

УДК 669.72

***А. А. Куклина\**, *Ю. В. Юдин*, *М. В. Майсурадзе***

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург

\**kuklina.aleksandra@rambler.ru*,

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук *Ю. В. Юдин*

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КИНЕТИКИ БЕЙНИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ 300М И 50ХМФА

Предложено два типа уравнений аналитического описания кинетики бейнитного превращения. Проведено сравнение между предложенными уравнениями и уравнением Колмогорова – Джонсона – Мейла – Авраами. Определено отношение табличного и расчетного критериев Фишера для оценки адекватности описания предложенными уравнениями кинетики распада переохлажденного аустенита.

*Ключевые слова:* кинетика, уравнение Колмогорова – Джонсона – Мейла – Авраами, сталь 300М, сталь 50ХМФА, критерий Фишера.

***A. A. Kuklina, Yu. V. Yudin, M. V. Maysuradze***

## ANALYTICAL DESCRIPTION OF THE KINETICS OF BAINITE TRANSFORMATION IN STEEL 300M AND 50KhMFA

Two analytical equations describing the kinetics of bainite transformation are proposed. A comparison between the proposed equation and Kolmogorov – Johnson – Mehl – Avrami is conducted. The adequacy of the two analytical models is estimated using Fisher test.

*Keywords:* kinetics, Kolmogorov – Johnson – Mehl – Avrami equation, 300M steel, 50KhMFA steel, Fisher's test.

Аналитическое описание кинетики распада метастабильных твердых растворов, в частности аустенита конструкционных сталей, наиболее часто производится с помощью уравнения Колмогорова – Джонсона – Мейла – Авраами (КДМА) [1].

Однако на практике при анализе экспериментальной кинетики изотермического превращения переохлажденного аустенита наблюдаются весьма существенные отклонения от общепринятой теории [2]. Решение проблемы состоит в отыскании функции, которая обеспечила бы наилучшую аппроксимацию результатов эксперимента.

Для аналитического описания кинетики образования бейнита в изотермических условиях использовали данные для стали 300М, опубликованные в [3]. Химический состав стали 300М (масс, %): 0,44 % С – 1,7 % Si – 0,67 % Mn – 1,85 % Ni – 0,83 % Cr – 0,39 % Mo – 0,99 % V [3].

Графики кинетики образования бейнита в стали 300М оцифрованы с помощью программного обеспечения *GetData Graph Digitizer 2.26*.

Проведены исследования кинетики образования изотермического бейнита стали 50ХМФА на высокоскоростном дилатометре *Linseis L78 "R.I.T.A."* в температурном диапазоне 300–400 °С. Химический состав стали 50ХМФА (масс. %): 0,5 % С; 1,0 % Cr; 0,9 % Мо; 0,45 % Ni; 0,12 % V; 0,8 % Mn; 0,25 % Si; 0,015% S; 0,010% P.

Предложены два типа уравнений для аналитического описания и сравнения кинетики распада переохлажденного аустенита в бейнитной области с классическим уравнением КДМА.

Кинетику образования второй фазы обычно описывают уравнением Колмогорова – Джонсона – Мейла – Аврами (КДМА):

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

где  $P$  – объемная доля образованной фазы;  $\tau$  – время изотермической выдержки, с;  $k$ ,  $n$  – постоянные параметры уравнения.

Коэффициенты получены из уравнения линии тренда в координатах  $\ln(\ln(1/(1-P)))$  от логарифма времени (рис. 1). Наблюдается существенное отклонение расчетных данных по уравнению КДМА от экспериментальных для обеих марок сталей.

