабораторных и промышленных исследований показал, что экологически безопасный способ дегазации расплавов электрическим током на желобе является эффективным и технологичным, позволяет получать стабильно низкий уровень газосодержания в отливке.

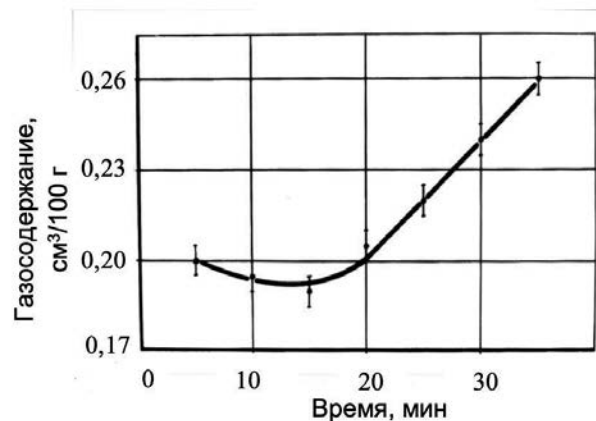
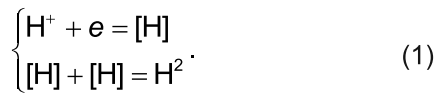


Рис. 8. Зависимость газосодержания в алюминии от времени выдержки расплава в печи после обработки постоянным электрическим током



Рис. 9. Зависимость степени дегазации алюминия от плотности электрического тока при обработке потока расплава на желобе в процессе разлива в условиях промышленного производства

Механизм дегазации расплавов электрическим током. Теоретические аспекты дегазации расплавов электрическим током приведены в работах [4–10]. Принципиальных отличий в подходах к объяснению дегазации алюминиевых расплавов электрическим током в указанных работах не отмечается. При обсуждении возможных форм существования водорода в жидких металлических системах авторы работы [8] предполагают наличие ионов H^- и H^+ . О преимущественной ионизации водорода H^+ , растворенного в расплавах, указывается и в монографии [11, с. 461]. В соответствии с представлениями, изложенными в работах [4–8], механизм дегазации заключается в перемещении заряженных ионов в электрическом поле с последующим восстановлением их на электроде по схеме:



На основании того факта, что водород скапливается в районе катода, а на аноде, соответственно, наблюдается уменьшение его концентрации, сделан вывод о существовании водорода в расплаве в виде протонов.

В настоящей работе проведена количественная оценка указанной гипотезы. Согласно современным представлениям [12, 13], величина и направление электропереноса атомов i -го сорта определяются значением эффективного заряда иона:

$$Z_{эф} = Z_i - Z_{cp} \cdot \frac{\sigma_i}{\sigma_{cp}}, \quad (2)$$

где σ_i – сечение рассеяния иона i -го сорта; Z_i – заряд иона i -го сорта, выраженный в единицах заряда электрона; Z_{cp} , σ_{cp} – средние значения заряда и сечения рассеяния всех компонентов.

Оценка эффективного заряда протона на основе выражения (2) показала, что значение $Z_{эфH^+}$ практически не отличается от Z_{H^+} , что является следствием малой величины его площади рассеивания ($\sigma_{H^+} \approx 1,53 \cdot 10^{-22} \text{ м}^2$).

Таким образом, сила электронного ветра, направленная к аноду, не оказывает влияния на движения ионов. Знание величины $Z_{эф}$ позволяет воспользоваться решением уравнения электропереноса [13]:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 c}{\partial \varepsilon^2} - S \frac{\partial c}{\partial \varepsilon} \quad (3)$$

с граничными и начальными условиями:

$$\left. \frac{\partial c}{\partial \varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} = S_c; \quad \left. \frac{\partial c}{\partial \varepsilon} \right|_{\varepsilon=L} = S_c; \quad c(\varepsilon; 0) = 1, \quad (3a)$$

которое имеет вид:

$$c(\varepsilon, \tau) = \frac{S e^{S\varepsilon}}{e^S - 1} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\pi n p^2}{(p^2 + n^2 \pi^2)^2} (1 - e^p (-1)^n) \times \exp(p\varepsilon - (p^2 + n^2 \pi^2)\tau) \cdot \left(\sin n\pi\varepsilon + \frac{\pi n}{p} \cos n\pi\varepsilon \right); \quad (4)$$

$$S = \frac{E e Z_{эф}}{k_6 T}; \quad p = \frac{S}{2}; \quad \tau = \frac{D_0 t}{L^2}; \quad \varepsilon = \frac{l}{L}; \quad c = \frac{c_v}{c_{v_0}};$$

где

E – напряженность электрического поля в проводнике; T – температура расплава; D_0 – коэффициент диффузии; t – время процесса; l – расстояние между анодом и исследуемой точкой; L – расстояние между анодом и катодом; c_v , c_{v_0} – текущее и начальное значение объемной концентрации i -го компонента.

