

*М. В. Майсурадзе<sup>1\*</sup>, Ю. В. Юдин<sup>1</sup>, А. А. Куклина<sup>1</sup>, А. В. Ли<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>НИТУ МИСиС, г. Москва

\**spirallog@gmail.com*

## ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЙНИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В ВЫСОКОПРОЧНОЙ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКЕ

Исследована кинетика изотермического бейнитного превращения аустенита в высокопрочной машиностроительной стали 25Г2С2Н2МА промышленной выплавки. Произведено математическое моделирование кинетики бейнитного превращения в исследуемой стали при помощи уравнения Колмогорова–Джонсона–Мела–Аврами и логистической функции. Изучена формируемая микроструктура стали.

*Ключевые слова:* сталь, термическая обработка, изотермическая выдержка, бейнит, моделирование.

*M. V. Maisuradze, Yu. V. Yudin, A. A. Kuklina, A. V. Lee*

## THE INVESTIGATION OF THE ISOTHERMAL BAINITE TRANSFORMATION IN HIGH STRENGTH ALLOYED STEEL

The kinetics of the isothermal bainite transformation in commercial high strength engineering steel HY-TUF is investigated. A mathematical modeling of the kinetics of bainite transformation is carried out using the Kolmogorov–Johnson–Mehl–Avrami equation and the logistic function. The microstructure of the HY–TUF steel is studied.

*Keywords:* steel, heat treatment, isothermal holding, bainite, modeling.

В последнее время зарубежные производители бурового оборудования широко применяют сталь 25Г2С2Н2МА, используя в качестве термической обработки закалку и высокотемпературный отпуск. Однако, как показали исследования [1–3], после такой термической обработки сталь обладает пониженным уровнем пластичности и вязкости. Для повышения комплекса механических свойств данной стали можно использовать закалку, направленную на формирование бейнитной структуры, сочетающей как высокую прочность, так и высокую вязкость. Для расчетного определения необходимых температурно-временных

параметров такой обработки необходимо построить математическую модель бейнитного превращения.

Химический состав исследуемой стали 25Г2С2Н2МА промышленной выплавки приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали 25Г2С2Н2МА, масс. %

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Cu	S	P
0,24	1,42	1,35	0,31	1,71	0,40	0,01	0,16	0,004	0,008

Кинетику изотермического превращения в температурном интервале формирования бейнитной структуры изучали при помощи дилатометра LINSEIS L78 R.I.T.A. Температура аустенитизации была принята равной 925 °С, скорость охлаждения до температуры изотермической выдержки составляла 30 °С/с. Изотермическая выдержка осуществлялась при температуре от 330 до 490 °С в течение 2 ч.

На рис. 1, а приведены зависимости доли превращения аустенита в бейнит от времени выдержки при различных температурах. Установлено, что бейнитное превращение в исследуемой стали до конца не идет. Количество бейнита в структуре стали после приостановки превращения оценивалась металлографическим методом при помощи программного обеспечения. Максимальная доля бейнита наблюдается при температуре изотермической выдержки 370...400 °С и составляет 70...75 %. С повышением температуры выдержки от 370 до 490 °С доля бейнита в стали 25Г2С2Н2МА уменьшается до 8...10 % (рис. 1, б).

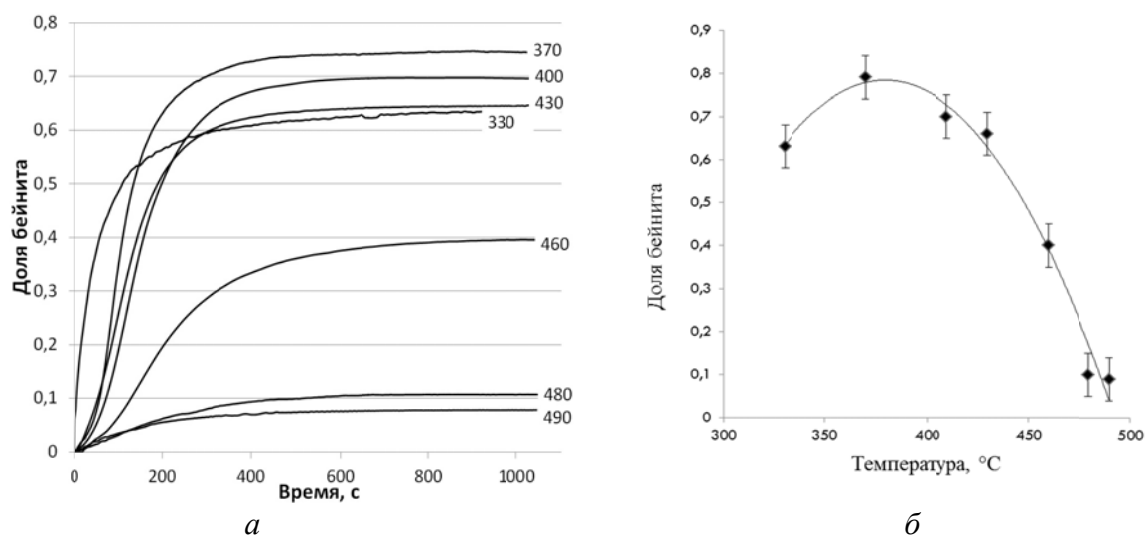


Рис. 1. Экспериментальная кинетика изотермического бейнитного превращения в стали 25Г2С2Н2МА (а) и соответствующая максимально достигаемая доля бейнита в стали при изотермической выдержке (б) (цифры у кривых – температура в °С)

