

Металлургия чёрных, цветных и редких металлов

УДК 669.696

DOI: 10.14529/met210102

КИНЕТИКА ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РАСПАДЕ ВЮСТИТА

Ю.Н. Тепляков

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

На основании высокотемпературного рентгенофазового анализа вюститсодержащей окалины на железе, подвергнутой изотермическому отпуску при температурах ниже 575 °С, исследована кинетика формирования продуктов распада вюstitа: стехиометрического вюstitа, первичного и вторичного магнетитов, а также дисперсного железа. Установлено, что стехиометрический вюstit формируется как промежуточная фаза при температурах отпуска ниже 400 °С и диффузионном контроле. Возможно, что стехиометрический вюstit – это результат кинетических затруднений распада исходного нестехиометрического вюstitа. В зависимости от температуры отпуска распад вюstitа протекает по двум механизмам. При температурах выше 400 °С вюstit распадается с одновременным образованием магнетита и железа. При температурах ниже 400 °С распад происходит в две стадии. На первой образуется первичный магнетит и стехиометрический вюstit. После полного распада исходного нестехиометрического вюstitа наступает вторая стадия – распад стехиометрического с образованием вторичного магнетита и железа.

При температурах отпуска менее 400 °С образуются два магнетита: первичный и вторичный. Отличия между этими фазами заключаются в том, что первый образуется в результате распада исходного нестехиометрического вюstitа, а второй является продуктом распада промежуточного стехиометрического вюstitа. Это в свою очередь вызывает существенные отличия в кинетике формирования фаз. В частности, скорость роста кристаллических зародышей вторичного магнетита очень мала, что позволяет предположить отсутствие кристаллических дефектов в стехиометрическом вюstitе, либо их очень небольшое количество.

Также установлено, что формирование всех продуктов распада включает несколько последовательных стадий. Начальные стадии образования новых фаз протекают при диффузионном контроле, и фактором, определяющим скорость процесса, является температура отпуска. Все заключительные стадии контролируются кинетически, а скорость стадий определяется величиной переохлаждения.

Ключевые слова: кинетика, вюstit, распад, константа, скорость, энергия активации, стехиометрический вюstit, дисперсное железо, магнетит, контролирующая стадия.

Вюstit – основной компонент окалины, образующейся при окислении железа и углеродистых сталей в кислородсодержащих газовых средах. Вюstit не стабилен и при температурах ниже 575 °С распадается на магнетит и железо. Поэтому последующее, после нагрева стального изделия, охлаждение, даже высокоскоростное, до температуры окружающей среды приводит к изменениям фазового состава окалины.

Свойства вюstitа и закономерности его распада широко изучались, например [1–6]. Знание этих закономерностей позволяет выделить такой режим охлаждения стальных изделий, при котором формируется окалина

легко растворимая в кислотах, или же защитные оксидные покрытия с повышенной коррозионной стойкостью [7].

Стехиометрический вюstit

Проведенные ранее исследования показали, что распад вюstitа, в зависимости от температуры, протекает по двум механизмам. При температурах выше 400 °С распад протекает с одновременным выделением магнетита и железа. Отпуск ниже 400 °С приводит к распаду вюstitа в две стадии. На первой образуются первичный магнетит и некоторая промежуточная метастабильная фаза. Как показали измерения, это вюstit с параметром

кристаллической решетки $a = 4,326 \cdot 10^{-10}$ м. Основные рентгенографические данные этой фазы приведены в работе [8]. Установлено [6, 7, 9, 10], что такой вюстит является стехиометрическим или очень близким к нему по составу. После полного распада исходного вюстита $Fe_{1-x}O$ наступает вторая стадия – распад стехиометрического вюстита с образованием вторичного магнетита и дисперсного железа.

Для исследования образования фаз использовался рентгеновский дифрактометр Дрон-3 с высокотемпературной приставкой типа УВД-2000. Измерения проводились в изотермическом режиме в излучении кобальта ($Co_{K\alpha}$). В качестве объекта исследований использовались образцы железа ЖЧК-4 в виде квадратов со стороной 10 мм и толщиной 2,5 мм. Предварительно образцы оксидировались в среде перегретого водяного пара при температуре 900 °С в течение 5 мин, что позволило получить практически однофазное покрытие, состоящее на 98 % из вюстита и на 2 % из магнетита. Толщина оксидного покрытия составила примерно 10 мкм. Охлаждение образцов от температуры оксидирования до комнатной температуры проводилось струей аргона, время охлаждения составило менее 10 с. Выбранный способ охлаждения позволяет предотвратить распад вюстита, растрескивания окалины и ее доокисление. Средний состав исходного вюстита можно выразить $Fe_{0,96}O$, что соответствует параметру кристаллической решетки $a = 4,307 \cdot 10^{-10}$ м.

При измерениях образец нагревался до заданной температуры отпуска и выдержи-

вался определенное время. В процессе изотермического отпуска контролировался фазовый состав оксидного покрытия через каждые 3–4 мин. В качестве кинетического показателя была выбрана степень превращения $\alpha = J/J_{max}$, где J – текущая интенсивность дифракционного максимума фазы, J_{max} – его максимальное значение.

На рис. 1 представлены кинетические зависимости формирования стехиометрического вюстита для температур отпуска 300, 350 и 400 °С.

Характер приведенных кривых свидетельствует о том, что формирование стехиометрического вюстита включает ряд последовательных стадий.

Начальная стадия протекает с небольшой скоростью и по своему существу представляет собой образование зародышей ядер кристаллов новой фазы (индукционный период).

На последующей стадии зародыши прорастают вглубь кристалла независимо друг от друга, при этом площадь поверхности растущих ядер увеличивается, это в свою очередь вызывает рост скорости реакции, которая достигает максимального значения (точка перегиба на кинетической зависимости). Затем, сливаясь, ядра образуют общий реакционный фронт, площадь поверхности достигает максимального значения. Последний участок соответствует замедлению процесса образования стехиометрического вюстита, что можно объяснить уменьшением количества исходного нестехиометрического вюстита [10–12].