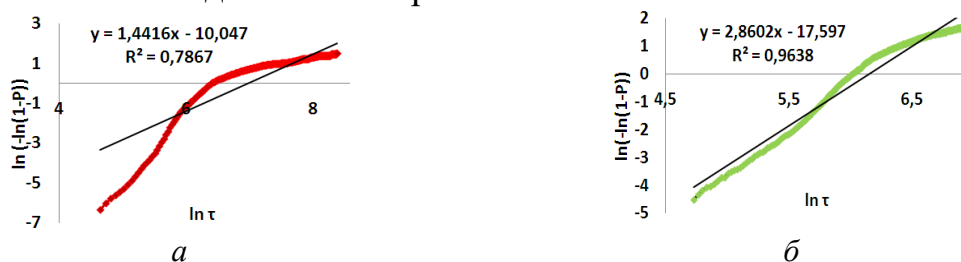


Рис. 1. Кинетика распада переохлажденного аустенита в бейнитной области в координатах  $\ln(-\ln(1-P))$  от  $\ln \tau$ : а – сталь 300М, температура изотермической выдержки – 320 °С [3], б – сталь 50ХМФА, температура изотермической выдержки – 330 °С

Учитывая существенную нелинейность экспериментальных данных  $\ln(-\ln(1-P))$  от  $\ln \tau$  кинетика промежуточного превращения в координатах  $\ln(-\ln(1-P))$  от логарифма времени  $\ln \tau$  может быть описана полиномом второй степени (условно первый тип уравнения (рис. 2)).

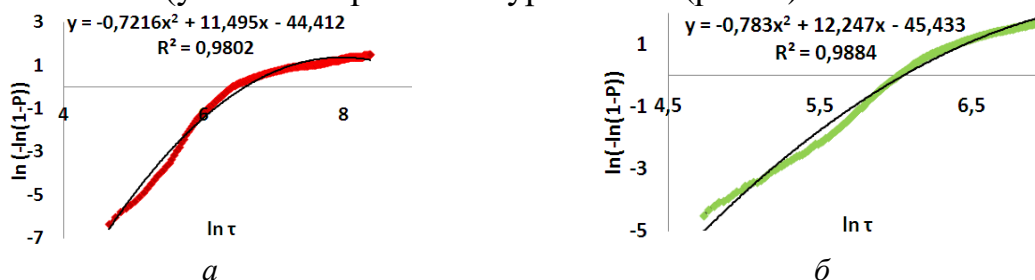


Рис. 2 Кинетика распада переохлажденного аустенита в бейнитной области в координатах  $\ln(-\ln(1-P))$  от логарифма времени  $\ln \tau$ : а – сталь 300М, температура изотермической выдержки – 320 °С [3]; б – сталь 50ХМФА, температура изотермической выдержки – 330 °С

Второй тип уравнений можно обосновать следующим образом. Кинетический параметр  $n$  уравнения КДМА численно равен первой производной двойного логарифма доли превращения по логарифму времени, а величина  $\ln k$  является свободным членом уравнения касательной к графику зависимости  $\ln(-\ln(1-P))$  от  $\ln \tau$ . Следовательно, используя известное уравнение касательной к кривой и учитывая линейную зависимость  $\ln k$  от параметра  $n$  [4]:

$$\ln k = a \cdot n + b \quad (4)$$

можно записать следующее дифференциальное уравнение вида:

$$y(x) = ay'(x) + b, \quad (5)$$

где  $x = \ln \tau$ ,  $y(x) = \ln(-\ln(1-p))$ . (6)

Решением дифференциального уравнения (5) является уравнение вида:

$$y(x) = C_1 \exp(C_2 x) + C_3. \quad (7)$$

Учитывая уравнения (6), приходим к уравнению:

$$\ln(-\ln(1-p)) = C_1 \exp(C_2 \ln \tau) + C_3, \quad (8)$$

и в конечном итоге зависимость кинетики бейнитного превращения от времени изотермической выдержки (рис. 3) выразится уравнением

$$P = 1 - \exp(-(\exp(C_1 \tau^{C_2}) \exp C_3)), \quad (9)$$

где  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  являются константами для каждой температуры изотермической выдержки и в обобщенном виде функциями температуры бейнитного превращения (условно уравнение 2 типа).

