

УДК 669.15-194.3

А. А. Куклина^{*}, Ю. В. Юдин, А. Ю. Ишенькина, 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*

КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ БЕЙНИТА В СТАЛИ 25Г2С2Н2МА В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Кинетика образования бейнита в стали 25Г2С2Н2МА в изотермических условиях исследована металлографическим, dilatометрическим и дюрометрическим методами. Проведено аналитическое описание изотермического бейнитного превращения с помощью уравнения КДМА и логистической функции. Установлено, что описание кинетики бейнитного превращения уравнением КДМА дает в температурном интервале 350...400 °С существенно худшее приближение к экспериментальной кинетике по сравнению с логистической функцией для использованных методов исследования.

Ключевые слова: сталь, бейнитное превращение, металлография, dilatометрия, дюрометрия, КДМА, логистическая функция, 25Г2С2Н2МА.

A. A. Kuklina, Yu. V. Yudin, A. Y. Ishenkina, M. V. Maisuradze

KINETICS OF BAINITE TRANSFORMATION IN STEEL 25G2S2N2MA UNDER ISOTHERMAL CONDITIONS

The kinetics of the bainite transformation in 25G2S2N2MA steel is investigated by metallographic, dilatometric and durometric analysis under isothermal conditions. Two analytical equations (Kolmogorov – Johnson – Mehl – Avrami and logistic) describing the kinetics of bainite transformation are proposed. It is shown that the description of the bainitic transformation kinetics by the KJMA equation in the temperature range 350...400 °C yields sufficiently poorer approximation of the experimental kinetics in comparison with the logistic function.

Keywords: steel, bainite transformation, metallography, dilatometry, durometry, KJMA, logistic function, 25G2S2N2MA.

В настоящее время высокопрочная сталь 25Г2С2Н2МА широко используется за рубежом для производства бурового инструмента, в связи с этим проявляется практический интерес к изучению бейнитного превращения в данной стали.

Целью настоящей работы является исследование распада переохлажденного аустенита стали 25Г2С2Н2МА в бейнитной области при изотермической выдержке.

Материалом исследования является сталь 25Г2С2Н2МА промышленной выплавки. Исходная прокатанная заготовка имела диаметр 120 мм. Химический состав исследуемой стали приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали 25Г2С2Н2МА, масс. %

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	P	S
25Г2С2Н2МА	0.24	1.42	1.35	0.31	1.71	0.4	0.16	0.028	0.008	0.004

Проведен металлографический, дюрOMETрический, дилатометрический анализ распада переохлажденного аустенита стали 25Г2С2Н2МА по второй ступени в изотермических условиях в температурном интервале 350...400 °С. Температура аустенитизации составляла 925 °С, время выдержки 40 мин.

Кинетика изотермического распада переохлажденного аустенита при температурах 350 и 400 °С представлена на рис. 1.

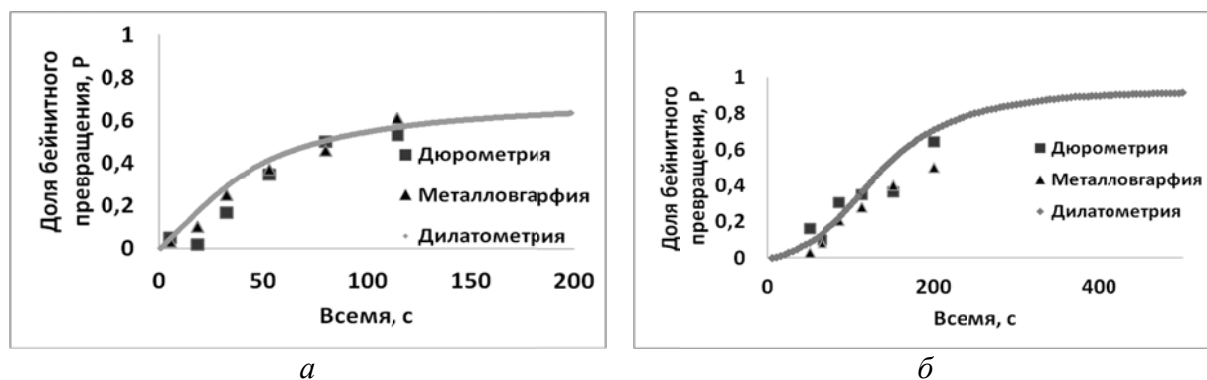


Рис. 1. Кинетика изотермического бейнитного превращения в стали 25Г2С2Н2МА при температурах: *a* – 350 °С, *б* – 400 °С

Уравнение Колмогорова–Джонсона–Мела–Аврами (КДМА) (1) позволяет оценить кинетику формирования новых фаз и структурных составляющих при изотермической выдержке с течением времени:

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

где P – доля превращенного аустенита; τ – время, с; k , n – температурно-зависимые коэффициенты.