Приведенные зависимости достаточно точно описываются уравнением Ерофеева – Колмогорова:

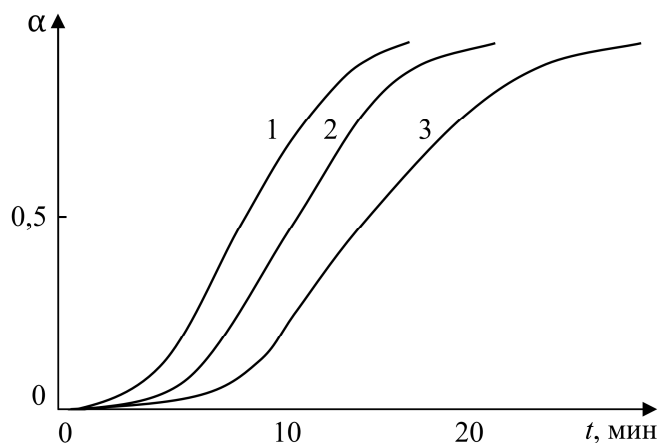


Рис. 1. Кинетические зависимости формирования стехиометрического вюстита $Fe_{1,0}O$: 1 – 400 °С; 2 – 350 °С; 3 – 300 °С

$$\alpha = 1 - e^{-Kt^m}, \quad (1)$$

где K и m – постоянные величины для данной температуры. Двойное логарифмирование уравнения (1) позволяет получить линейную зависимость вида

$$\ln[-\ln(1-\alpha)] = m \ln t - \ln K \quad (2)$$

и определить значение K и m (рис. 2).

Константа скорости реакции определяется уравнением Саковича с учетом постоянных K и m :

$$k = m K^{1/m}. \quad (3)$$

Обработка данных (см. рис. 1 и 2) позволила получить кинетические параметры формирования стехиометрического вюстита, приведенные в табл. 1.

Зависимость константы скорости реакции k от температуры, приведенная на рис. 3, позволила определить энергию активации формирования стехиометрического вюстита, которая составила 14 кДж/моль. Относительная ошибка измерений не более 7 %.

Значение энергии активации соответствует диффузионному контролю формирования стехиометрического вюстита [13–15]. Малая величина этой энергии объясняется тем, что кристаллическая решетка исходного нестехиометрического вюстита и продукта его распада по своему строению очень близки. Распад сводится к перегруппировке атомов и их диффузии на очень небольшие расстояния – порядка одного параметра кристаллической решетки.

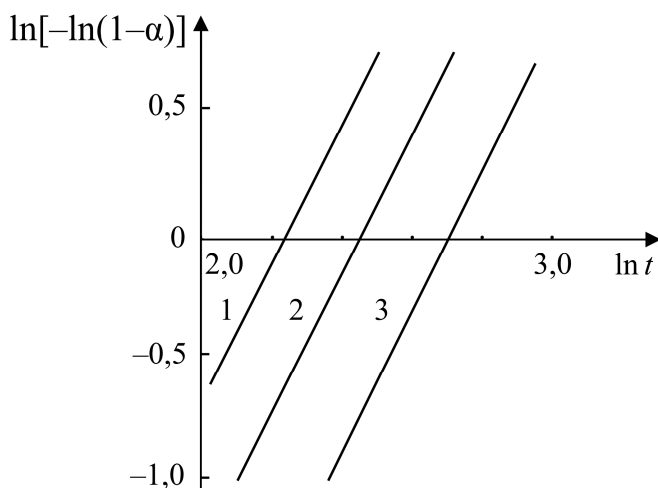


Рис. 2. Кинетика формирования стехиометрического вюстита:
1 – 400 °C; 2 – 350 °C; 3 – 300 °C; t , мин

Таблица 1

Параметры процесса формирования стехиометрического вюстита

$T, ^\circ\text{C}$	$K, 1/\text{мин}^m$	m	$k, 1/\text{мин}$
300	$0,2 \cdot 10^{-3}$	3,1	0,203
350	$0,5 \cdot 10^{-3}$	3,1	0,272
400	$0,9 \cdot 10^{-3}$	3,1	0,329

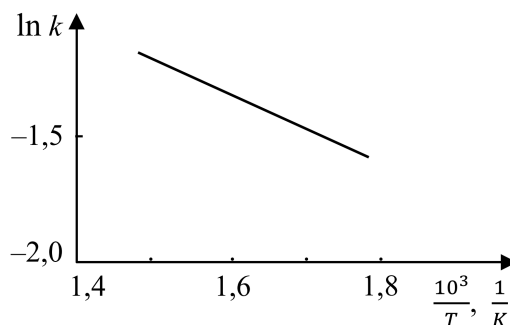


Рис. 3. Зависимость константы скорости роста стехиометрического вюстита от температуры

Показатель степени $m = 3$ соответствует образованию зародышей новой фазы сферической формы, при этом количество зародышей постоянно [13].

С ростом температуры диффузионное сопротивление образованию продуктов распада уменьшается, в результате чего вероятность образования промежуточной фазы снижается.

Таким образом, можно предполагать, что образование стехиометрического вюстита есть результат кинетических затруднений процесса распада.

Магнетит

При температурах отпуска менее $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ образуются два магнетита – первичный и вторичный. Отличие между этими фазами заключается в том, что первый образуется в результате распада исходного нестехиометрического вюстита, а второй является продуктом распада

промежуточного, стехиометрического вюстита. Характер исходных фаз вызывает отличия в кинетике образования магнетитов, о чем свидетельствуют зависимости, приведенные на рис. 4 и 5. Более наглядное представление дает интерпретация зависимостей в координатах $\ln t$, $\ln[-\ln(1-\alpha)]$ (рис. 6). На каждой зависимости можно видеть три участка.

