

Г.С. Пестова

ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФТОРИДА БЕРИЛЛИЯ МАГНИЕМ.  
ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ШИХТЫ ИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДИССОЦИАЦИИ СВЯЗЕЙ МОЛЕКУЛ.  
ДИФФУЗИЯ РЕАГЕНТОВ  
Часть I

В металлургии термических реакций одна из экономически эффективных и экологически безопасных технологий, как известно, – это применение гранулированной шихты в восстановительной плавке. Основным показателем качества восстановительной реакции является степень восстановления металла  $g$ , которая, в свою очередь, зависит от продолжительности реакции  $t$ , когда металл может загрязняться примесями, вступать в реакцию с окислителем. В зависимости от состава шихты, температурного режима, объема плавки, длительности реакции возможен ряд вариантов проведения реакции восстановления. Оценить качество варианта и выбрать оптимальный позволяет оптимизация процесса.

Условие оптимальности варианта достигается при минимуме выбранной целевой функции  $f(-g) = \min$  [1], которую в данном процессе составляет максимальная степень восстановления металла  $g$ . Показатель  $g$  зависит от параметров процесса восстановления: температуры, фракционного состава шихты, которые связаны закономерностями процесса восстановления, и формализовать его можно через размер гранулы как управляющий процессом параметр. В итоге задача оптимизации сводится к нахождению минимума целевой функции  $f[t_1, \dots, t_m] = \min$ , так как продолжительность реакции  $t$  непосредственно зависит от параметра  $d$ , который проще определить расчетом, чем значение  $g$ . То есть общую цель оптимизации – оптимальность процесса – решаем через локальную оптимизацию – находим оптимальный размерный интервал гранул.

Рассматривая закономерности термического восстановления фторида бериллия (ФБ) магнием: диссоциацию связей, диффузионный рост слоя шлака, можно составить целевую функцию параметра качества и оценить размерный интервал гранул ФБ и оптимальный вариант состава шихты. Кинетические параметры диффузии магния в гранулу, а фтора из гранулы ФБ можно оценить по имеющимся литературным данным – определить коэффициент зернограничной диффузии  $dD_b$  процесса, затем оценить продолжительность реакции и интервал оптимальных размеров гранул шихты.

*Диссоциация связей. Постановка задачи.* В технологии производства бериллия применяют в основном недозированную и неоднородную по грансоставу шихту – это куски ФБ и слитки магния. Выход бериллия порядка 55 – 58 %. По сравнению с этим результаты экспериментов по восстановлению гранулированного ФБ гранулированным магнием показывают выход бериллия 70,84 % в слиток [2]. Шихту в этих опытах составляли куски размером 100 мм и ниже, и она скорее измельченная, чем гранулированная. Производство гранулированной шихты для получения бериллия не составляет проблемы: задача грануляции расплава ФБ в принципе была решена с выполнением технического проекта [3]. Магний, гранулированный из расплава, производится в промышленности и широко применяется. Однако в производстве бериллия к магнию предъявляются высокие требования по чистоте. Это условие можно выполнить, если выбирать магний определенной чистоты в слитках и гранулировать слиток резанием [4].

Процесс восстановления происходит при большой разнице температур плавления магния и ФБ:  $\Delta T = 147$ , поэтому взаимодействие происходит между твердым ФБ и жидким магнием при относительно низких температурах 723-873 К с образованием продуктов ре-

акции в твердой фазе, разделение металлического бериллия и шлака происходит в жидких фазах при высоких температурах 1373-1573 К. Это позволяет определить крупность шихты из закономерностей механизма восстановления, когда ФБ представляет твердое тело. Для аналитического исследования оптимизации состава шихты имеются следующие основные данные: реакция начинается на границе двух твердых фаз при 450 °С и при 700 °С восстановление практически завершается; степень восстановления бериллия при этом может составлять порядка 95-96 %; в шлаке преобладают корольки металла размером от 10 до 0,5 мм [5].

