

УДК 538.9/669.1

**Д. С. Титов, С. Б. Рыбалка, А. А. Лебедева, И. О. Мачихина**

Брянский государственный технический университет, Брянск

*kineticx@bk.ru* (почта организации)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РОСТА ФАЗ В ХОДЕ ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВЕ ТИПА $R_2Fe_{14}B$

Кинетика индуцированного водородом прямого фазового превращения в магнитотвердом сплаве  $R_2Fe_{14}B$  проанализирована в рамках кинетической модели Колмогорова. На основе кинетической теории фазовых превращений Колмогорова установлена зависимость скорости роста новых фаз в ходе фазовых превращений в сплаве типа  $R_2Fe_{14}B$  в зависимости от давления водорода при превращении.

*Ключевые слова:* кинетика, фазовые переходы, магнитные сплавы

**D. S. Titov, S. B. Rybalka, A. A. Lebedeva, I. O. Machikhina**

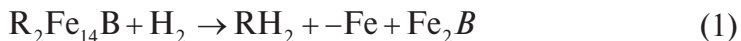
## DETERMINATION OF GROWTH RATE OF PHASES DURING PHASE TRANSFORMATION IN $R_2Fe_{14}B$ TYPE ALLOY

The kinetics of hydrogen-induced phase transformation in  $R_2Fe_{14}B$  type hard magnetic alloy has been analyzed in the framework of the Kolmogorov's kinetic model. On the basis of the kinetic theory of Kolmogorov phase transformations has been established the dependence of the rate growth of new phases during hydrogen-induced phase transformations in  $R_2Fe_{14}B$  type in dependence on hydrogen pressure during the transformation.

*Key words:* kinetics, phase transitions, magnetic alloys

Фазовые превращения являются основой обработки металлов и сплавов [1; 2]. Предложенная Такешитой новая технология, известная как HDDR-процесс (Hydrogenation-Decomposition-Desorption-Recombination), основана на фазовых превращениях, индуцированных водородом, и используется для повышения магнитных свойств магнитотвердых сплавов типа  $R_2Fe_{14}B$  [3]. Индуцированное водоро-

дом прямое фазовое превращение происходит в атмосфере водорода (~ 0,1 МПа) при 600–900 °С, когда в результате взаимодействия сплава с водородом исходный сплав  $R_2Fe_{14}B$  распадается на фазы по схеме [3]:



Последующее удаление водорода из распавшегося сплава приводит к развитию обратного фазового превращения с рекомбинацией распавшихся фаз в исходную  $R_2Fe_{14}B$  фазу. Использование прямых и обратных индуцированных водородом фазовых превращений в магнитотвердых сплавах  $R_2Fe_{14}B$  позволяет значительно улучшить не только их микроструктуру и магнитные свойства. Исследование кинетических закономерностей фазовых превращений, индуцированных водородом в  $R_2Fe_{14}B$ , позволит контролировать микроструктуру и магнитные свойства.

На рис. 1, а показаны экспериментальные результаты исследования кинетики индуцированного водородом прямого фазового превращения в сплаве  $R_2Fe_{14}B$  ( $R$  — Nd, Pr) при постоянной температуре 750 °С и давлениях водорода от 0,1 до 0,2 МПа. Как видно из рис. 1, а, при повышении давления водорода развитие фазового превращения значительно ускоряется.

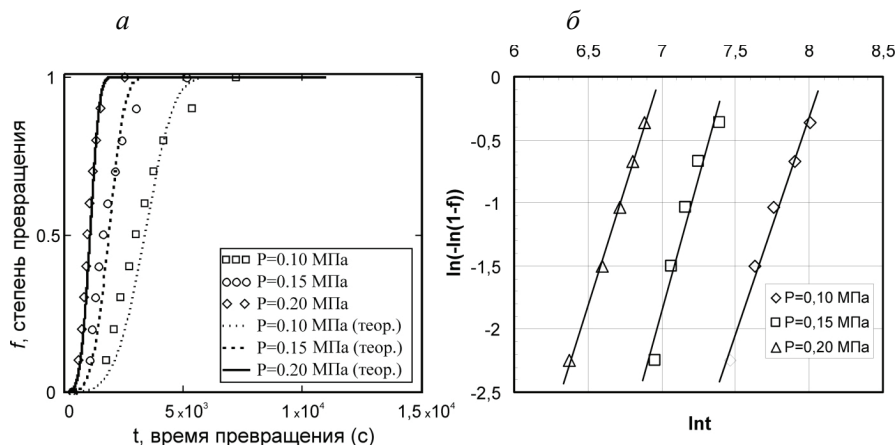


Рис. 1. Кинетика прямого фазового превращения в сплаве  $R_2Fe_{14}B$ :

а — при температуре 750 °С и различных давлениях водорода (точки — данные эксперимента, кривые — теоретический расчет);

б — зависимость  $\ln[-\ln(1-f)]$  от  $\ln t$ .