Начальный участок – формирование первичного Fe_3O_4 . Следующий участок – участок с нулевой или очень малой скоростью роста магнетита (индукционный участок), на котором образуются зародыши новой фазы – вторичного Fe_3O_4 в матрице $\text{Fe}_{1,0}\text{O}$. Скорость образования вторичного магнетита на индукционном участке очень мала, и метод РФА не позволяет ее определить. Наличие длительного индукционного участка позволяет предположить, что дефекты в $\text{Fe}_{1,0}\text{O}$ отсут-

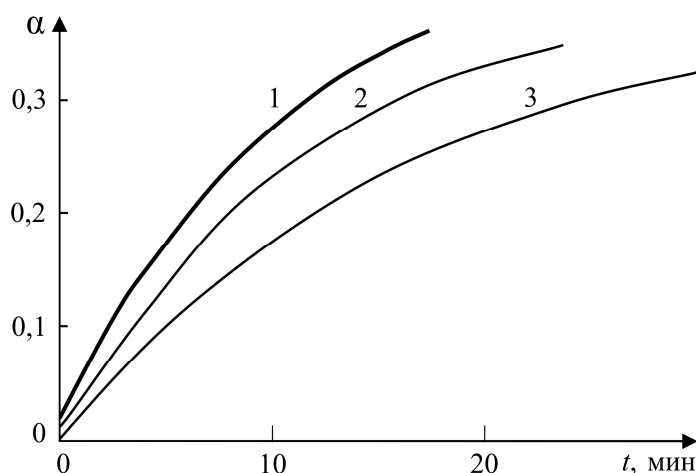


Рис. 4. Кинетика формирования первичного магнетита:
1 – $400\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $350\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $300\text{ }^{\circ}\text{C}$

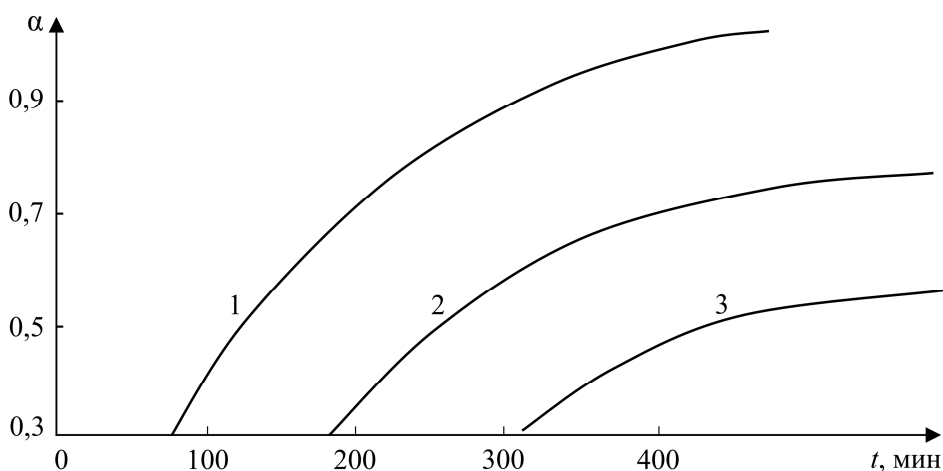


Рис. 5. Кинетика формирования вторичного магнетита:
1 – $400\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $350\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $300\text{ }^{\circ}\text{C}$

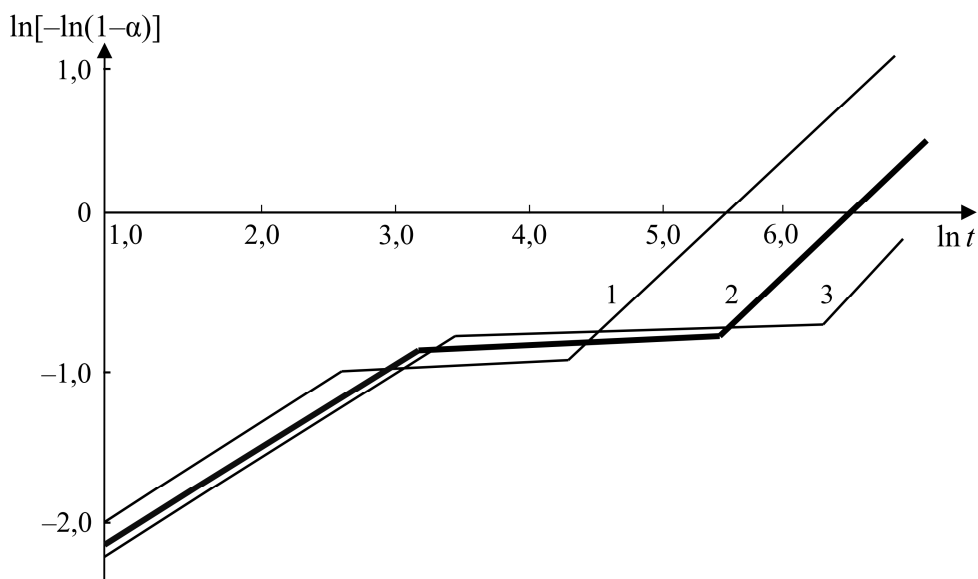


Рис. 6. Формирование первичного и вторичного магнетита:
1 – 400 °С; 2 – 350 °С; 3 – 300 °С; t , мин

Таблица 2

Кинетические параметры формирования первичного магнетита

$T, ^\circ\text{C}$	$K, 1/\text{мин}^m$	$k, 1/\text{мин}$	m
300	0,055	0,005	0,61
350	0,064	0,007	0,62
400	0,071	0,013	0,67

Таблица 3

Кинетические параметры формирования вторичного магнетита

$T, ^\circ\text{C}$	$K, 1/\text{мин}^m$	$k, 1/\text{мин}$	m
300	0,001	0,002	1,11
350	0,002	0,003	1,05
400	0,006	0,008	1,04

ствуют, либо их концентрация очень невелика. Третий участок соответствует формированию вторичного магнетита.