ФБ как вещество с сетчатой структурой быстро диссоциирует при нагревании [6], на шихту действует практически только температурная нагрузка, и закономерность изменения долговечности  $\tau$  (с) гранулы ФБ как твердого тела от температуры  $T$  будет описываться формулой (1), как любых других твердых тел [7]:

$$\tau = \tau_0 \exp(U_0 / kT), \quad (1)$$

где  $\tau_0 \approx 10^{-13}$  с – предэкспоненциальный множитель;  $U_0$  – энергия активации разрыва межатомных связей в твердой грануле.

В результате теплового движения атомов с энергией  $kT$  (1) в грануле происходит разрыв связей [8]. Известно [7], что среднее время  $\tau_{\text{ФЛ}}$  между двумя последовательными кратковременными, порядка  $\tau_0 \approx 10^{-13}$  с, флуктуациями энергии  $E_{\text{ФЛ}}$  на данном атоме составляет:

$$\tau_{\text{ФЛ}} \approx \tau_a \exp(E_{\text{ФЛ}} / kT), \quad (2)$$

где  $\tau_a$  – период тепловых колебаний атома, порядка  $10^{-13}$  с, сохраняется практически для всех твердых тел и жидкостей в широком диапазоне температур. Выполнение условия  $E_{\text{ФЛ}} \geq U_0$  в уравнениях (1) и (2) приводит к разрыву связи.

Рассматриваем диссоциацию связей на цепочке атомов конечной длины, равной радиусу гранулы, с граничными условиями в виде  $\partial u / \partial n = 0$  при  $n = 0$  и  $n = N$ , где  $u$  – смещение атома,  $N$  – число атомов в цепочке. Скорость распространения тепловой волны в обычном кристалле составляет порядка  $10^3$  м/с [8]. Благодаря дискретной поверхности твердой гранулы тепловые колебания должны распространяться каждой частичкой поверхности по направлению к центру гранулы со скоростью звука. За время порядка

$t = \sum_0^N \tau_{\text{ФЛ}}$  практически через все  $N$  атомов цепочки, равной радиусу гранулы, пройдут

разрывные флуктуации. Гранула как твердое тело разрушится за время  $t \approx \tau_{\text{ФЛ}} \cdot N$ , где параметр  $t$  непосредственно связан с размером  $d$  гранулы через количество атомов  $N$ .

Определение оптимального размерного интервала гранул шихты из условий диссоциации связей и зернограничной диффузии магния и фтора в грануле ФБ при переходе вещества из твердого состояния в расплавленное, определение длительности реакции восстановления, образование целевой функции процесса металлотермического восстановления и из нахождения ее минимума определение размерного интервала гранул – все это составляет задачу данной работы.

*Методика исследования.* Объектом исследования выбираем частичку-гранулу ФБ в виде кубика объемом  $V$  и ребром в интервале от 1 до 29 мм. Число примитивных ячеек  $N_V$  в частице-грануле ФБ объемом в один моль соответствует числу  $N_A$ ; число связей из строения молекулы составляет  $N_{CB} = 2 \cdot N_V$ ; энергия разрыва одной связи в молекуле  $\text{BeF}_2$  может составить  $U_0 = 2,123 \cdot 10^{-18}$  Дж [9]. На длине цепочки, равной радиусу гранулы, считываем время диссоциации связей в зависимости от температуры нагревания. Из

уравнений (1) и (2) показатель экспоненты можно записать как отношение периодов:

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \frac{\tau_{\phi,Л}}{\tau_0} = \exp(X) = e^X. \quad (3)$$

Для энергии разрывной флуктуации  $U_0$  на одной ячейке, например при  $T = 723$  К, показатель экспоненты  $X$  в уравнении (3) равен:

$$X = \left( \frac{U_0}{kT} \right) = 212,67, \quad e^X = 5,362, \quad (4)$$

и время диссоциации (1) на одном атоме составит

$$\tau = \tau_0 \cdot 5,362 = 5,362 \cdot 10^{-13} \text{ с}. \quad (4a)$$

Расчетное время  $\tau$  разрыва связи на одной ячейке в интервале температур 723-1073 по (4) приводится в табл. 1, для гранулы время  $t$  равно сумме разрывных флуктуаций  $t \approx \tau_{\phi,Л} \cdot N$  (табл. 2).

