

# АППРОКСИМАЦИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ КРИВЫХ РАСПАДА АУСТЕНИТА ВЫСОКОПРОЧНОЙ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ УРАВНЕНИЯМИ КДМА

Урцев Н.В.<sup>1,2,3\*</sup>

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

<sup>2</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

<sup>3</sup>ООО «ИТЦ «Аусферр», г. Магнитогорск, Россия

\*n.urtsev@ausferr.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Требуемый уровень физико-механических свойств листов из высокопрочных трубных сталей достигается за счет формирования дисперсных феррито-бейнитных структур в процессе контролируемой термомеханической обработки. Для прогнозирования и управления структурным состоянием необходимо знать кинетику фазовых превращений, реализующихся в условиях ускоренного охлаждения.

Настоящая работа посвящена описанию кинетики распада аустенита высокопрочной низколегированной стали 05Г2МБ по ферритному и бейнитному механизмам.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на образцах высокопрочной низколегированной трубной стали 05Г2МБ (0,05 мас. % С, 0,07 мас. % Si, 1,7 мас. % Mn, 0,19 мас. % Mo, 0,06 мас. % Nb, остальное – железо и неизбежные примеси). Образцы представляли собой пластины 110×27 мм толщиной 0,1, 0,25, 0,5, 1,1, и 2,0 мм.

Для исследования процессов распада аустенита в ИТЦ «Аусферр» разработана и реализована конструкция лабораторного теплофизического стенда, состоящего из нагревательной печи с механизмом перемещения и фиксации образцов; блока измерения температуры, включающего два пирометра ближнего инфракрасного (ИК) спектра с диапазонами измерения 550–1100 °С, а также быстродействующий пирометр, работающий в среднем ИК спектре (диапазон: 50–775 °С); узла воздушного охлаждения с пневмосистемой; узлов юстирования и регистрации информации. При проведении экспериментов по исследованию кинетики распада аустенита нагрев образцов осуществляли до 980 °С, затем образцы подвергали выдержке и производили охлаждение двумя плоскими потоками воздуха. Давление в пневматической системе охлаждения варьировали в зависимости от режима нагрева-охлаждения, что, с учетом вариации толщин образцов, позволило реализовать режимы охлаждения с интенсивностями, обеспечившими распад аустенита как по ферритному, так и по бейнитному механизмам.

Интенсивность охлаждения характеризовали постоянной для каждого режима величиной  $dW/dT$ , где  $W$  – удельная мощность теплового потока, отводящего тепло от объема металла, Вт/кг,  $T$  – температура металла, °С. В рамках настоящего исследования проведено 66 циклов нагрева-охлаждения, при этом значения  $dW/dT$  варьировали от 10 до 520 Вт/(кг·°С).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для каждого цикла нагрева-охлаждения были получены экспериментальные кривые охлаждения. Участки кривых, соответствовавших  $\gamma$  и  $\alpha$  областям, аппроксимировали экспоненциальными зависимостями  $T$  от времени ( $\tau$ , с). На Рис. 1 представлена кривая охлаждения для случая распада аустенита по ферритному механизму ( $dW/dT = 26,8$  Вт/(кг·°С)).