Зависимости (см. рис. 6) позволяют определить постоянные величины K и m , входящие в уравнение (1). Кинетику роста вторичного магнетита можно выразить уравнением

$$\alpha = 1 - \exp[-K(t - t_0)^m], \quad (4)$$

где t_0 – время окончания распада стехиометрического вюстита, причем $t > t_0$.

Полученные данные приведены в табл. 2 и 3.

Зависимость константы скорости реакции от температуры, приведенная на рис. 7, позволяет определить энергию активации формирования первичного и вторичного магнетитов. В первом случае энергия активации составила $E = 27,3$ кДж/моль, что соответ-

ствует диффузионно-кинетическому контролю. Об этом же свидетельствует значение показателя степени $0,5 < m < 1,0$.

Энергия активации образования вторичного магнетита составляет $E = 35,4$ кДж/моль и соответствует кинетическому контролю процесса, этому же соответствует показатель степени $m > 1,0$.

Магнетит, образующийся при температурах отпуска выше 400 °С, формируется в результате эвтектоидного распада исходного нестехиометрического вюстита без образования промежуточной фазы. Кинетические зависимости роста Fe_3O_4 для температур отпуска 450, 500, 550 °С приведены на рис. 8.

Зависимости состоят из двух участков. Первый – индукционный, соответствует фор-

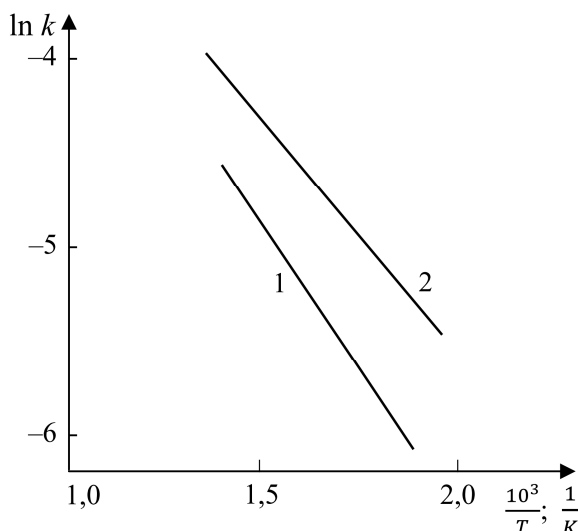


Рис. 7. Зависимость константы роста Fe_3O_4 от температуры (300, 350, 400 °С): 1 – вторичный магнетит; 2 – первичный магнетит

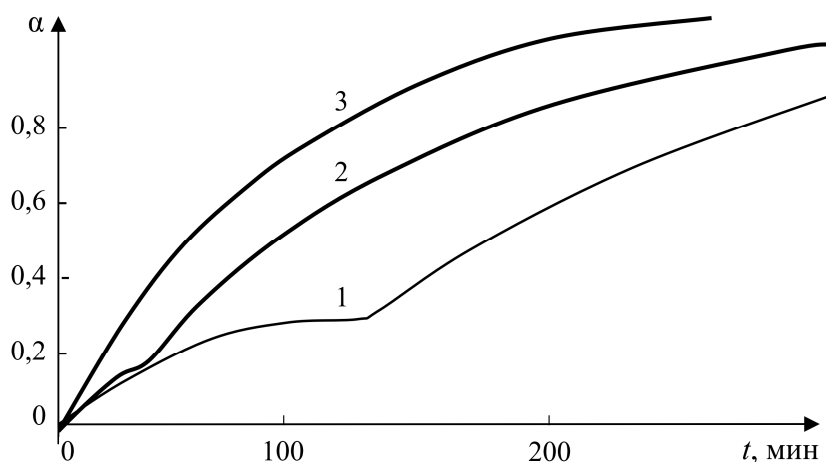


Рис. 8. Кинетика формирования магнетита. Температуры отпуска: 1 – 550 °С; 2 – 500 °С; 3 – 450 °С

мированию кристаллических зародышей, а второй – их росту. Показано, что скорость образования магнетита возрастает с увеличением переохлаждения $\Delta T_{\text{охл}} = T_0 - T$, где T_0 – точка Шадрона (575 °С), T – температура отпуска.

При формировании вторичного магнетита скорость образования зародышей очень мала. Это можно объяснить тем, что вторичный магнетит формируется из стехиометрического вюстита, имеющего минимальное количество кристаллических дефектов, чего не наблюдается в исходном нестехиометрическом.

Можно видеть, что скорость роста кристаллов (участок 2), а также продолжительность участка 1 определяются величиной переохлаждения $\Delta T_{\text{охл}}$.

Интерпретация зависимостей в координатах $\ln t$, $\ln[-\ln(1-\alpha)]$ (рис. 9) дает возможность определить величины, входящие в уравнение (2) и приведенные в табл. 4.

Значения m на начальном участке свидетельствуют о диффузионном контроле процесса ($m \approx 0,5$). На последующем участке рост Fe_3O_4 происходит при кинетическом контроле ($m \approx 1$).

Зависимость константы скорости реакции от температуры (рис. 10) также свидетельствует о том, что определяющим фактором формирования магнетита при температурах отпуска 450, 500, 550 °С является величина переохлаждения.

Значения m на начальном участке свидетельствуют о диффузионном контроле процес-

Металлургия чёрных, цветных и редких металлов

са ($m \approx 0,5$). На втором участке рост Fe_3O_4 происходит при кинетическом контроле ($m \approx 1$).