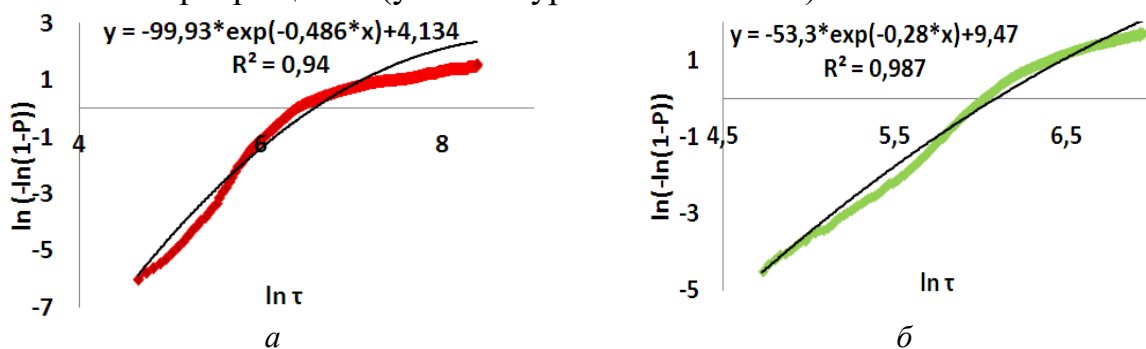


Рис. 3. Кинетика распада переохлажденного аустенита в бейнитной области в координатах  $\ln(-\ln(1-P))$  от  $\ln \tau$ : а – сталь 300М, температура изотермической выдержки 320 °С [3]; б – сталь 50ХМФА, температура изотермической выдержки 330 °С

На рис. 4 представлена экспериментальная кинетика бейнитного превращения для сталей 300М и 50ХМФА при температурах изотермической выдержки 340 и 330 °С соответственно и расчетная кинетика.



Рис. 4. Кинетика бейнитного превращения: *a* – сталь 300М; температура изотермической выдержки 340 °С; *б* – сталь 50ХМФА; температура изотермической выдержки 330 °С

Разность между экспериментальными и расчетными долями бейнитного превращения по рассмотренным уравнениям в сталях 300М и 50ХМФА для температур изотермических выдержек 340, 330 °С показана на рис. 4. Для исследуемых сталей наилучшим образом кинетика бейнитного превращения описана дифференциальным уравнением (на рис. обозначено уравнение 2), минимальная разность между экспериментальными и расчетными данными. Описание с помощью уравнения КДМА показало максимальную разность между экспериментальными и расчетными данными более 25 % для стали 300М, 20 % для 50ХМФА.

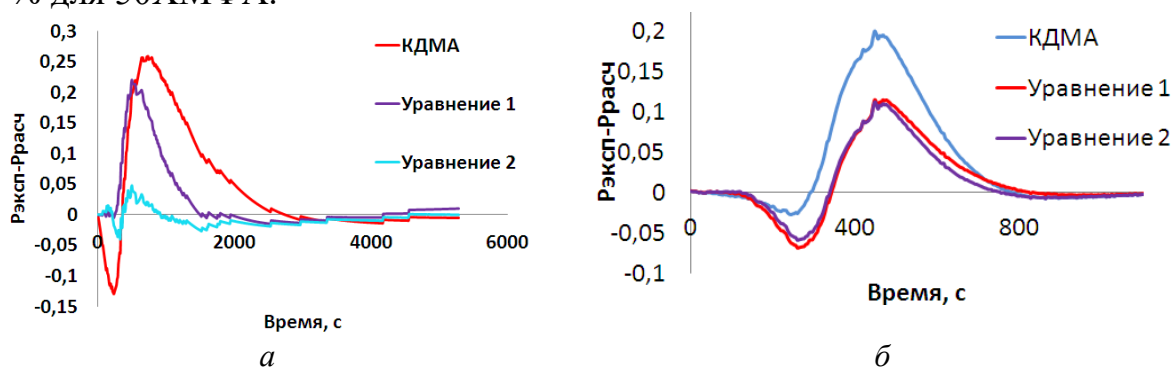


Рис. 5. Разность экспериментальных и расчетных долей бейнитного превращения: *a* – сталь 300М; температура изотермической выдержки 340 °С; *б* – сталь 50ХМФА; температура изотермической выдержки 330 °С