Таблица 1

*Время  $\tau$  разрыва связи на одной ячейке*

T, К	723	773	873	973	1073
$\tau \cdot 10^{13}$ , с	5,362	5,297	5,175	5,067	4,966

Таблица 2

*Время  $t$  диссоциации гранулы  $BeF_2$*

d, мм	1	3	5	10	14	18	29
$N = d/2a$ ( $a = 4,72 \text{ \AA}$ [10])	$105 \cdot 10^4$	$318 \cdot 10^4$	$530 \cdot 10^4$	$1050 \cdot 10^4$	$1480 \cdot 10^4$	$1910 \cdot 10^4$	$3072 \cdot 10^4$
T, К	$t \cdot 10^7$ , с						
723	5,63	17,1	28,4	56,3	<b>79,4</b>	102,5	164,8
773	5,56	16,84	28,1	55,6	<b>78,4</b>	101,2	162,7
873	5,43	16,46	27,43	54,3	<b>76,6</b>	98,8	158,98
973	5,32	16,1	26,86	53,2	<b>75,0</b>	96,8	155,7
1073	5,21	15,8	26,3	52,1	<b>73,5</b>	94,9	152,6

Ряд металлов получают термическим восстановлением их солей и оксидов. Сравним разрыв связей ФБ, оксида хрома и тетрафторида урана.

В оксиде хрома исследуемый температурный интервал диссоциации 933, 1033, 1133, 1233, 1370 К выбран из [11, 12]; фракционный состав оксида хрома:  $d = 0,1 - 2,0$  мм – из источника [11, табл. 17]. Энергия разрыва одной связи составляет  $75,8 \cdot 10^{-20}$  Дж [9]. В табл. 3 – расчетное время  $\tau$  разрыва связи на одной ячейке  $Cr_2O_3$ .

Таблица 3

*Время  $\tau(r)$  разрыва связи на одной ячейке  $Cr_2O_3$*

T, К	933	1033	1133	1233	1370
$\tau \cdot 10^{13}$ , с	5,175	5,071	4,982	4,896	4,791

Для  $UF_4$  выбираем состав  $d=0,1 \div 3,0$  мм в интервале температур 673–1273 К, физико-химические данные реагентов – из источников [9, 12-14]. В табл. 4 – расчетное время  $\tau$  разрыва связи на одной ячейке  $UF_4$ .

Таблица 4

Время  $\tau(r)$  разрыва связи на одной ячейке  $UF_4$

T, K	723	823	923	1123	1273
$\tau \cdot 10^{13}$ , с	5,517	5,258	5,145	4,838	4,424

*Результаты исследований.* Скорость распространения тепловых колебаний в кристаллической решетке сравнима со скоростью звука в твердом теле [8], с такой же скоростью, возможно, происходит диссоциация связей с образованием фтора как дефекта структуры. Разрыв связей ФБ происходит до 600 – 700 °С с изменением вида образца [5]. Изменения образца после 700 °С связаны уже с формированием королька металлического бериллия. Влияние размера гранулы на скорость диссоциации проявляется в том, что время диссоциации увеличивается на два порядка при увеличении размера гранулы на один порядок – от 1 до 29 мм (табл. 2). Исходя из этого, оптимальный размер может быть ограничен значением 14 мм, так как для следующего размера гранулы следует понижение скорости диссоциации на порядок. Качественная оценка размера гранулы ФБ, исходя из максимально присутствующего в шлаке королька бериллия диаметром 5 мм, дает размер исходной гранулы ФБ также порядка 14 мм. Первоначально в расчетах принимаем размер гранул-частиц фиксированным и одинаковым для ФБ и магния.

Минимальный размер гранулы ФБ лимитируется стадией разделения продуктов реакции. При восстановлении брикетированного образца из порошков ФБ и магния размером менее 1 мм продукты реакции образуют агломерат в твердой фазе, как отмечают в экспериментах: трехмерная решетка из шлака и примесей с вкраплениями металлического бериллия в ячейках решетки, отделить который было практически невозможно. ФБ имеет сеточную структуру, которая проявляется для гранулы менее 1 мм образованием агломерата. Размер частицы шихты, соответственно, должен быть выбран с учетом физико-химических свойств вещества.