Зависимость константы скорости реакции от температуры (см. рис. 10) также свидетель-

ствует о том, что определяющим фактором формирования магнетита при температурах отпуска 450, 500, 550 °С является величина переохлаждения.

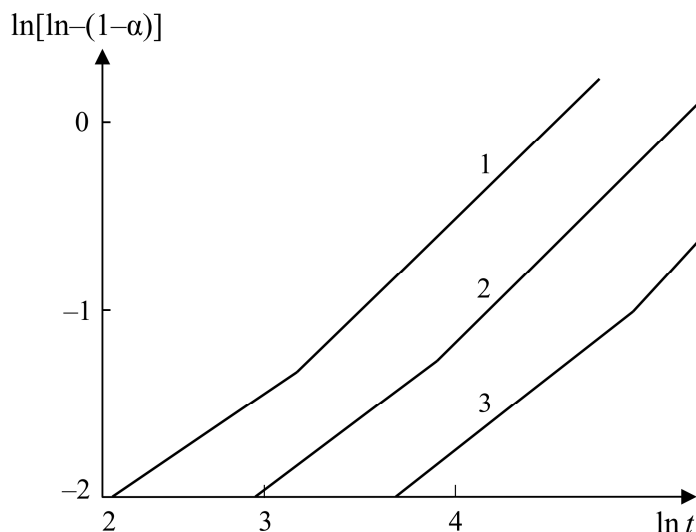


Рис. 9. Кинетика формирования Fe_3O_4 :
1 – 450 °С; 2 – 500 °С; 3 – 550 °С; t – время, мин

Таблица 4

Кинетические параметры формирования магнетита

$T, ^\circ C$	Участок 1			Участок 2		
	$K, 1/\text{мин}^m$	$k, 1/\text{мин}$	m	$K, 1/\text{мин}^m$	$k, 1/\text{мин}$	m
450	0,050	0,004	0,60	0,016	0,024	1,09
500	0,040	0,0006	0,48	0,005	0,007	1,05
550	0,033	0,00003	0,48	0,0003	0,0002	0,95

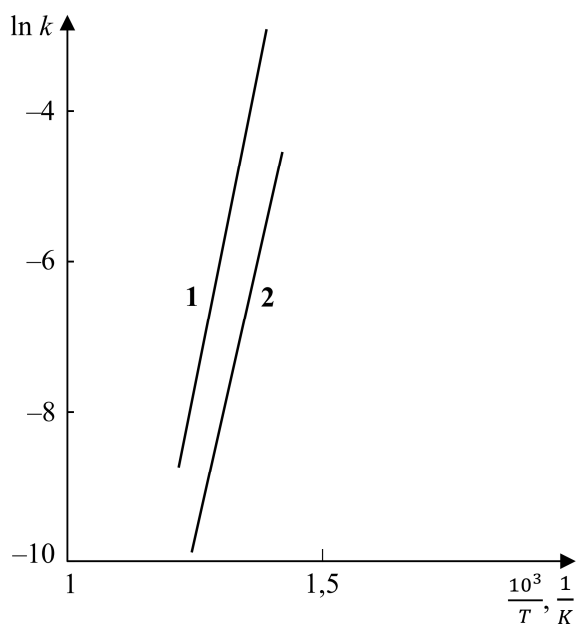


Рис. 10. Зависимость константы реакции от температуры (450, 500, 550 °С): 1 – участок 2; 2 – участок 1

Железо

Кинетические зависимости формирования железа для температур 300, 350 и 400 °С приведены на рис. 11 и 12.

Результаты расчета параметров уравнения (1) представлены в табл. 5.

Кинетика процесса определяется температурой отпуска. Формирование железа при температурах 450, 500 и 550 °С происходит в результате эвтектоидного распада исходного нестехиометрического вюстита без образования промежуточной фазы.

Зависимости представлены на рис. 13 и 14. Определенные значения постоянных и константы скорости реакции приведены в табл. 6.

Зависимости констант скорости роста железа для исследованных температур, приведенные на рис. 15, доказывают, что при температурах отпуска менее 400 °С, скорость процесса определяется величиной температуры отпуска. Значение энергии активации $E = 81,4$ кДж/моль, а также значение показателя степени в уравнении (4) $m > 1$ свидетельствуют о кинетическом контроле процесса.