Экспериментальные данные были построены в координатах « $\ln(-\ln(1-P)) - \ln t$ » и аппроксимированы линейной зависимостью от логарифма времени изотермической выдержки $\ln t$. Для температуры изотермической выдержки 400 °С кинетика распада переохлажденного аустенита, полученная дюрOMETрическим, металлографическим, дилатометрическим методами приведена на рис. 2.

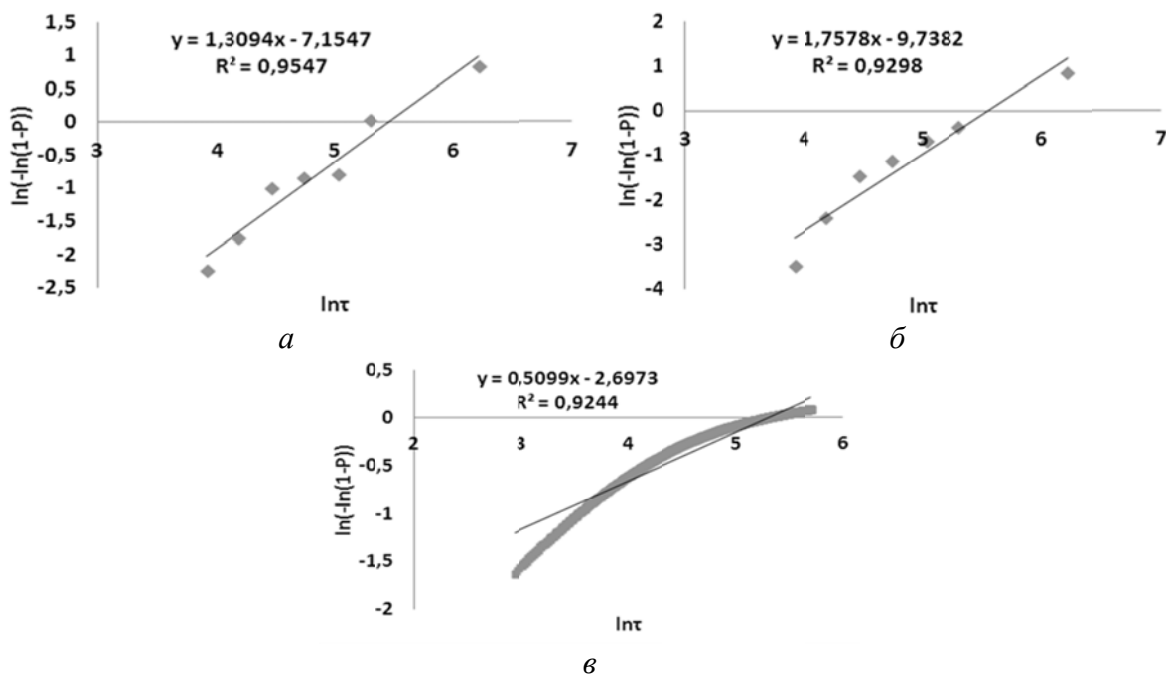


Рис. 2. Изменение параметра $\ln(-\ln(1-P))$ от логарифма времени $\ln t$ при изотермической выдержке 400 °С, полученное: а – дюрOMETрическим методом; б – металлографическим методом; в – дилатометрическим методом

Учитывая существенную нелинейность экспериментальных данных в координатах « $\ln(-\ln(1-P)) - \ln t$ » было предложено описать исходную кинетику превращения с помощью логистической функции:

$$P = 1 - P^{\max}_t / \{1 + \exp[b + a \cdot \ln(\tau)]\}, \quad (2)$$

где P – доля образующегося бейнита; τ – время, с; P^{\max}_t – максимальное равновесное количество бейнита, образующегося при температуре изотермической выдержки t ; a , b – температурно-зависимые коэффициенты, постоянные в течение времени изотермической выдержки при конкретной температуре.

На рис. 3 приведено изменение логарифма $\ln((1/P)-1)$ от $\ln t$ для логистической функции при изотермической выдержке 400 °С для стали 25Г2С2Н2МА. Коэффициенты a и b логистической функции постоянны, поскольку описываются прямой в координатах $\ln((1/P)-1)$ от $\ln t$ с высоким коэффициентом детерминации R^2 .