Температурный интервал разрыва связей в соединениях  $BeF_2$ ,  $Cr_2O_3$  и  $UF_4$  различный, поэтому сравниваем время  $\tau(r)$  разрыва связи на одной ячейке  $UF_4$  и  $Cr_2O_3$  при температуре, близкой к температуре разрыва связей на ячейке ФБ. Как видно из табл. 5, время  $\tau(r)$  на ячейках отличается незначительно от соединения к соединению, увеличивается порядка на 0,02 от времени разрыва на ячейке ФБ. Значительная разница по времени разрушения гранулы обусловлена различием объемов моля и примитивной ячейки, т.е. порядковым номером восстанавливаемого металла в Периодической системе (ПС) (рис. 1).

Таблица 5

Время  $\tau(r)$  разрыва связи на одной ячейке  $BeF_2$ ,  $Cr_2O_3$  и  $UF_4$

	$\tau(r) \cdot 10^{13}$ , с				
T, K	723	773	873	973	1073
$BeF_2$	5,362	5,297	5,175	5,067	4,966
$Cr_2O_3$				5,175	5,071
$UF_4$	5,517	5,258		5,145	

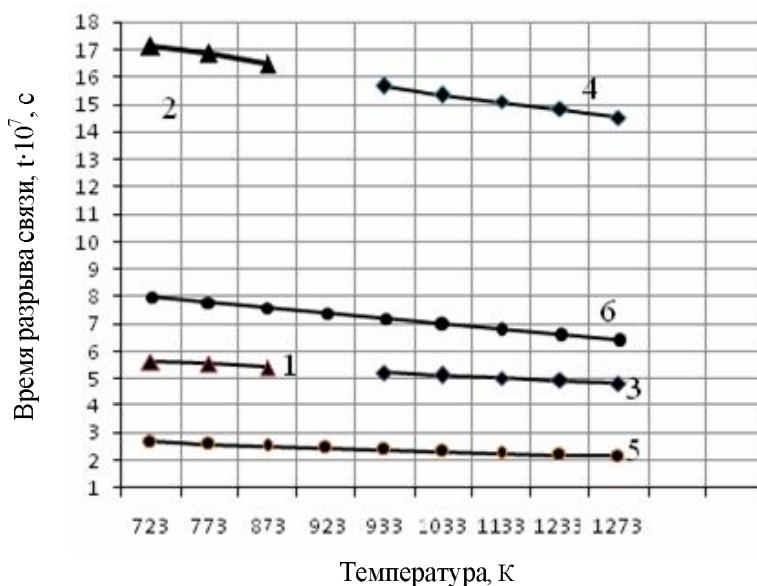


Рисунок 1 - Время разрушения соединений  $\text{BeF}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{UF}_4$  нагреванием гранул: 1, 2 – гранулы  $\text{BeF}_2$ ; 3 и 4 – гранулы  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; 5 и 6 – гранулы  $\text{UF}_4$ ; 1, 3, 5 – для гранул  $d = 1$  мм; 2, 4, 6 – для  $d = 3$  мм

Бериллий практически первый в ПС металл, который получают термическим восстановлением с образованием продуктов реакции в твердой фазе, хотя возможно восстановление оксида лития магнием [5]. Принимая ФБ за точку отсчета в сравнении размеров гранул соединений термически восстанавливаемых металлов можно получить закономерность размерного ряда гранулированной шихты при условии разрыва связей. Воспользуемся записью энтропии в виде  $S = kN \ln(V/N)$ , где вместо объема системы стоит удельный объем [15]. Рассмотрим систему из двух гранул – восстановитель и соединение, которые находятся в изотермическом равновесии: гранула с параметрами  $V_1$  и  $N_1$  для  $\text{Mg}$ , вторая –  $V_2$  и  $N_2$  для  $\text{BeF}_2$ . Энтропия системы равна сумме  $S(V, N) = S(V_1, N_1) + S(V_2, N_2)$  из свойства аддитивности. Продифференцируем уравнение минимума свободной энергии такой системы  $F = U - TS$  в равновесном состоянии при условии  $N_1 + N_2 = \text{const}$ . При равновесии равенство нулю производной дает условие равенства плотностей частиц в объемах двух гранул:

$$\ln(V_1 / N_1) = \ln(V_2 / N_2). \quad (5)$$

Удельный объем гранулы  $V_{ГП} / N_{ГП}$  можно записать через его определение:

$$\frac{V_{ГП}}{N_{ГП}} = \frac{V_{ГП}}{V_{ГП} / (M / N_A \cdot \rho)} = \frac{V_{ГП}}{V_{ГП} / \left[ \frac{1}{N_A} \frac{M}{\rho} \right]} = \frac{1}{N_A} \frac{M}{\rho}, \quad (6)$$