При температуре выдержки 330 °С кинетика образования бейнита отличается от кинетики бейнитного превращения при более высоких температурах. Это связано с тем, что данная температура выдержки находится ниже температуры начала мартенситного превращения ( $M_n = 340$  °С). Образовавшийся при охлаждении до температуры изотермической выдержки мартенсит (35 % согласно дилатометрическим данным) оказывает благоприятное влияние на дальнейшее образование бейнита, являясь готовой подложкой для зарождения и роста пластин бейнита, что также отмечено в работе [4]. Вследствие этого скорость превращения на начальных этапах выдержки при температуре 330 °С оказывается больше, чем при температурах выше  $M_n$ .

Фрагмент изотермической диаграммы превращения аустенита в стали 25Г2С2Н2МА в бейнитной области, построенный на основании данных дилатометрии и металлографии, приведен на рис. 2. При температуре выдержки ниже  $M_n$  наблюдается минимальная устойчивость аустенита, при этом формируется нижний бейнит, имеющий мартенситоподобную пакетную морфологию (рис. 3, а). При повышении температуры выдержки выше  $M_n$  инкубационный период превращения увеличивается и при температуре 400 °С составляет 50 с. В микроструктуре наряду с пакетным нижним бейнитом начинает формироваться гранулярный верхний бейнит (рис. 3, б).

При повышении температуры выдержки до 430 °С инкубационный период превращения снова уменьшается до 35 с. В структуре образуется преимущественно верхний бейнит (рис. 3, в). При дальнейшем повышении температуры выдержки в структуре формируется только верхний бейнит, а его количество уменьшается (рис. 3, г).

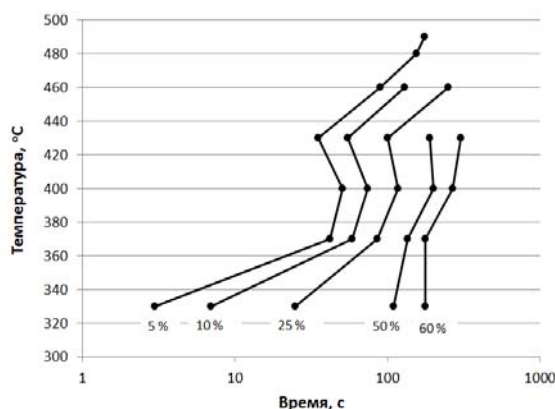


Рис. 2. Фрагмент изотермической диаграммы превращения переохлажденного аустенита в стали 25Г2С2Н2МА в температурном интервале бейнитного превращения

Математическое описание кинетики изотермического бейнитного превращения производили двумя способами: при помощи уравнения КДМА [5] и логистической функции [6]. Установлено, что в

температурном интервале 330...460 °С наилучшее описание экспериментальных данных дает логистическая функция. При этом погрешность описания экспериментальной кинетики превращения уравнением КДМА до 10...15 раз выше, чем при использовании логистической функции. При более высоких температурах изотермической выдержки, когда образуется незначительное количество бейнита (8...10 %) погрешность обоих методов моделирования примерно одинакова.