Граничные условия (3a) предусматривают отсутствие взаимодействия расплава с окружающей средой. Для оценки степени дегазации (δ) с использованием выражения (4) привлечен экспериментальный материал по обработке электрическим током расплавов алюминия и сплавов на его основе, наиболее полно представленный в работе [8], а также результаты собственных аналогичных исследований, приведенных в данной публикации. Теоретическое значение δ определяли для процессов, проходящих на аноде ($\varepsilon = 0$), где согласно формуле (4), степень дегазации должна быть наибольшей. В расчетах с применением результатов работы [8] использованы максимальные значения величины плотности тока и времени обработки. Результаты экспериментальных и теоретических исследований приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, сопоставление экспериментальных и теоретических значений δ свидетельствует о существенном их различии. Расхождения между теоретическими и экспериментальными величинами будут еще более существенными, если в выражение (4) ввести значение эффективного коэффициента диффузии:

$$D_{эф} = D_o + D_k, \quad (5)$$

где D_o – молекулярный коэффициент диффузии; D_k – конвективный коэффициент диффузии.

Но даже без учета уравнения (5), теоретическое значение абсолютной величины степени дегазации находится в пределах ошибки метода измерения концентрации водорода в расплаве.

Следует отметить, что граничные условия (3a) не являются достаточно конкретными, так как на катоде, в свете представлений [8], некоторая часть ионов водорода восстанавливается до газообразного состояния (см. выражение (1)) и удаляется из расплава. Однако, экспериментальные результаты [8], свидетельствующие о значительном скоплении водорода в районе катода и симметричном характере его распределения между катодом и анодом, хотя полностью и не исключают возможность восстановления и удаления водорода, указывает на то, что перенос ионов H^+ не лимитирует процесс (1). И количество водорода, выделяющееся на катоде, не может быть значительным. Таким образом, результаты расчета по уравнению (4) можно считать достоверными, а, следовательно, перераспределение водорода и дегазация расплавов не связаны с движением ионов H^+ в электрическом поле.

Прямое подтверждением недостаточной обоснованности гипотезы о дегазации расплавов за счет электропереноса ионов H^+ является проведенный нами эксперимент по пропусканию через расплав

Экспериментальные и теоретические значения степени дегазации расплава при различных режимах обработки электрическим током

Плотность тока	Время обработки	Температура расплава	Степень дегазации δ , %	
			экспериментальная	теоретическая (4)
$j(\frac{A}{M^2}) \cdot 10^{-4}$	t , с	T , К		
0,5–1,7	1200–3600	1003	28–30 [8]	0,9
10	600	963	37,5	1,2

переменного тока. При этом также отмечается понижение содержания водорода, но при более высоких плотностях тока.

Результаты экспериментов обязывают обратить внимание на то, что электроперенос приводит к существенному перераспределению примесей, присутствующих в расплаве алюминия. Расчеты показывают, что для алюминия марки А7 (Fe – 0,2 %, Si – 0,14 %, Cu – 0,005 %, Ti – 0,06 %) воздействие электрического тока ($E = 0,08$ В/м, $t = 300$ с) вызывает увеличение содержания примесей на катоде (Fe – 2,3 %, Si – 1,0 %, Cu – 0,046 %, Ti = 0,13 %). В связи с тем, что растворимость водорода зависит от содержания примесей в расплаве, можно предположить, что перераспределение водорода между электродами является функцией химического состава расплава, определяемое электропереносом ионов соответствующих примесей.

Полученные данные об уменьшении содержания водорода в расплаве после длительного отстоя, а также анализ распределения водорода в алюминии до пропускания электрического тока [8, с. 115], согласуются с общим мнением о том, что количество водорода, внесенное шихтовыми материалами в процессе плавки, значительно превосходит величину равновесной растворимости при соответствующих температурах и давлении водорода в газовой фазе.