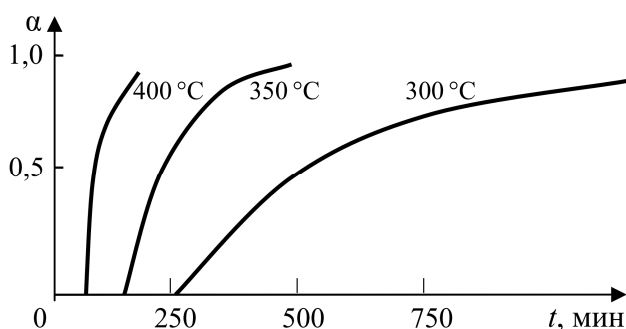


Рис. 11. Кинетика формирования железа при температурах 300, 350, 400 °С

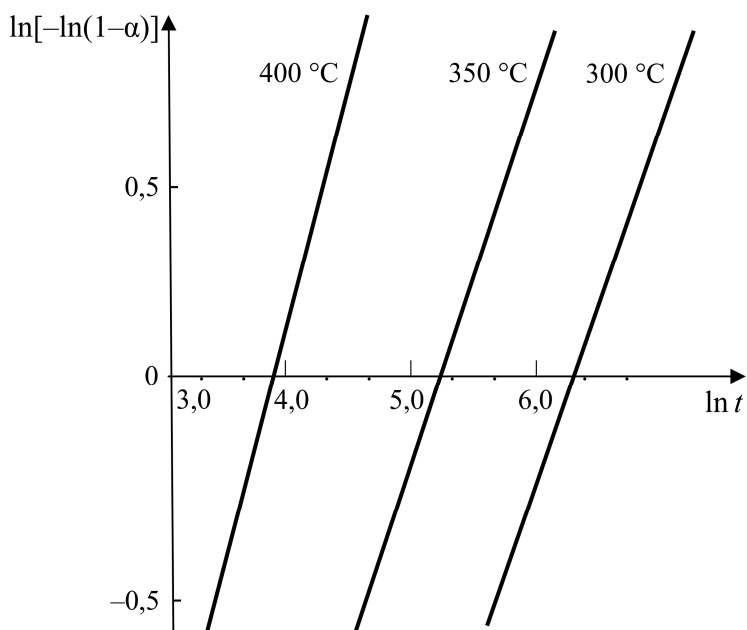


Рис. 12. Кинетика формирования железа при температурах отпуска 300, 350, 400 °С; t – время, мин

Таблица 5

Кинетические параметры формирования железа

$T, ^\circ\text{C}$	$K, 1/\text{мин}^m$	$k, 1/\text{мин}$	m	$t_0, \text{мин}$
300	0,003	0,003	1,0	50
350	0,004	0,009	1,15	150
400	0,006	0,035	1,39	265

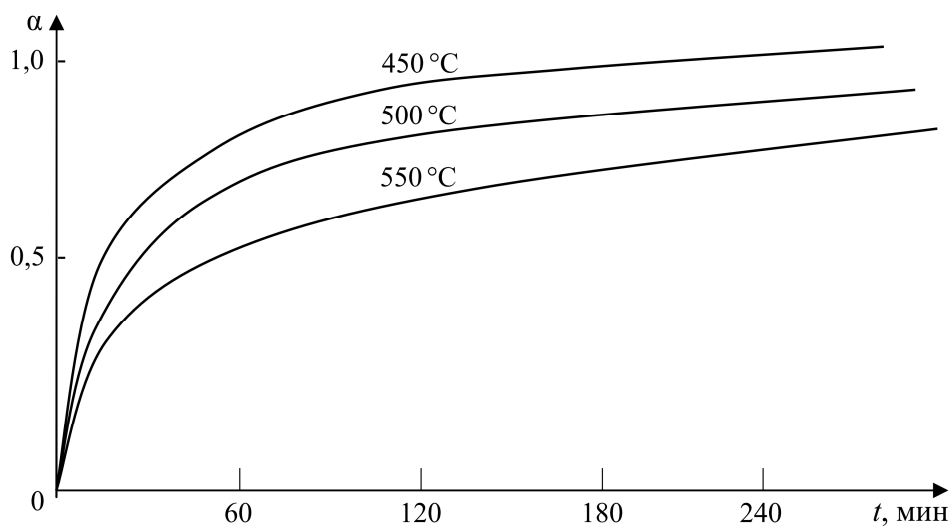


Рис. 13. Кинетика формирования железа при температурах отпуска 450, 500 и 550 °С

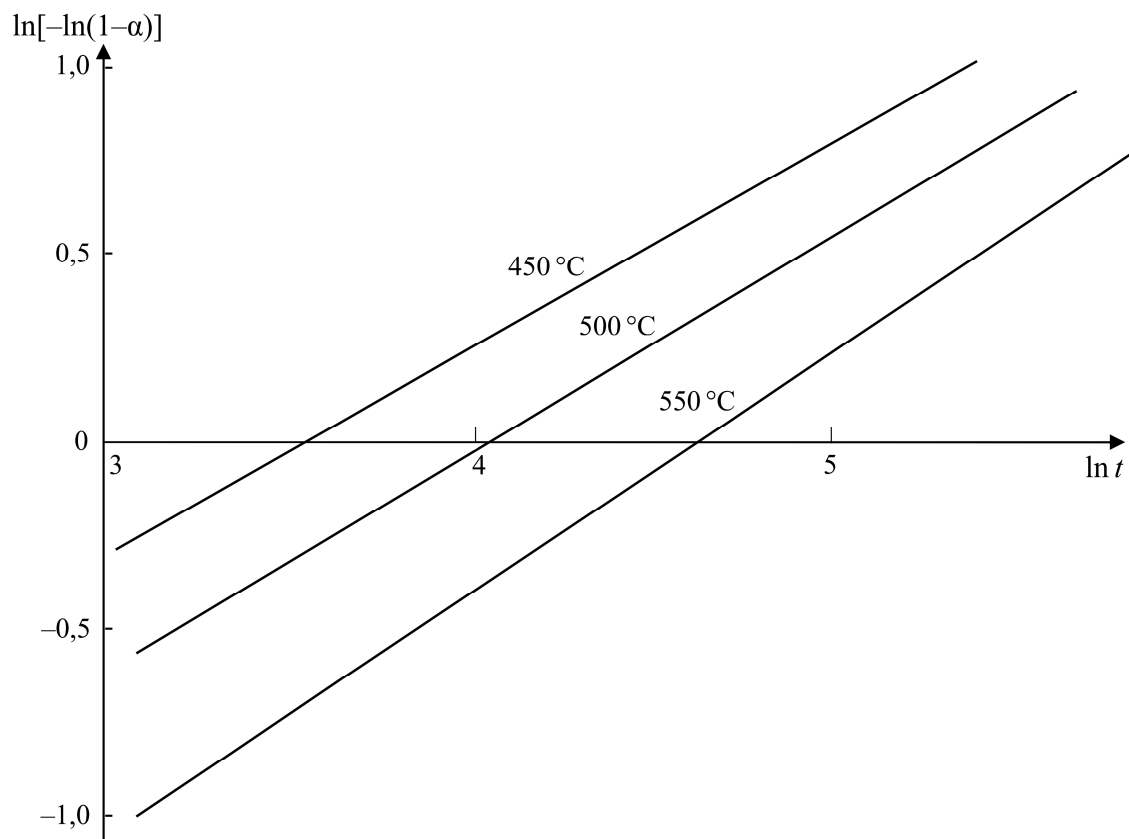


Рис. 14. Кинетика формирования железа при температурах отпуска 450, 500, 550 °С; t – время, мин