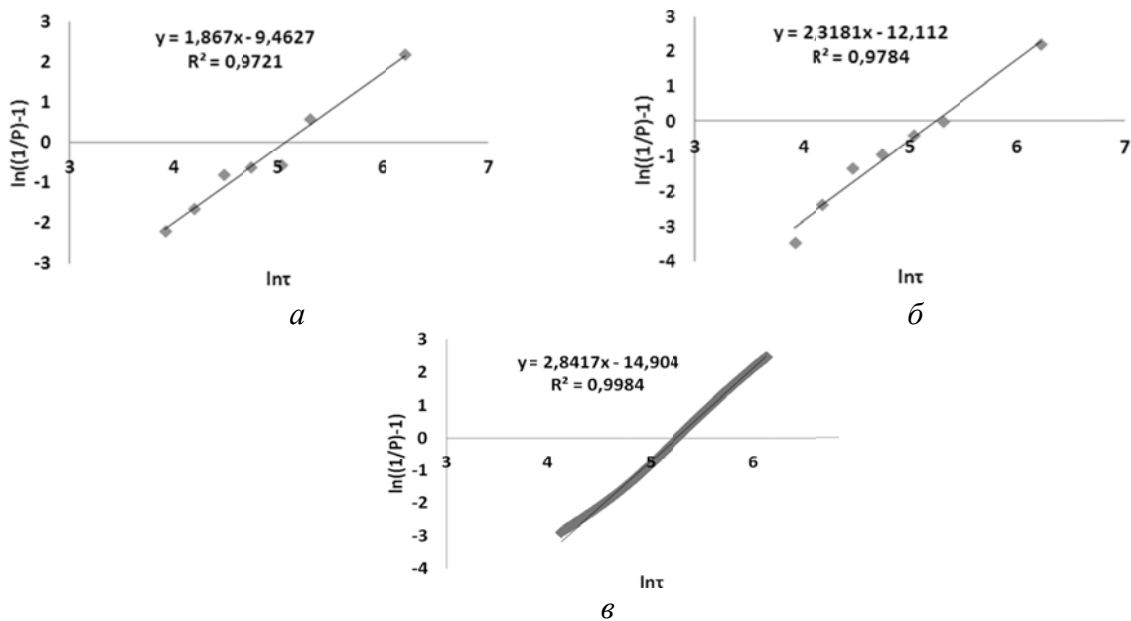


Рис.3. Изменение логарифма $\ln((1/P)- 1)$ от логарифма времени $\ln\tau$ при изотермической выдержке 400 °С, полученное: *а* – дюрOMETрическим методом; *б* – металлографическим методом; *в* – дилатометрическим

Экспериментальная кинетика распада переохлажденного аустенита, полученная дюрOMETрическим (рис. 4, *а*), металлографическим (рис. 4, *б*) и дилатометрическим методами (рис. 4, *в*), описана уравнением КДМА и логистической функцией.

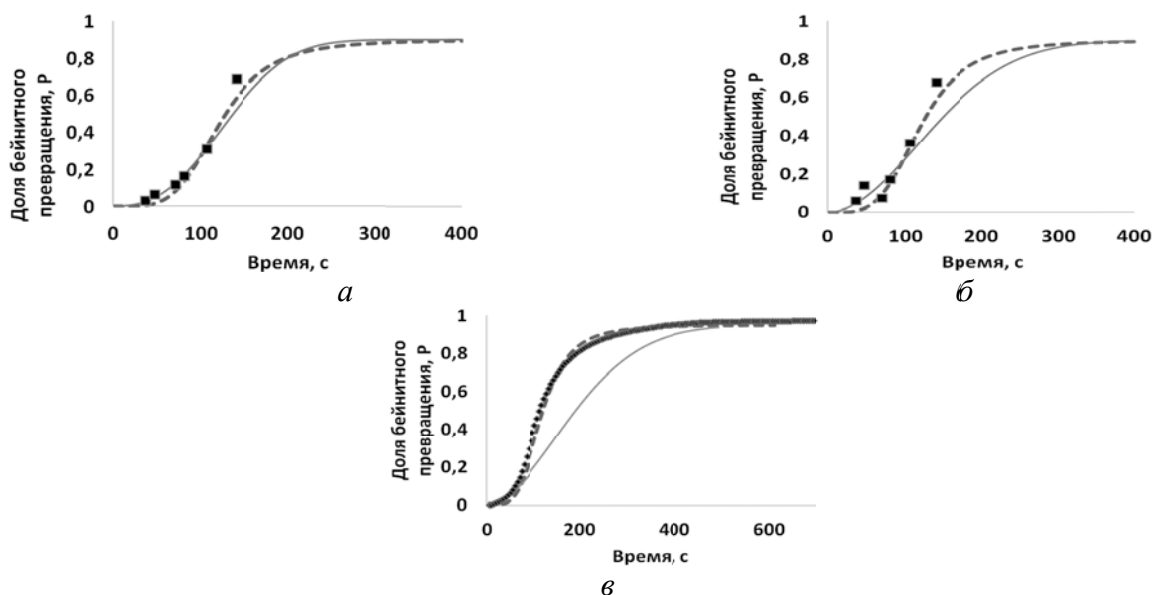


Рис. 4. Экспериментальная кинетика распада переохлажденного аустенита стали 25Г2С2Н2МА, температура изотермической выдержки 370 °С, полученная: *а* – дюрOMETрическим методом; *б* – металлографическим методом; *в* – дилатометрическим методом (сплошная линия – описание уравнением КДМА; пунктирная линия – описание логистической функцией; черные маркеры – экспериментальные значения)

Определены суммы квадратов разности между экспериментальными и расчетными значениями доли бейнита, полученными с использованием уравнения КДМА и логистической функции для описания данных дюрOMETрического, металлографического и дилатометрического анализа.

