

УДК 669.15

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

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

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

## ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ БЕЙНИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ

При помощи имитационного моделирования фазового превращения в твердом состоянии определены основные факторы, влияющие на кинетику изотермического бейнитного превращения в легированных сталях. Показано, что первоначальная конфигурация расположения зародышей новой фазы в объеме металла, а также скорость зарождения оказывают значимое влияние на параметры процесса превращения.

*Ключевые слова:* сталь, бейнит, кинетика, превращение, моделирование, уравнение КДМА, логистическая функция.

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

## APPLICATION OF COMPUTER SIMULATION FOR INVESTIGATION OF ISOTHERMAL BAINITE TRANSFORMATION IN STEELS

The main factors affecting the kinetics of isothermal bainite transformation in alloyed steels are determined using the computer simulation of solid state phase transformation. It is shown that the initial configuration of the new phase nuclei in the metal volume and nucleation rate have a significant effect on the bainite transformation parameters.

*Key words:* steel, bainite, kinetics, transformation, simulation, modeling, KJMA equation, logistic function.

Экспериментально установлено, что для большинства сталей на кинетических кривых изотермического бейнитного превращения, построенных в логарифмических координатах уравнения Колмогорова-Джонсона-Мела-Аврами (КДМА) [1], в основном наблюдается перегиб, характеризуемый изменением показателя степени  $n$ . В свою очередь, кинетические кривые в логарифмических координатах логистической функции [2] практически всегда имеют линейный вид.

При помощи имитационного моделирования фазового превращения по методике [3] было показано, что описание кинетики фазового перехода при помощи уравнения КДМА в случае равномерно расположенных зародышей имеет вид, близкий к линейному в логарифмических координатах, а в случае неоднородного распределения зародышей в объеме появляется перегиб на кинетической кривой. При этом кинетические кривые в логарифмических координатах логистической функции обладают противоположными характеристиками в данном плане.

Иными словами, максимальное приближение расчетной кинетики фазового превращения к экспериментально наблюдаемой кинетике бейнитного превращения в сталях наблюдается для случая неоднородного распределения зародышевых центров в объеме (при наличии существенного градиента локальной концентрации зародышей).

Проведена оценка влияния скорости образования новых зародышевых центров в процессе превращения для первоначального неоднородного их распределения. Для этого в ходе превращения в объем  $400^3$  ячеек добавлялись новые зародыши второй фазы с интенсивностью от 0,2 до 20 зародышей в расчетный такт времени. В результате установлено, что при нулевой скорости зарождения и исходном неравномерном расположении зародышей в расчетном объеме адекватность описания кинетики превращения выше для логистической функции. При повышении скорости зарождения более 1 частицы за такт происходит повышение адекватности уравнения КДМА при описании кинетики фазового превращения по сравнению с логистической функцией.

Поскольку в подавляющем большинстве случаев экспериментально наблюдаемая кинетика изотермического бейнитного превращения в сталях наиболее адекватно описывается при помощи логистической функции, то, вероятнее всего, в процессе бейнитного превращения большинства сталей 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.

Таким образом, характер бейнитного превращения в стали обусловлен неоднородной конфигурацией распределения в объеме аустенита зародышевых центров, способных к росту при конкретной температуре изотермической выдержки, а также пренебрежимо малой скоростью образования новых зародышей в процессе превращения.

### **Литература**

1. Avrami M. Kinetics of phase change I. General theory // *Journal of Chemical Physics*. 1939. V. 7. P. 1103–1112.
2. Maisuradze M. V., Yudin Yu. V., Kuklina A. A. A Novel Approach for Analytical Description of the Isothermal Bainite Transformation in Alloyed Steels // *Materials Performance and Characterization*. 2019. V. 8. № 2. P. 80–95.
3. Yudin Yu. V. Simulation of Isothermal Austenite Transformation in Steel / Yu. V. Yudin [et al] // *Steel in Translation*. 2018. V. 48. № 10. P. 684–689.