Если встать на точку зрения авторов [4, 5, 8], что механизм дегазации расплава при обработке его постоянным электрическим током связан с электропереносом и накоплением водорода на катоде, то степень извлечения водорода должна быть пропорциональна продолжительности обработки. Но экспериментально это не подтверждается. Прекращение выделения водорода при сохранении значительного его количества в расплаве [8, с. 103] свидетельствует, вместе с изложенным выше, о существенном влиянии на состояние системы внешних условий. Об этом же говорят и результаты опытов по совместной обработке расплава электрическим током и вакуумированием [7, 14], то есть при условии значительного уменьшения парциального давления водорода над зеркалом расплава. Степень дегазации расплава в этом случае наибольшая. Следовательно, принятое при постановке задачи (3), (3а) условие о нейтральности окружающей среды $\frac{\partial c}{\partial y} = 0$ не соответствует действительности. Более того, согласно выражению (5), массоперенос на границе раздела расплав – воздух должен возрасти. Учесть все факторы, влияющие

на дегазацию в промышленных условиях, при моделировании процесса в лабораторных экспериментах весьма затруднительно. Поэтому для дальнейших рассуждений использованы данные по воздействию электрического тока на расплавы алюминия, полученные непосредственно в условиях Запорожского алюминиевого комбината при дегазации: а) непосредственно в раздаточной печи (см. рис. 7); б) в ковше (см. рис. 6); в) на желобе в процессе разлива (см. рис. 9). В последнем случае в связи с малым временем обработки (8–20 с) перераспределение примесей исключается, что позволяет сформулировать однородные граничные условия при рассмотрении массообмена между расплавом и окружающей средой:

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} = D_{\text{эф}} \frac{\partial^2 c_v}{\partial x^2} \quad (6)$$

с начальными и граничными условиями третьего рода:

$$c_v(x)|_{t=0} = c_{v0}; \left. \frac{\partial c_v}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; D_{\text{эф}} \left. \frac{\partial c_v}{\partial x} \right|_{x=d} = \beta(c_v(x,t)|_{x=d} - c_v^H), \quad (6a)$$

где c_v^H – объемная концентрация водорода в окружающей среде; $c_{v0}(x, t)$ – объемная концентрация водорода в расплаве; β – коэффициент массоотдачи; d – толщина слоя металла.

Обезразмерив физические величины в уравнении (6):

$$c = \frac{c_v - c_v^H}{c_{v0} - c_v^H}; \Theta = \frac{x}{d}; F_{0g} = \frac{Dt}{d^2}; B_{ig} = \frac{\beta d}{D_{\text{эф}}},$$

получим:

$$\frac{\partial c}{\partial F_{0g}} = \frac{\partial^2 c}{\partial \Theta^2} \quad (7)$$

с однородными граничными условиями:

$$\left. \frac{\partial c}{\partial \Theta} \right|_{\Theta=0} = 0; \left(\frac{1}{B_{ig}} \cdot \frac{\partial c}{\partial \Theta} - c \right) \Big|_{\Theta=1} = 0. \quad (7a)$$

Решение задачи (7), (7а) получено методом конечных интегральных преобразований и имеет вид:

$$c = 4 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin \lambda_n \Theta}{2\lambda_n + \sin 2\lambda_n} \cos \lambda_n \Theta e^{-\lambda_n F_{0g}}, \quad (8)$$

где значение λ_n определяем из решения трансцендентного уравнения:

$$\lambda_n \operatorname{tg} \lambda_n = -Bi_g. \quad (9)$$

Коэффициент массоотдачи находим, исходя из значения критерия Нуссельта:

$$Nu_g = \frac{\beta R}{D_H^{\Gamma}}, \quad (10)$$

где R – характеристический размер; D_H^{Γ} – коэффициент диффузии водорода в воздухе, связанный с соотношением:

$$Nu_g = (Gr_g \cdot Pr_g)^k \cdot B. \quad (11)$$

Значение коэффициента Прандтля для воздуха $Pr = 0,714$ [15], а критерий Грессгофа вычисляется по формуле:

$$Gr_t = \frac{\alpha \cdot g \cdot R^3 (T_n - T_c)}{\nu^2} \quad (12)$$

где α – коэффициент температурного расширения; g – ускорение свободного падения; T_n, T_c – температуры поверхности расплава и среды; ν – кинематическая вязкость воздуха.