Описание кинетики бейнитного превращения уравнением КДМА дает во всем температурном интервале худшее приближение к экспериментальной кинетике по сравнению с логистической функцией. Значения суммы квадратов разности экспериментальных и расчетных значений доли превращения при описании уравнением КДМА в 2...45 раз больше суммы квадратов разности при применении логистической функции в температурном интервале 350...400 °C (рис. 5).

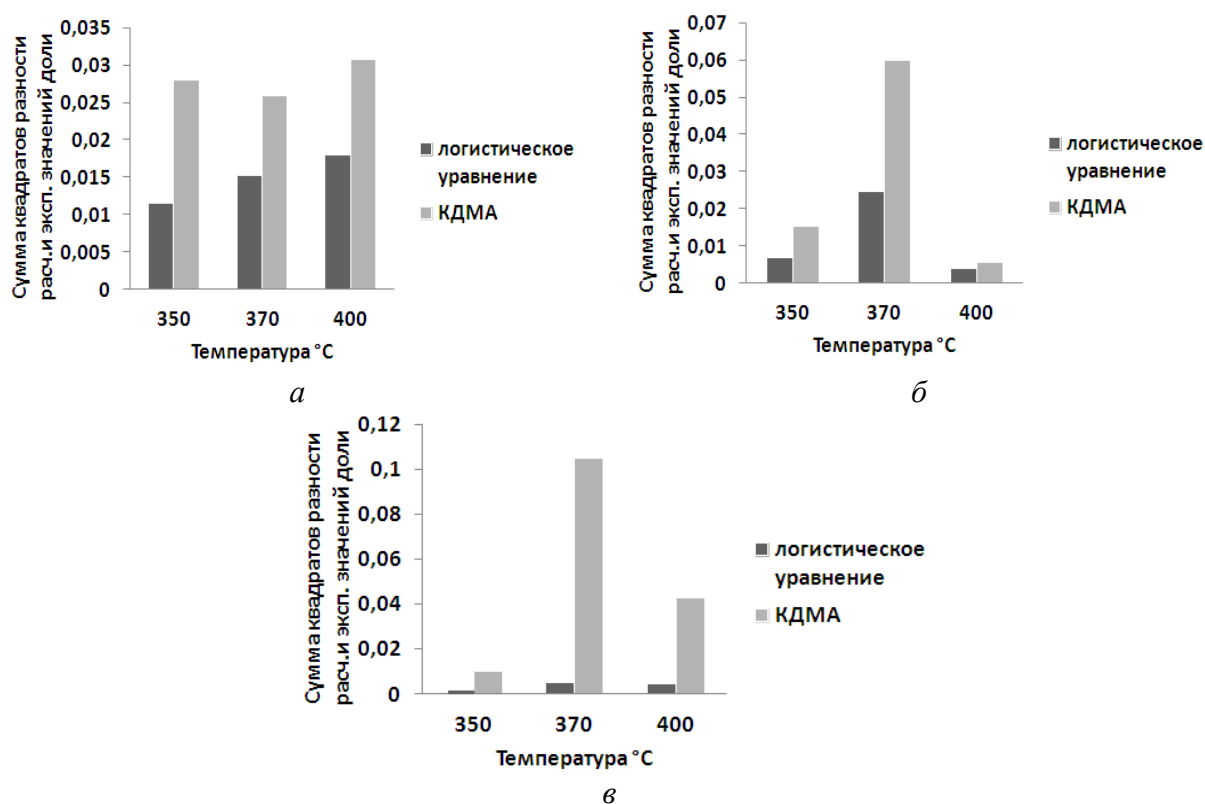


Рис. 5. Сумма квадратов разностей экспериментальной и расчетной кинетики бейнитного превращения в стали 25Г2С2Н2МА: а – дюрOMETрический метод; б – металлографический метод; в – дилатометрический метод

Таким образом, аналитическое описание логистической функцией кинетики бейнитного превращения в стали 25Г2С2Н2МА в температурном диапазоне 350...400 °C обладает существенно большей адекватностью по сравнению с описанием уравнением КДМА.

Работа выполнена в рамках Гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук МК-7929.2016.8.