где количество частичек  $N_{ГП}$  в объеме гранулы  $V_{ГП}$  определяется через вес одного моля  $M$ , число  $N_A$  и плотность  $\rho$ . Условие (5) выполняется с учетом множителя  $X$  по объему, за точку сравнения выбираем плотность частиц в объеме гранулы восстановителя:

$$\ln_{\text{Mg}} \left[ \frac{1}{N_A} \frac{M_{\text{Mg}}}{\rho_{\text{Mg}}} \right] = \ln_{\text{BeF}_2} \left[ X \cdot \frac{1}{N_A} \frac{M_{\text{BeF}_2}}{\rho_{\text{BeF}_2}} \right],$$

откуда  $\lg X = -0,2251$ ,  $X = 0,6$ . То есть плотность частиц в грануле ФБ будет соответствовать плотности гранулы Mg при объеме гранулы ФБ, равном  $0,6 \cdot V_{\text{МОЛЬ BeF}_2}$ . Отсюда следует максимальный размер гранулы ФБ –  $d_{\text{MAX}} = 20,3$  мм. Так как с увеличением порядкового номера восстанавливаемого металла в ПС увеличивается молярная масса соединения и объем элементарной частички, уменьшается количество частичек в объеме, сравнимом с объемом гранулы восстановителя (Mg, также Al), размер гранулы соединения должен уменьшаться. На практике размер гранул таких соединений, кроме ФБ, составляет порядка 0,2 мм и ниже.

*Диффузия реагентов.* Для поликристалла характерен диффузионный режим A, когда  $(Dt)^{1/2} \gg \delta$ , где  $\delta$  – расстояние между границами зерна (ГЗ) [16]. В неметаллах зернограничная диффузия, отмечают [17], не очень отличается от зернограничной диффузии в металлических веществах. Режим A характеризуют большим временем отжига, малыми размерами зерна и коэффициентом объемной диффузии не слишком малым по сравнению с коэффициентом зернограничной диффузии. С макроскопической точки зрения в поликристалле выполняется закон Фика для однородной системы с эффективным коэффициентом диффузии  $D$ , который больше объемного коэффициента диффузии. Если размер зерна мал, то эффективный коэффициент диффузии равен коэффициенту зернограничной диффузии  $\delta D_b$ . Считаем, что в нашей задаче один коэффициент –  $\delta D_b$ .

*Методика исследования.* Для описания зернограничной диффузии в грануле ФБ выбираем аналитическую модель изолированной границы, которую применяют в большинстве математических моделей описания зернограничной диффузии. В модели предполагается, что граница зерна представляет собой полубесконечный слой одинаковой толщины с высоким коэффициентом диффузии, перпендикулярна к поверхности, на которую нанесен диффузانت – магний в виде пара, затем расплава на поверхности гранулы. Существует приближенное решение этой задачи для случая с источником диффузии постоянной концентрации на  $z = 0$ : ось  $z$  – направлена по границе зерна (рис. 2) [17]. Решение представляет формулы для коэффициента зернограничной диффузии, при помощи которых выражают экспериментальную величину  $\delta D_b$ . Экспериментальные значения диффузии в реакции восстановления ФБ магнием отсутствуют, однако для грубой оценки коэффициентов зернограничной диффузии можно воспользоваться соотношениями Аррениуса: коэффициенты диффузии всех металлов с одинаковой кристаллической структурой описываются общей прямой Аррениуса, и диффузия в металлах с близкой структурой происходит по одному и тому же механизму. Такие данные для зернограничной самодиффузии в виде графиков и соотношений Аррениуса существуют для различных кристаллических структур. Для зернограничной диффузии в ГПУ-металлах, каковым является магний, а фторид бериллия – соль с гексагональной плотно упакованной структурой, соотношение Аррениуса для коэффициента  $\delta D_b$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) следующее [17]:

$$\delta D_b = 1,5 \cdot 10^{-14} \exp(-10,3T_{\text{пл}} / T), \quad (7)$$

где  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления соединения. Значения расчетных возможных коэффициентов зернограничной диффузии в интервале температур 723-1073 К приводятся в табл. 6.