Правомочность использования значения Gr_t , полученного для теплопереноса (12) для нахождения β , определяется тем, что температурный градиент имеет более высокое значение, чем концентрационный (Gr_g), и, следовательно, удаление водорода от поверхности осуществляется тепловыми потоками. Исходя из значения произведения $(GrPr) = 4,44 \times 10^{14}$, устанавливаем, согласно [15], что уравнение (11) имеет вид:

$$Nu_g = (GrPr)^{1/3} \cdot 0,135 \quad (13)$$

Для определения концентрации водорода в среде c_v^H (см. выражение 6а) была решена обратная задача для случая выдерживания расплава в печи без воз-

действия электрического тока. Для вычисления значения $D_{\text{эф}}$, согласно (5), воспользовались эмпирической зависимостью, обнаруженной авторами работы [13, с. 235]:

$$D_k = A \cdot E^2 \cdot d^5 \quad (14)$$

где d – диаметр капилляра (струи); A – константа; E – напряженность электрического поля.

Установлено, что коэффициент A (14) для металлов незначительно зависит от сорта атомов и является функцией геометрических размеров устройства для дегазации [12, с. 151]. Если допустить, что водород в одинаковой степени подвержен электроконвекции, как и ионы металла, то для случая обработки расплавов электрическим током на желобе можно принять $A = 2,0 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{А}^2 \cdot \text{с}$ [12, с. 236]. Некоторые результаты расчета по формуле (8) приведены в табл. 2.

Сопоставление экспериментальных и теоретических значений говорит о правомочности механизма дегазации расплава, описываемого дифференциальными уравнением (6), (6а), характеризующим массообмен между окружающей средой и расплавом. При увеличении времени обработки расплавов электрическим током, как было показано ранее, осуществляется электроперенос примесей, сопровождающийся перераспределением водорода. Поэтому процесс дегазации расплава электрическим током, осуществляемый в печи ($t \gg 20 \text{ с}$), не может описываться уравнением (6), (6а), так как при этом граничные условия (6а) принимают вид:

$$\left. \frac{\partial c_v}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial c_v}{\partial x} \right|_{x=d} = \beta (c_v(x, l, t) \Big|_{x=d} - c_v^H), \quad (15)$$

где значение $c_v(x, l, t) \Big|_{x=d}$ определяется электропереносом примесей. Получить решение задачи (6) с граничными условиями (15) невозможно в связи с отсутствием зависимости между растворимостью водорода и содержанием в расплаве ионов Fe, Si, Cu, Ti и др.

Процесс массообмена водорода между расплавом и окружающей средой более динамичен, чем электроперенос примесей, о чем свидетельствуют экспериментальные результаты, приведенные в табл. 1 и 2. Поэтому при обработке расплавов электрическим током в печи первоначально преобладают процессы массообмена, описываемые уравнениями (6), (6а) $c_v(x, l, t) \Big|_{x=d} \approx c_v(x, t) \Big|_{x=d}$; в дальнейшем следует ожидать изменения величины $c_v(x, l, t) \Big|_{x=d}$ так, что

Таблица 2

Изменение содержания водорода в расплаве, обработанном электрическим током на желобе

Плотность тока, j , А/м ²	Время обработки, t , с	Температура расплава, T , К	Экспериментальные значения концентрации водорода		Рассчитанные значения концентрации водорода после обработки, согласно выражению (8)
			исходные	после обработки	
$0,7 \times 10^4$	20	963	0,320	0,270	0,280
$1,4 \times 10^4$	20	963	0,300	0,240	0,248

$c_v(x, l, t)|_{x=d} \neq c_v(x, t)|_{x=d}$. Причем на отдельных участках межэлектродного пространства может выполняться неравенство $c_v(x, l, t)|_{x=d} < c_v^H$, что должно приводить к процессу, обратному дегазации – насыщению расплава водородом.

Подтверждением сказанному служит экспериментальная зависимость изменения содержания водорода в расплаве от времени обработки электрическим током (см. рис. 7). Аналогичный характер носит и зависимость $\delta = \oint(j)$, приведенная на рис. 6. Наличие экстремума в этом случае объясняется возрастанием эффективности электропереноса примесей при увеличении плотности тока (см. выражение (4)). Следовательно, повышение плотности электрического тока ($t = \text{const} \gg 20$ с) равнозначно, как и увеличение времени обработки расплава электрическим током при $j = \text{const}$, сказывается на процессе дегазации

Выводы

Определены режимы обработки алюминиевых расплавов электрическим током, способствующие экстракции водорода. Установлено, что степень их дегазации как функция от плотности тока описывается экстремальной зависимостью. Точке экстремума соответствует максимальная степень дегазации. Удаление водорода из расплава наблюдается как при постоянном, так и переменном токе. В последнем случае величина плотности электрического тока должна быть в 2–4 раза большей.