С помощью отношения табличного и расчетного критерия Фишера определена адекватность описания предложенными уравнениями кинетики распада переохлажденного аустенита. Построены столбчатые диаграммы отношения  $F_T/F_p$  от температуры изотермической выдержки. Для сталей

300М и 50ХМФА в температурном диапазоне 300–400 °С отношение критериев Фишера описания КДМА минимальное по сравнению с уравнениями 1, 2.

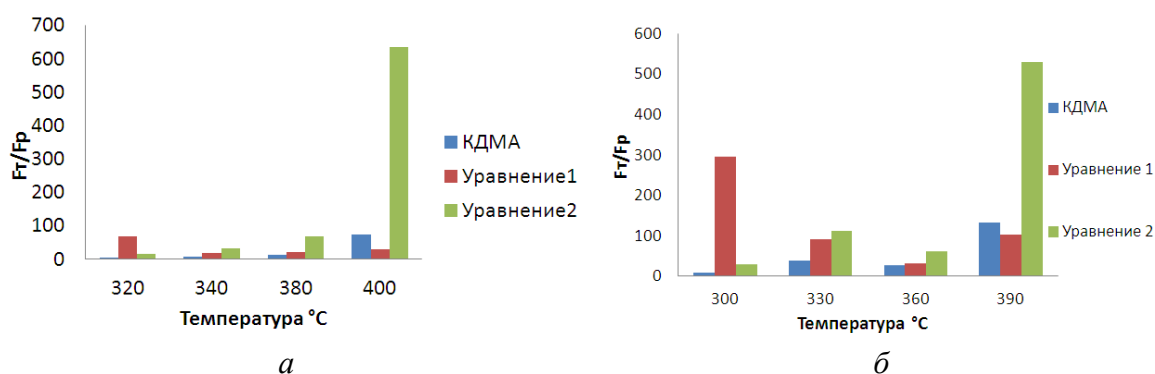


Рис. 6 Диаграмма отношения  $F_t/F_p$  от температуры изотермической выдержки: а – сталь 300М; б – сталь 50ХМФА.

Предложены новые аналитические описания кинетики бейнитного превращения в температурном диапазоне 300–400 °С для сталей 300М и 50ХМФА. По сравнению с ранее применяемым уравнением Колмогорова – Джонсона – Мейла – Аврами они обладают существенно большей адекватностью экспериментальным данным согласно отношению табличного и расчетного критериев Фишера.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колмогоров А. Н. К статистической теории кристаллизации металлов // Известия АН СССР. 1937. № 3. С. 355–359.
2. Finite Element Analysis Of Temperature Field With Phase Transformation And Non-Linear Surface Heat-Transfer Coefficient During Quenching / С. Heming [et al.] // Applied Mathematics and Mechanics. Vol. 19. № 1. 1998. P. 15–20.
3. Khan S. A., Bhadeshia H. K. D. H. The Bainite Transformation in Chemically Heterogeneous 300M High-Strength Steel // Metallurgical transactions A. Volume 21A. April. 1990. 863 p.
4. Куклина А. А. Майсурадзе М. В. Юдин Ю. В. Обоснование кинетического уравнения распада переохлажденного аустенита в бейнитной области хромоникельмолибденовых сталей // Молодежный научный форум: Технические и математические науки: электронный сборник статей по материалам XXXII Студенческой международной заочной научно-практической конференции. М. : Изд. МЦНО. 2016. № 3 (32). С. 37–43.