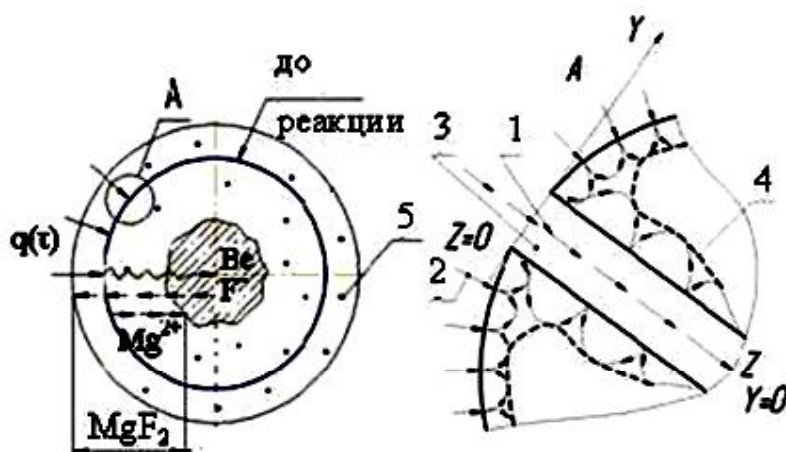


Рисунок 2 - Схематическая диаграмма процесса диффузии магния и фтора в грануле фторида бериллия:  $q(t)$  – тепловые колебания решетки в зависимости от времени процесса;  $Mg^{2+}$  – диффузия магния;  $F^1$  – диффузия фтора;  $Mg(T, ^\circ K)$  – расплав магния; Be – королек бериллия;  $MgF_2$  – шлаковая фаза; 1 – потоки магния по границе зерен; 2 – потоки магния по дислокациям около границы зерен и свободной поверхности гранулы; 3 – граница зерна; 4 – возможное положение реакционной поверхности; 5 – частичка бериллия

Таблица 6

Коэффициенты зернограничной диффузии  $\delta D_b$  фтора и магния в грануле фторида бериллия в расчете на один моль

T, K	723	773	873	973	1073
Фтор – $T_{пл} = 1073K (797^\circ C)$					
$\delta D_b, 10^{14}, m^3/c$	0,55	0,564	0,591	0,617	0,644
Магний – $T_{пл} = 924K (651^\circ C)$					
$\delta D_b, 10^{14}, m^3/c$	0,668	0,70	0,735	0,774	0,816

*Результаты исследований.* Термодинамика процесса определила температурный интервал исследования: начало реакции совпадает с началом испарения-конденсации магния –  $723^\circ K (450^\circ C)$ , окончание реакции – это температура плавления фторида бериллия –  $1073^\circ K (800^\circ C)$ , по [10] –  $797^\circ C$ ). Сопоставление расчетных коэффициентов диффузии для фтора и магния (табл. 6) показывает, что скорость диффузии фтора из гранулы к свободной поверхности несколько ниже скорости диффузии магния. Однако скорость образования дефектов – фтора, соответствует скорости распространения тепловых колебаний со скоростью звука в твердой грануле (табл. 2). Реакция восстановления закончится, когда фтор будет полностью связан магнием. За счет разницы скоростей образования фтора и диффузии фтора и магния, в середине гранулы, по мере стока фтора, свободные от фтора молекулы бериллия возможно коалесцируют уже в период реакции на поверхности между магнием и фтором.

Из весового соотношения компонентов в формулах для фторида магния  $m_{Mg}: m_F = (39,01:61,0)\%$  и ФБ  $m_{Be}: m_F = (19,17:80,83)\%$ , объемов одного моля магния и ФБ следует соответствие размеров гранул магния и ФБ и размер теоретически возможного королька бериллия (табл. 7).