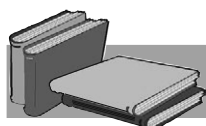
С увеличением температуры степень дегазации расплава снижается. При длительных выдержках в жидком состоянии дегазированный электрическим током расплав вновь насыщается водородом.

Показано, что по наличию эффекта дегазации в расплавах алюминия при воздействии на него постоянного электрического тока обсуждать вопросы степени ионизации водорода в металлах не представляется возможным. Направленное движение ионов H^+ под действием электрического тока не вносит существенный вклад в дегазацию расплава в области рассмотренных температурно-временных интервалов.

Наблюдаемое перераспределение водорода между анодом и катодом при длительном воздействии электрического тока на расплав, находящийся в стационарных емкостях (печи, ковше), в основном зависит от электропереноса примесей, изменения химического состава расплава у электродов и, следовательно, предельной растворимости водорода.

Важную роль в механизме дегазации расплавов электрическим током играет массообмен между расплавом и окружающей средой, усиливающийся вследствие возникновения электроконвекционных потоков, приводящих к увеличению скорости диффузии водорода в 10–15 раз.

Наиболее стабильной и значительной является дегазация расплава электрическим током на желобе в процессе разлива. Электроперенос примесей в этом случае ($t < 20$ с) значимого влияния на дегазацию не оказывает. Она осуществляется за счет возникновения электроконвекционных потоков, приводящих к увеличению скорости массообмена с окружающей средой, в которой парциальное давление водорода должно быть значимо меньшим. В ином случае процесс дегазации сменяется насыщением.

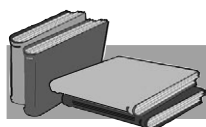


ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров Г.С. Рафинирование алюминиевых сплавов газами. – М.: Металлургия, 1983. – 120 с.
2. Альтман М.Б., Глотов Е.Б., Засыпкин В.А., Макаров Г.С. Вакуумирование алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1977. – 240 с.
3. Эскин Г.И., Швецов П.И. Анализ эффективности процессов ультразвуковой дегазации расплава при непрерывном литье слитков алюминиевых сплавов // *Металловедение и литье легких сплавов*. – М.: Металлургия, 1977. – С. 17–31.
4. Явойский В.И., Баталин Г.И. Удаление водорода из металлов в электрическом поле // *Сталь*. – 1954. – № 6. – С. 487–494.
5. Ловцов Д.П. Поведение водорода в металлах под влиянием постоянного тока // *Литейное производство*. – 1955. – № 9. – С. 15–19.
6. Коротков В.Г. Дегазация алюминиевых сплавов постоянным током при атмосферном давлении // *Литейное производство*. – 1956. – № 12. – С. 20–22.
7. Коротков В.Г. Дегазация алюминиевых сплавов постоянным током при пониженном давлении // *Литейное производство*. – 1957. – № 2. – С. 20–22.
8. Чернега Д.Ф., Бялик О.М., Иванчук Д.Ф., Ремизов Г.А. Газы в цветных металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.
9. Килин А.Б. Влияние электрического тока на дегазацию и модифицирование алюминиевых сплавов // *Литейное производство*. – 2002. – № 8. – С. 21–22.
10. Якимов В.И., Марьин Б.Н., Зелинский В.В. и др. Воздействие электрического тока на жидкий алюминиевый сплав // *Металлургия машиностроения*. – 2003. – № 3. – С. 36–39.
11. Водород в металлах / Под ред. А.А. Алефельда, И. Фелькля: Пер. с англ. Т.1. Основные свойства. – М.: Мир, 1981. – 224 с.
12. Харьков Е.И., Лысов В.И., Федоров В.Е. Физика жидких металлов. – К.: Вища школа, 1979. – 248 с.

13. Михайлов В.А., Богданова Д.Д. Электроперенос в жидких металлах. – Новосибирск: Наука, 1978. – 224 с.
14. Матысик В.А., Якимов В.И., Харунжин А.А. Рафинирование алюминиевых сплавов внутренним вакуумированием и постоянным током // *Литейное производство*. – 1979. – № 9. – С. 33.
15. Лыков А.В. Теплообмен: справочник. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.