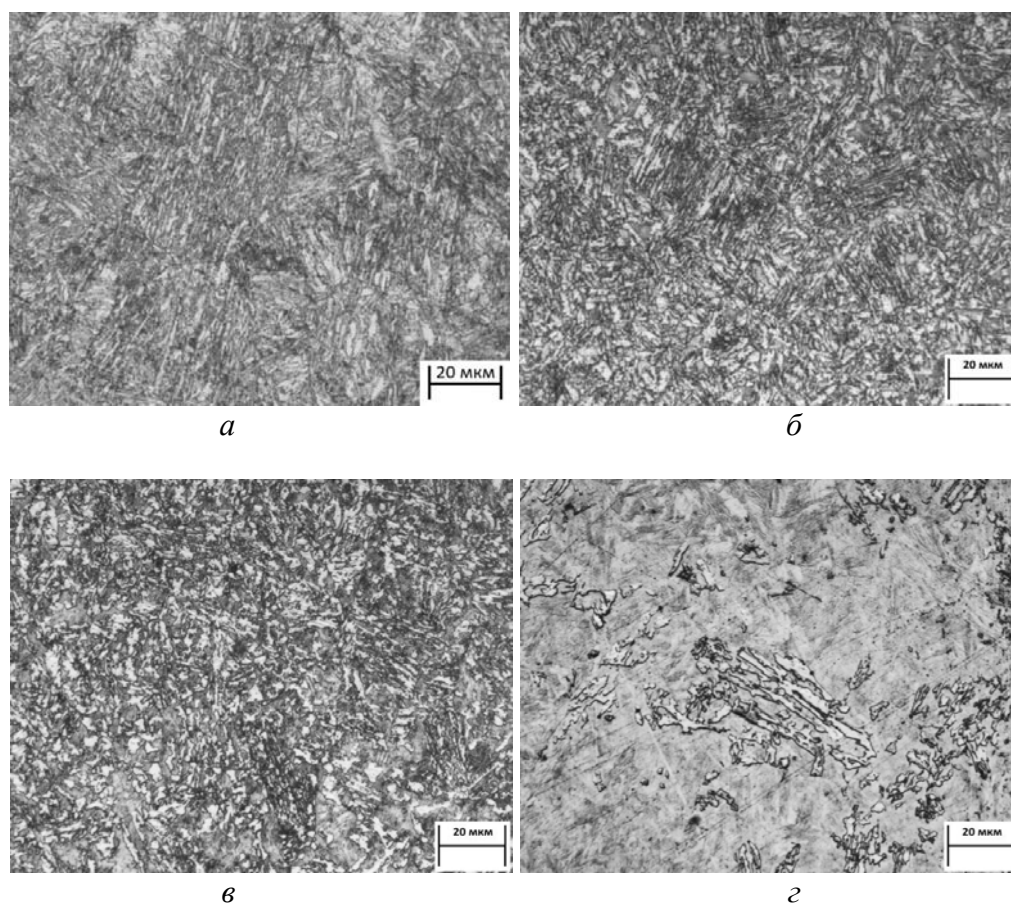


Рис. 3. Микроструктура стали 25Г2С2Н2МА после изотермической выдержки при температуре: *а* – 330 °С; *б* – 400 °С; *в* – 430 °С; *г* – 490 °С

Проведенные исследования позволили определить температурную зависимость коэффициентов логистической функции, описывающей кинетику изотермического бейнитного превращения (рис. 4). Как видно, полученные зависимости носят плавный характер с экстремумом при температуре выдержки 370...400 °С. Наблюдаемый экстремум может свидетельствовать о смене механизма бейнитного превращения (переход от образования нижнего бейнита к формированию верхнего бейнита).

Полученные зависимости, совместно с зависимостью максимальной доли бейнита от температуры выдержки, можно использовать в дальнейшем при численном моделировании термической обработки стали

25Г2С2Н2МА, направленной на формирование структуры с требуемой морфологией бейнита.

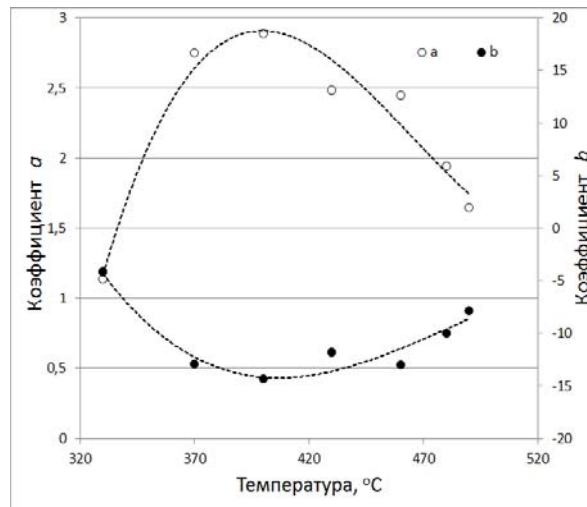


Рис. 4. Температурная зависимость коэффициентов а и b логистической функции для математического описания изотермического бейнитного превращения в стали 25Г2С2Н2МА

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ударная вязкость буровых долот из высокопрочной стали 25Г2С2Н2МА / М. В. Майсурадзе [и др.] // сб. XV Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых. Екатеринбург : УрФУ, 2014. С. 325–326.
2. Майсурадзе М. В. Влияние термической обработки на микроструктуру и механические свойства высокопрочной кремнистой стали / М. В. Майсурадзе, М. А. Рыжков, О. А. Сурнаева // Сталь. 2016. № 6. С. 62–66.
3. Влияние технологии производства на фазовые и структурные превращения кремнийсодержащей стали / М. В. Майсурадзе [и др.] // Сталь. 2017. № 1. С. 52–58.
4. Characterization of bainitic/martensitic structures formed in isothermal treatments below the  $M_s$  temperature / A. Navarro-Lopez [et al.] // Materials Characterization. 2017. Vol. 128. P. 248–256.
5. Avrami M. Kinetics of phase change I. General theory / M. Avrami // Journal of Chemical Physics. 1939. Vol. 7. P. 1103–1112.
6. Юдин Ю. В. Использование логистической функции для описания изотермического бейнитного превращения в конструкционных сталях / Ю. В. Юдин, М. В. Майсурадзе, А. А. Куклина // Сталь. 2017. № 3. С. 52–56.