Таблица 7

## Соответствие размеров гранул фторида бериллия и магния

$d_{BeF_2}$ , мм	1	3	5	10	14	18	29
$d_{Be}$ , мм	0,57	1,7	2,9	5,7	8,1	10,4	16,5
$d_{Mg}$ , мм	1	2,5	4	8	12	15	25

Изменение внешнего вида брикетированного образца шихты ( $BeF_2 + Mg$ ) в процессе восстановления [2] подтверждает подобные рассуждения: до температуры  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  брикет увеличивается в объеме за счет образования и стока свободного фтора на поверхность, и диффузии магния внутрь брикета. При  $700\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$  реакционная масса уплотняется, и брикет уменьшается в объеме: процесс диффузии практически завершился, фтор связан магнием, металлический бериллий коалесцирует. Данные рассуждения схематически показаны на рис. 2. Граница зерна 3 – геометрическая поверхность раздела смежных зерен, будет изменяться с изменением температуры. Граничная диффузия магния, в начальный момент процесса, возможно, происходит с образованием дислокаций 2 в приграничной зоне, дислокации, отрывая ячейки сетки, разрывают связи. Тонкодисперсные частички бериллия 5 оказываются в оболочке образующегося соединения  $MgF_2$ , запутываясь в шлаке. Реакционная поверхность 4 отличается от идеальной сферы и по мере диффузии реагентов перемещается к центру гранулы.

На основании вышеизложенного можно сделать соответствующие выводы. Из анализа закономерностей диссоциации связей гранулы фторида бериллия в твердой фазе определено время разрушения гранулы. Время диссоциации увеличивается на два порядка при увеличении размера гранулы фторида бериллия на один порядок. Оптимальный размер может быть ограничен значением 14 мм.

Из условия изотермического равновесия двух гранул – ФБ и  $Mg$ , определен максимальный размер гранулы – 20 мм. Минимальный размер гранулы определяется возможностью разделения шихты и составляет не менее 1 мм. Из соединений, для которых характерна стадия низкотемпературного восстановления с образованием твердых фаз, фторид бериллия имеет самую крупную гранулу шихты – порядка одного моля, и максимальный объем шлаковой фазы.

Из закономерностей зернограничной диффузии оценена скорость диффузии реагентов – коэффициенты зернограничной диффузии. Найденные коэффициенты применяются в последующем расчете роста шлакового слоя с целью определения размерного интервала гранул шихты из продолжительности реакции. Скорость диффузии магния выше, чем фтора, однако скорость образования фтора как дефекта в решетке сопоставима со скоростью распространения звука в твердой грануле, и фтор уже будет присутствовать на реакционной поверхности.

Восстановительная реакция с применением гранулированной шихты сопровождается более или менее равномерным распределением частичек и корольков металлического бериллия в шлаковой фазе, а индукционное перемешивание такого подготовленного расплава должно приводить к максимальной коагуляции металлических частичек и корольков. Разделение отстаиванием крупных слитков происходит за более короткое время.

Степень восстановления металла является основным показателем качества процесса. Математическое описание зависимости степени восстановления от закономерностей металлотермического восстановления фторида бериллия магнием позволит формализовать этот показатель через размер гранулы, оценить размерный интервал состава шихты. Это выполнено в продолжение работы.