Кинетические параметры формирования железа при температурах 450, 500 и 550 °С

Таблица 6

$T, ^\circ\text{C}$	$K, 1/\text{мин}^m$	$k, 1/\text{мин}$	m
450	0,144	0,015	0,54
500	0,096	0,008	0,56
550	0,046	0,006	0,65

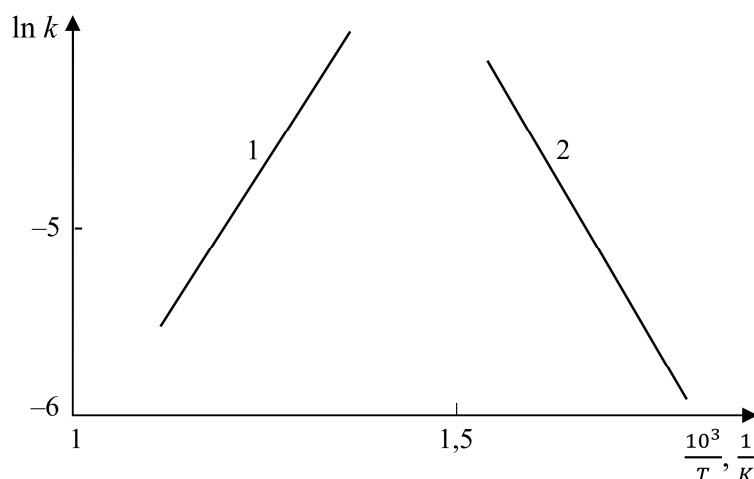


Рис. 15. Зависимость константы скорости формирования железа при температурах: 300, 350, 400 °C (2); 450, 500, 550 °C (1)

При температурах отпуска выше 400 °C кинетика формирования железа определяется величиной переохлаждения, а значение показателя $m < 1$ соответствует диффузионному контролю.

Выводы

Методами формальной кинетики с помощью рентгенофазового анализа установлено:

1. При распаде вюстита, входящего в состав окалины, образуются: стехиометрический вюстит, первичный магнетит, вторичный магнетит и дисперсное железо.

2. Стехиометрический вюстит формируется как промежуточная фаза при температу-

рах отпуска ниже 400 °C при высоком диффузионном сопротивлении. Следовательно, стехиометрический вюстит – это результат кинетических затруднений распада исходного нестехиометрического вюстита.

3. Формирование всех продуктов распада вюстита включает несколько последовательных стадий.

4. Начальные стадии формирования продуктов распада вюстита протекают при диффузионном контроле и фактором, определяющим скорость процесса, является температура отпуска. Все заключительные стадии контролируются кинетически, а скорость этих стадий определяется величиной переохлаждения.

Литература

1. Ilschner, B. *Ausscheidungskinetik in Wüstite (Fe_{1-x}O)* / B. Ilschner, E. Mlitzke // *Acta Metallurgica*. – 1965. – Vol. 13, iss. 7. – P. 855–867. DOI: 10.1016/0001-6160(65)90150-1

2. Chaudron, G. *Sur les premières recherches relatives instabilité du protoxyde fer* / G. Chaudron // *Ann. Chim.* – 1970. – Vol. 5. – P. 234–239.

3. Лыкасов, А.А. *Физико-химические свойства вюстита и его растворов* / А.А. Лыкасов. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. – 227 с.

4. *Окисление металлов* / под ред. Ж. Бенара. – М.: Металлургия, 1967. – Т. 1. – 499 с.

5. Есин, О.А. *Физическая химия пирометаллургических процессов* / О.А. Есин, П.В. Гельд. – Свердловск: Изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1962. – Т. 1. – 671 с.

6. Мень, А.И. *Физико-химические свойства нестехиометрических окислов* / А.И. Мень, Ю.П. Воробьев, Г.И. Чуфаров. – Л.: Химия, 1973. – 223 с.

7. Тепляков, Ю.Н. *Распад вюстита и влияние его на коррозионную стойкость окислированных сталей* / Ю.Н. Тепляков // *Известия вузов. Серия «Черная металлургия»*. – 1988. – № 11. – С. 154–155.

8. Тепляков, Ю.Н. *Распад вюстита, входящего в состав окалины* / Ю.Н. Тепляков // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия»*. – 2009. – № 23 (156). – С. 36–42.

9. Benard, I. *Decomposition du peroxyde de fer au cours de traitements revenue structure a haute temperature* / I. Benard, T. Herot, I. Monenc // *Ann. Chim.* – 1970. – Vol. 6. – P. 240–245.

10. Katsura, T. High-Pressure Synthesis of the Stoichiometric Compound FeO / T. Katsura, B. Iwasaki, S. Kimura, S. Akimoto // *J. Chem. Phys.* – 1967. – Vol. 47. – P. 4559. DOI: 10.1063/1.1701668

11. Hoffman, A. Der Zerfallsmechanismus des Wüstite $Fe_{1-x}O$ unterhalb 570 °C / A. Hoffman // *Z. Electrochem.* – 1959. – Bd. 63, Nr. 2. – S. 207–213.

12. Broussard, L. The Disproportionation of Wustite / L. Broussard // *J. Phys. Chem.* – 1969. – Vol. 73, no. 6. – P. 1848–1854. DOI: 10.1021/j100726a035

13. Захарьевский, М.С. Кинетика и катализ / М.С. Захарьевский. – Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1963. – 314 с.