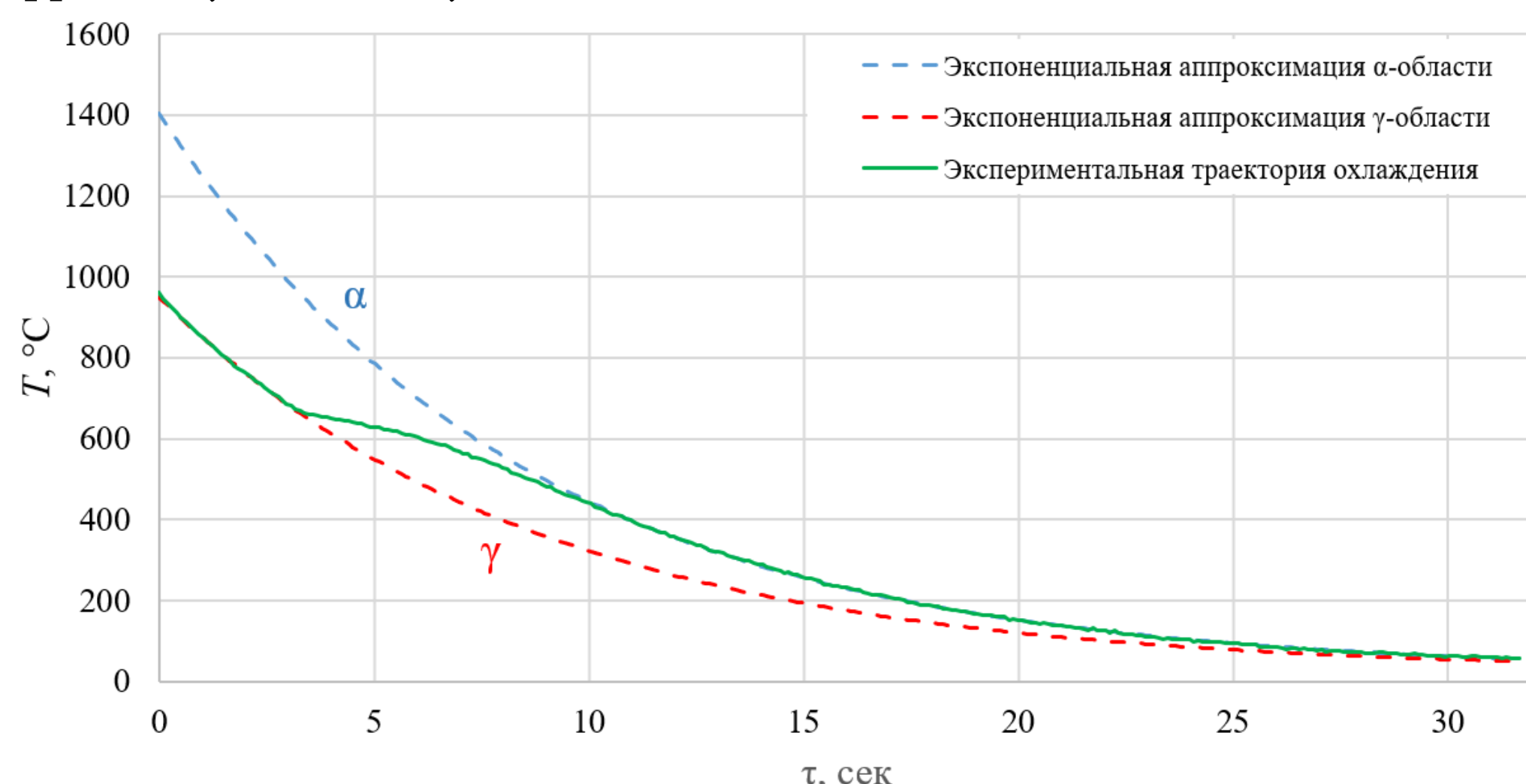


Рис. 1 Экспериментальная кривая охлаждения (распад аустенита по ферритному механизму) и экспоненциальные аппроксимации ее  $\gamma$  и  $\alpha$  областей

Для случая непрерывного охлаждения температурнооднородных образцов высокопрочной низколегированной стали 05Г2МБ при распаде аустенита, приводящего к формированию феррита ( $\Phi$ ), верхнего бейнита (БВ) и нижнего бейнита (БН), зависимость массовой доли продукта распада ( $M$ ) от  $\tau$  хорошо аппроксимируется кинетическими уравнениями Колмогорова–Джонсона–Мела–Аврами (КДМА):

$$M = 1 - e^{-k\tau^n}; \quad (1)$$

при формировании  $\Phi$  (Рис. 2) и БН лучшая аппроксимация достигается при  $n = 2$ , при формировании верхнего бейнита –  $n = 1,35$ .

Получены зависимости скоростей формирования продуктов распада аустенита ( $dM/d\tau$ ) от значений  $k$  и массовой доли аустенита ( $M_A$ ) для  $\Phi$ , БВ и БН, соответственно:

$$\frac{dM_\Phi}{d\tau} = 2 \cdot \sqrt{k_\Phi} \cdot M_A \cdot \sqrt{-\ln M_A}, \quad (2)$$

$$\frac{dM_{БВ}}{d\tau} = 1,35 \cdot k_{БВ}^{0,74074} \cdot M_A \cdot (-\ln(M_A))^{0,2592}, \quad (3)$$

$$\frac{dM_{БН}}{d\tau} = 2 \cdot \sqrt{k_{БН}} \cdot M_A \cdot \sqrt{-\ln(M_A)}. \quad (4)$$