Поступила 16.10.2018



REFERENCES

1. Makarov, G.S. (1983). Refining aluminum alloys with gases. Moscow: Metallurgiya, 120 p. [in Russian].
2. Al'tman, M.B, Glotov, E.B, Zasyrkin, V.A, Makarov, G.S. (1977). The vacuuming of aluminum alloys. Moscow: Metallurgiya, 240 p. [in Russian].
3. Eskin, G.I., Shvetsov, P.I. (1977). Analysis of the effectiveness of the processes of ultrasonic degassing of the melt during continuous casting of ingots of aluminum alloys. *Metallography and casting of light alloys*. Moscow: Metallurgiya, pp. 17–31 [in Russian].
4. Yavoisky, V.I., Batalin, G.I. (1954). Removal of hydrogen from metals in an electric field. *Steel*, no. 6. pp. 487–494 [in Russian].
5. Lovtsov, D.P. (1955). The behavior of hydrogen in metals under the influence of direct current. *Foundry*, no. 9, pp. 15–19 [in Russian].
6. Korotkov, V.G. (1956). Degassing of aluminum alloys with direct current at atmospheric pressure. *Foundry*, no. 12, pp. 20–22 [in Russian].
7. Korotkov, V.G. (1957). Degassing of aluminum alloys with direct current under reduced pressure. *Foundry*, no. 2, pp. 20–22 [in Russian].
8. Chernega, D.F., Bialik, O.M., Ivanchuk, D.F., Remizov, G.A. (1982). Gases in non-ferrous metals and alloys. Moscow: Metallurgiya, 176 p. [in Russian].
9. Kilin, A.B. (2002). Effect of electric current on the degassing and modification of aluminum alloys. *Foundry*, no. 8, pp. 21–22 [in Russian].
10. Yakimov, V.I., Mar'in, B.N., Zelinsky, V.V. et al. (2003). Effect of electric current on liquid aluminum alloy. *Metallurgy of mechanical engineering*, no. 3, pp. 36–39 [in Russian].
11. Hydrogen in metals. Under the editorship of A.A. Alefel'd, I. Fel'kl: trans. from English. Vol. 1. Basic properties. Moscow: Mir, 1981, 224 p. [in Russian].
12. Khar'kov, E.I., Lysov, V.I., Fedorov, V.E. (1979). Physics of liquid metals. K.: Vyshcha shkola, 248 p. [in Russian].
13. Mikhailov, V.A., Bogdanova, D.D. (1978). Electric transport in liquid metals. Novosibirsk: Nauka, 224 p. [in Russian].
14. Matysik, V.A., Yakimov, V.I., Kharunzhin, A.A. (1979). Refining of aluminum alloys by internal vacuum and direct current. *Foundry*, no. 9, P. 33 [in Russian].
15. Lykov, A.V. (1971). Heat and mass transfer: handbook. Moscow: Energiya, 560 p. [in Russian].

Received 16.10.2018

Анотація

А.Г. Пригунова, д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу,
e-mail: adel_nayka@ukr.net

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України,
Київ, Україна*

Дегазація алюмінієвих розплавів електричним струмом

Досліджено вплив параметрів оброблення алюмінієвих розплавів електричним струмом на процес дегазації в стаціонарних умовах (ківш, піч) і в потоці при розливанні. Розглянуто механізм дегазації. Встановлено, що спрямований рух і перерозподіл іонів H^+ між анодом і катодом під дією постійного електричного струму не роблять істотного внеску до дегазації. Значущими факторами видалення водню з розплаву при пропущенні електричного струму є електроперенос іонів домішок і збільшення швидкості масообміну водню між розплавом і навколишнім середовищем, в якому парціальний тиск водню має бути значно меншим.

Ключові слова

Алюмінієві розплави, вміст газу, ступінь дегазації, електричний струм.

Summary

A.G. Prigunova, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Head of Department, e-mail: adel_nayka@ukr.net

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Degassing of aluminum melts by electric current

The influence of the parameters of melts processing of aluminum and its alloys by electric current on the degassing process in stationary conditions (ladle, furnace) and in the stream during casting was investigated. The degassing mechanism is considered. It has been established that the directional movement and redistribution of H^+ ions between the anode and cathode under the influence of direct electric current does not make a significant contribution to the degassing process. Significant factors for the removal of hydrogen from the melt by passing electric current are the electrical transfer of impurity ions and the increase in the mass transfer rate of hydrogen between the melt and the environment, in which the partial pressure of hydrogen should be significantly lower.

Keywords

Aluminum melts, gas content, degree of degassing, electric current.