

УДК 669.15

А. А. Куikliна, Ю. В. Юдин, П. Д. Лебедев, М. В. Майсурадзе *

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

* *m. v.maisuradze@urfu.ru*

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ЗАРОЖДЕНИЯ НА КИНЕТИКУ ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

Методом имитационного моделирования установлено влияние скорости зарождения на кинетику фазового превращения в твердом состоянии. Показано, что при увеличении скорости зарождения повышается адекватность описания кинетики превращения уравнением Колмогорова — Джонсона — Мела — Аврами.

Ключевые слова: сталь, бейнит, кинетика, моделирование, изотермическое превращение, уравнение КДМА, уравнение Остина — Риккета

A. A. Kuklina, Yu. V. Yudin, P. D. Lebedev, M. V. Maisuradze

EFFECT OF THE NUCLEATION RATE ON THE PHASE TRANSFORMATION KINETICS

The effect of nucleation rate on the transformation kinetics is determined using algorithms of the computer simulation of solid state phase transformation. It is shown that the increase of the nucleation rate leads to the increase of the adequacy of the mathematical description of the transformation kinetics by the JMAK equation.

Key words: steel, bainite, kinetics, simulation, modeling, isothermal transformation, JMAK equation, Austin — Rickett equation

Имитационное моделирование фазового перехода было реализовано в программной среде MATLAB. Более подробно методика моделирования описана в работе [1]. Математическое описание кинетики фазового превращения осуществлено при помощи уравнений Колмогорова — Джонсона — Мела — Аврами (1) (КДМА) [2] и Остина — Риккета (2) (ОР) [3].

$$P = 1 - \exp(-k\tau^n), \quad (1)$$

$$P = 1 - (k\tau^n + 1)^{-1}, \quad (2)$$

где P — доля превращения; τ — время, с; k — температурно-зависимый коэффициент; n — показатель степени.

Проведена оценка влияния скорости образования новых зародышевых центров в процессе фазового превращения для первоначального неоднородного их распределения. Для этого в ходе превращения в объем куба добавлялись новые зародыши второй фазы с интенсивностью от 0,2 до 20 зародышей в такт. В итоге установлено, что при увеличении скорости зарождения второй фазы кинетическая кривая в логарифмических координатах КДМА стремится к линейному виду (рис. 1, а), а на кривой в координатах ОР появляется характерный перегиб (рис. 1, б). Тем самым понижается адекватность описания кинетики превращения уравнением ОР.

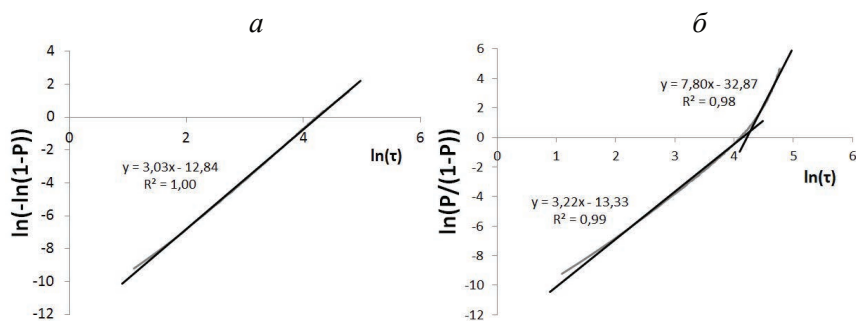


Рис. 1. Кинетические кривые фазового перехода в расчетном объеме куба при наличии градиента концентрации зародышей и скорости зарождения 5-ти зародышей/такт:

а — уравнение КДМА (1); б — уравнение ОР (2)

В качестве критерия, показывающего изменение кинетики превращения, было выбрано отношение суммы квадратов разностей между наблюдаемой кинетикой нарастания второй фазы и рассчитанной по уравнению КДМА ($S_{\text{КДМА}}$) к сумме квадратов разностей между наблюдаемой кинетикой и рассчитанной по уравнению ОР ($S_{\text{ОР}}$). Чем больше сумма квадратов разностей, тем ниже адекватность математического описания наблюдаемой кинетики каким-либо уравнением. Как показано на рис. 2, при нулевой скорости зарождения и исходном неравномерном расположении зародышей в объеме куба наблю-

дается максимальное значение отношения $S_{\text{КДМА}}/S_{\text{ОР}}$, то есть адекватность описания кинетики превращения выше для уравнения ОР. При повышении скорости зарождения выше 1-й частицы за такт отношение $S_{\text{КДМА}}/S_{\text{ОР}}$ резко уменьшается, что свидетельствует о повышении адекватности уравнения КДМА при описании кинетики превращения по сравнению с уравнением ОР.

Поскольку в подавляющем большинстве случаев экспериментально наблюдаемая кинетика изотермического бейнитного превращения наиболее адекватно описывается при помощи уравнения ОР, то, вероятнее всего, в процессе бейнитного превращения в исследуемых сталях не происходит образования новых зародышевых центров, либо скорость зарождения пренебрежимо мала. Превращение в этом случае реализуется главным образом за счет роста зародышей, сформировавшихся в объеме аустенита к моменту охлаждения от температуры аустенитизации до температуры изотермической выдержки ниже температуры начала бейнитного превращения.

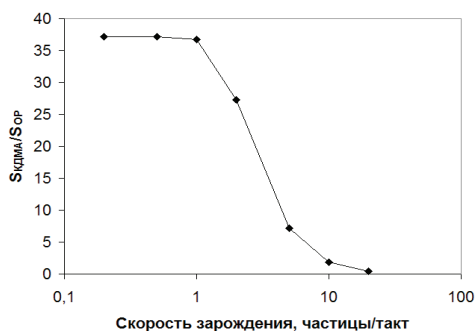


Рис. 2. Зависимость отношения суммы квадратов разностей между наблюдаемой кинетикой фазового превращения и рассчитанной по уравнениям КДМА и ОР от скорости зарождения

Таким образом, на начальном этапе бейнитное превращение реализуется по аналогии с мартенситным превращением: переохлаждение ниже термодинамически обоснованной температуры B_n приводит к формированию определенного количества зародышей, количество которых зависит от степени переохлаждения. Впоследствии данные зародыши растут послойно, равномерно, что характерно для диффузионно-контролируемого процесса, а новые зародыши в процессе выдержки не образуются.

Литература

1. Simulation of Isothermal Austenite Transformation in Steel / Yu. V. Yudin [et al.] // *Steel in Translation*. 2018. V. 48. № 10. P. 684–689.
2. Avrami M. Kinetics of phase change I. General theory // *Journal of Chemical Physics*. 1939. V.7. P. 1103–1112.
3. Austin J. B., Rickett R. L. Kinetics of the Decomposition of Austenite at Constant Temperature // *Transactions of American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*. 1939. V. 964. P. 1–20.