Анализ кинетики превращения был проведен в рамках теории Колмогорова, согласно которой [1, 2] степень превращения  $f$  может быть описана следующим выражением:

$$f = 1 - \exp(-kt^n), \quad (2)$$

где  $t$  — время превращения,  $k$  и  $n$  кинетические переменные.

Если экспериментальные результаты кинетики перестроить в координатах  $\ln[-\ln(1-f)] - \ln t$ , то возможно определить константу  $n$ , которая дает важную информацию о наиболее вероятных механизмах превращений [2]. Из рис. 1, б установлено, что при всех давлениях среднее значение  $n = 3,8$ , что близко к  $n = 4$ , как и в модели Колмогорова [1]. В соответствии с классификацией Кристиана [2], полученные значения  $n$  соответствуют превращениям с постоянной скорости зарождения  $I$  новой фазы. Константа  $k$  определяется через скорость зарождения новой фазы  $I$  и скорость роста новой фазы  $\omega$ :

$$k = \frac{\pi}{3} I \omega^3. \quad (3)$$

Скорость зарождения новой фазы  $I$  в соответствии с [1] равна:

$$I = \gamma \frac{RTe^{-\frac{U}{RT}}}{h}, \quad (4)$$

где  $T$  — температура превращения,  $\gamma = 10^{-6}$ ,  $U$  — энергия активации превращения,  $h$  — постоянная Планка,  $R$  — универсальная газовая постоянная. Из уравнений (3) и (4) скорость роста новой фазы  $\omega$  равна:

$$\omega = \sqrt[3]{\frac{3khe^{\frac{U}{RT}}}{\pi\gamma RT}}. \quad (5)$$

Далее были определены значения  $k$ , удовлетворительно описывающие кинетические кривые превращения (рис. 1, а). Затем, предполагая что энергия активации превращения близка энергии активации диффузии атомов Fe ( $U = 250$  кДж/моль), на основе уравнения (5) были рассчитаны скорости роста новой фазы  $\omega$  в зависимости от давления газообразного водорода (рис. 2).

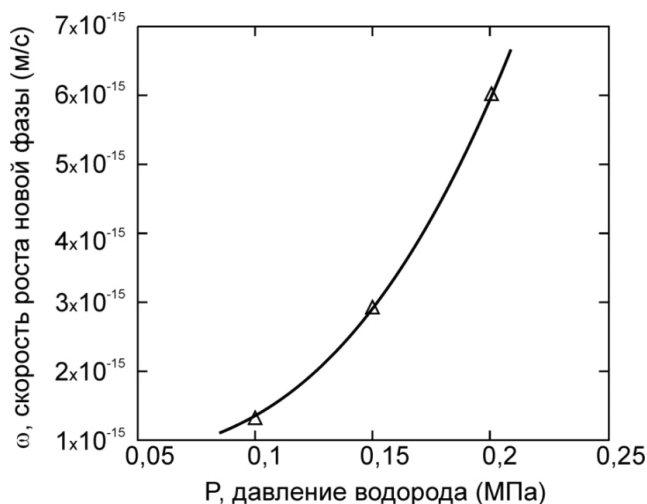


Рис. 2. Скорость роста новой фазы  $\omega$  в зависимости от давления водорода  $P$  при прямом фазовом превращения в сплаве  $R_2Fe_{14}V$  при температуре  $750\text{ }^\circ\text{C}$

Таким образом, из рис. 2 следует, что скорость роста новой фазы нелинейно возрастает с ростом давления газообразного водорода.

### Литература

1. Любов Б. Я. Кинетическая теория фазовых превращений. М. : Металлургия, 1969. 264 с.
2. Christian J. W. The Theory Transformations in Metals and Alloys. Oxford : Pergamon Press, 2002. 1193 p.
3. Liu Yi., Sellmyer D. J., Shindo D. Handbook of Advanced Magnetic Materials. Boston : Springer, 2006. 1802 p.