Список литературы



1. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн - М.: Наука, 1873. - 832 с.
2. Кулешов Н.В. Исследование и разработка промышленного магнийтермического процесса получения бериллия с использованием гранулированной шихты: Отчет по НИР, Инв. № 4354 /Н.В. Кулешов, А.М. Козлов, В.Т. Дзуцев, В.К. Кениг. - ВНИИХТ; ПО «УМЗ». - 1985. - 100 с.
3. Пестова Г.С. Грануляция расплава фторида бериллия (монография) / Г.С. Пестова, Г.С. Рычков. - Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2007. - 200 с.
4. Инновационный пат. 21787 РК, МКИ В22F9/06. Способ резки слитков металла на гранулы и устройство для его осуществления / Г.С. Пестова; заявитель и патентообладатель - Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева. - № 2008/0555.1; Заяв.12.05.2008; Опубл. 15.10.2009, Бюл. № 10. - 4 с.: ил.
5. Козлов Л.В. Совершенствование и участие во внедрении промышленного процесса восстановления бериллия из гранулированной шихты в механизированных печах закрытого типа: Отчет по НИР, Инв. № 4445 / Л.В. Козлов, Ю.И. Зарембо, В.К. Кениг. - ПС «УМЗ»; ВНИИХТ. - 1986. - 115 с.
6. Уббелоде А.Р. Расплавленное состояние вещества. - Пер. с англ. - М.: Metallurgia, 1982. - 376 с.
7. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский - М.: Наука, 1974. - 560 с.
8. Гуревич А.Г. Физика твердого тела: Учеб. пособие для вузов / А.Г. Гуревич. - ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. - СПб.: Невский Диалект; БХВ-Петербург, 2004. - 320 с.
9. Рабинович В.А. Краткий химический справочник / В.А. Рабинович, Э.Я. Хавин. - Л.: Химия, Ленинградское отделение, 1977. - 376 с.
10. Герасимов Я.И. Химическая термодинамика в цветной металлургии: Справочное руководство / Я.И. Герасимов, А.Н. Крестовников, С.И. Горбов. - Т.V. - М.: «Металлургия», 1973. - 296 с.
11. Лякишев Н.П. Аллюминотермия (монография) / Н.П. Лякишев, Ю.Л. Плинер, Г.Ф. Игнатенко, С.И. Лаппо. - М.: Metallurgia, 1978. - 424 с.
12. Герасимов Я.И. Химическая термодинамика в цветной металлургии: Справочное руководство: Термодинамика алюминия, сурьмы, магния, никеля, висмута, кадмия и их важнейших соединений / Я.И. Герасимов, А.Н. Крестовников, А.С. Шахо. - М.: «Металлургия», 1966. - Т.IV. - 427 с.
13. Харпер Дж. Факторы, влияющие на восстановление тетрафторида урана магнием / Дж. Харпер, А.Е. Вильямс // Извлечение и очистка редких металлов. - М.: Атомиздат, 1960. - С. 180-202.
14. Самсонов Г.П. Магниотермия / Г.П. Самсонов, В.П. Перминов - М.: Metallurgia, 1971. - 176 с.
15. Гельфер Я.М. Парадокс Гиббса и тождественность частиц в квантовой механике / Я.М. Гельфер, В.Л. Любошиц, М.И. Подгорецкий. - М.: Наука, 1975. - 272 с.
16. Бокштейн В.С. Структура и свойства внутренних поверхностей раздела в металлах (монография): Физика, химия и механика поверхности / В.С. Бокштейн, Ч.В. Копецкий, Л.С. Швиндлерман и др. - М.: Наука, 1988. - 272 с.
17. Каур И. Диффузия по границам зерен и фаз / И. Каур, В. Густ / Пер. с англ. В.Б. Страумала; Под ред. Л.С. Швиндлермана. - М.: Машиностроение, 1991. - 448 с.

Получено 28.03.11

---

## ОӘД 622

**М.М. Тогузова, А.М. Мамышева**

Д. Серикбаев атындағы ШҚМТУ, Өскемен қ.

### **ШҚО АЙМАҒЫНДА ҚАР КӨШКІНІН ЗЕРТТЕУДЕ ҒАЖ -ТЕХНОЛОГИЯСЫН ПАЙДАЛАНУ**

Қар көшкіні – тау беткейлерінен сырғып, төмен қарай өте жылдам құлайтын қар массалары. Қар көшкінінің құлау себебі беткейдің қарға аса толып кетуінен, беткейде жатқан қар алаңының температуралық қысылуынан және қар қайтадан кристалданғанда, қар қабатының ішінде қиыршық кеңістіктің пайда болуынан туады. Жекелеген қар көшкінінің көлемі 2 млн м<sup>3</sup>-ге жетеді. Ұру күші 1 м<sup>2</sup>-ге 60-100 тонна. Қар көшкіні құлағанда пайда болатын ауа толқыны қауіпті.

2008-2010 жылдар аралығындағы Шығыс Қазақстан облысының аудандары бойынша