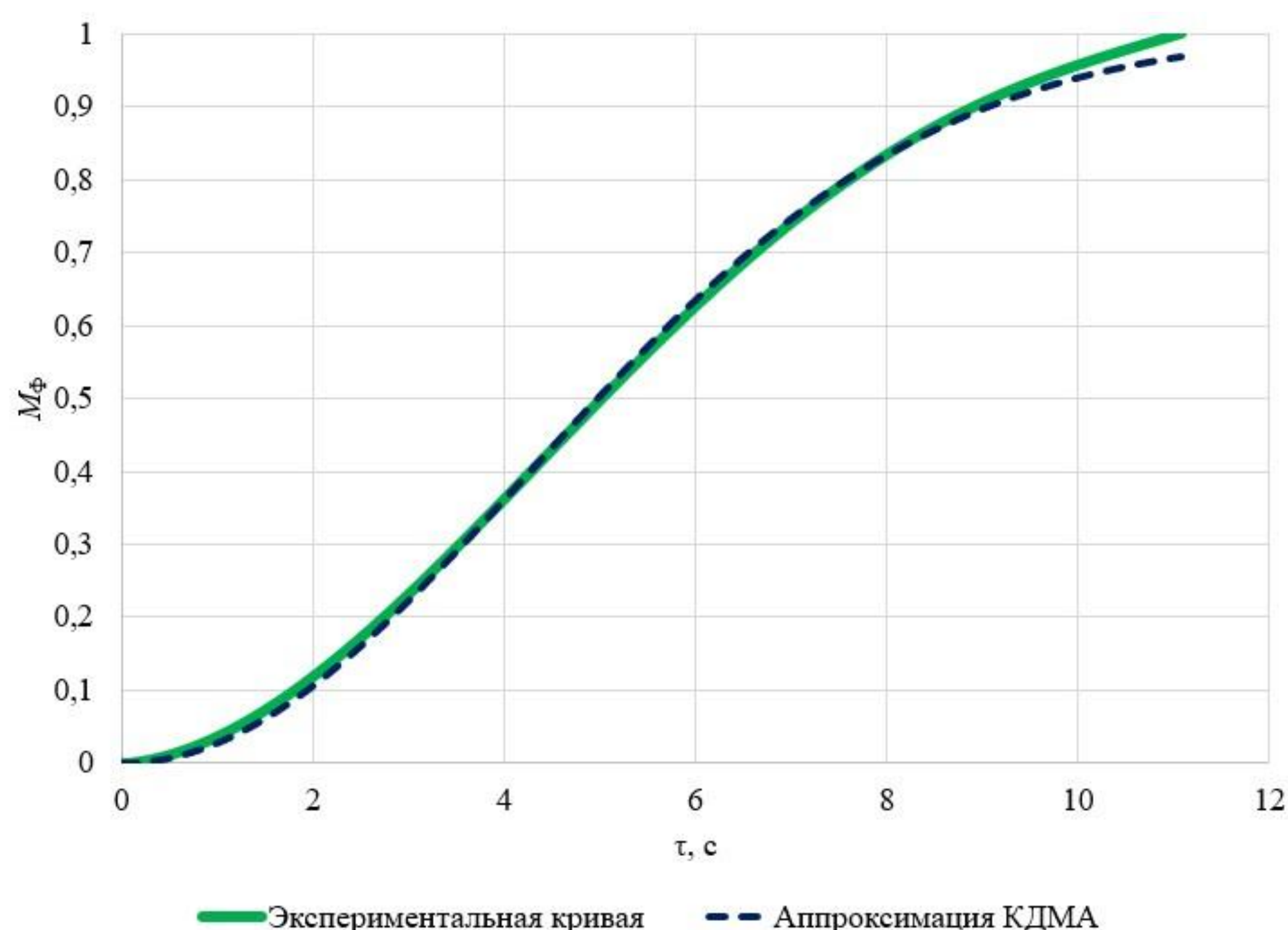


Рис. 2 Зависимость массовой доли образовавшегося феррита от времени и ее аппроксимация кинетическим уравнением КДМА (режим с интенсивностью охлаждения 26,8 Вт/(кг·°С))

В виде регрессионных линейных уравнений определены зависимости коэффициентов  $k$  от параметра интенсивности охлаждения  $dW/dT$ , Вт/(кг·°С):

$$k_\Phi = 0,0014 \frac{dW}{dT} - 0,0084, \quad (5)$$

$$k_{БВ} = 0,0012 \frac{dW}{dT} + 0,2113, \quad (6)$$

$$k_{БН} = 0,0213 \frac{dW}{dT} - 3,4813. \quad (7)$$

С ростом параметра интенсивности охлаждения ( $dW/dT$ ) значения коэффициентов  $k_\Phi$ ,  $k_{БВ}$  и  $k_{БН}$  увеличиваются, что приводит к повышению скорости превращения в соответствии с (2), (3), (4). Интенсивность охлаждения, характеризуемая параметром  $dW/dT$ , определяет как механизм распада аустенита, так и скорость формирования продуктов его распада ( $\Phi$ , БВ, БН)