14. Янг, Д. Кинетика разложения твердых веществ / Д. Янг. – М.: Мир, 1969. – 263 с.

15. Стромберг, А.Г. Физическая химия / А.Г. Стромберг, Д.П. Семченко. – М.: Высшая школа, 2003. – 527 с.

Тепляков Юрий Николаевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; 2320561@mail.ru.

Поступила в редакцию 11 ноября 2020 г.

DOI: 10.14529/met210102

INETICS OF PHASE FORMATION DURING THE DECAY OF WUSTIT

Yu.N. Teplyakov, 2320561@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

On the basis of high-temperature X-ray phase analysis of wustite-containing scale on iron subjected to isothermal tempering at temperatures below 575 °C, the kinetics of the formation of wustite decay products is investigated: stoichiometric wustite, a primary and a secondary magnet, as well as particulate iron. It is established that stoichiometric wustite is formed as an intermediate phase at tempering temperatures below 400 °C and diffusion control. It is possible that stoichiometric wustite is the result of kinetic difficulties in the decay of the original non-stoichiometric wustite. Depending on the tempering temperature, the decay of wustite proceeds by two mechanisms. At temperatures above 400 °C, wustite decays with the simultaneous formation of magnetite and iron. At temperatures below 400 °C, the decay occurs in two stages. At the first stage, primary magnetite and stoichiometric wustite are formed. After the complete decay of the original non-stoichiometric wustite, the second stage occurs – the decay of the stoichiometric with the formation of secondary magnetite and iron.

At tempering temperatures of less than 400 °C, two magnetites are formed: primary and secondary. The differences between these phases are that the first is formed as a result of the decomposition of the initial nonstoichiometric wustite, and the second is a decomposition product of the intermediate stoichiometric wustite. This, in turn, causes significant differences in the kinetics of phase formation. In particular, the growth rate of crystalline nuclei of secondary magnetite is very low, which suggests the absence of crystal defects in stoichiometric wustite, or a very small number of them.

It was also found that the formation of all decomposition products includes several successive stages. The initial stages of the formation of new phases proceed under diffusion control and the tempering temperature is the factor determining the rate of the process. All final stages are controlled kinetically, and the speed of the stages is determined by the amount of hypothermia.

Keywords: kinetics, wustite, decay, constant, rate, activation energy, stoichiometric wustite, dispersed iron, magnetite, controlling stage.

References

1. Ilschner B., Mlitzke E. Ausscheidungskinetik in Wüstit (Fe_{1-x}O). *Acta Metallurgica*, 1965, vol. 13, iss. 7, pp. 855–867. DOI: 10.1016/0001-6160(65)90150-1
2. Chaudron G. Sur les premières recherches relatives instabilité du protoxyde fer. *Ann. Chim*, 1970, vol. 5, pp. 234–239.
3. Lykasov A.A. *Fiziko-khimicheskiye svoystva vyustita i ego rastvorov* [Physicochemical properties of wustite and its solutions]. Sverdlovsk, UC Academy of Sciences of the USSR, 1987. 227 p.
4. Benard J. (Ed.). *Okisleniye metallov* [Oxidation of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1967, vol. 1. 499 p.
5. Esin O.A., Geld P.V. *Fizicheskaya khimiya pirometallurgicheskikh protsessov* [Physical chemistry of pyrometallurgical processes]. Sverdlovsk, Publishing house of literature on price and non-ferrous metallurgy, 1962, vol. 1. 671 p.
6. Men' A.N., Vorob'yev Yu.P., Chufarov G.I. *Fiziko-khimicheskiye svoystva nestekhiometricheskikh okislov* [Physicochemical properties of nonstoichiometric oxides]. Leningrad, Khimiya Publ., 1973. 223 p.
7. Teplyakov Yu.N. [Disintegration of wustite and its effect on corrosion resistance oxidizing of bathrooms steels]. *Izvestiya vuzov. Ser. Ferrous metallurgy*, 1988, no. 11, pp. 154–155. (in Russ.)
8. Teplyakov Yu.N. [Decomposition of wustite, which is part of the scale]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chemistry*, 2009, no. 23 (156), pp. 36–42. (in Russ.)
9. Benard I., Herot T., Monenc I. Decomposition du peroxyde de fer au cours de traitements revenue structure a haute temperature. *Ann. Chim*, 1970, vol. 6, pp. 240–245.
10. Katsura T., Iwasaki B., Kimura S., Akimoto S. High-Pressure Synthesis of the Stoichiometric Compound FeO . *J. Chem. Phys.*, 1967, vol. 47, p. 4559. DOI: 10.1063/1.1701668
11. Hoffman A. Der Zerfallsmechanismus des Wüstite Fe_{1-x}O unterhalb 570 °C. *Z. Electrochem*, 1959, Bd. 63, Nr. 2, S. 207–213.
12. Broussard L. The Disproportionation of Wustite. *J. Phys. Chem.*, 1969, vol. 73, no. 6, pp. 1848–1854. DOI: 10.1021/j100726a035
13. Zakhar'yevskiy M.S. *Kinetika i kataliz* [Kinetics and catalysis]. Leningrad, Leningrad University Publ., 1963. 314 p.
14. Young D. *Kinetika razlozheniya tverdykh veshchestv* [Kinetics of decomposition of solids]. Moscow, Mir Publ., 1969. 263 p.
15. Stromberg A.G., Semchenko D.P. *Fizicheskaya khimiya* [Physical chemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 527 p.

Received 11 November 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Тепляков, Ю.Н. Кинетика фазообразования при распаде вюстита / Ю.Н. Тепляков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 14–25. DOI: 10.14529/met210102

FOR CITATION

Teplyakov Yu.N. Kinetics of Phase Formation during the Decay of Wustite. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 14–25. (in Russ.) DOI: 10.14529/met210102