

УДК 669

Регрессионные модели бездиффузионных превращений легированных сталей

Фу Чжи

zhiyi.fu@mail.ru

Куркин Алексей Сергеевич

ackurkin@mail.ru

SPIN-код: 1823-9010

Приходько Павел Андреевич

mashinenpistole40@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. На основе анализа массива экспериментальных диаграмм анизотермического распада аустенита предложена математическая модель кинетики мартенситного превращения легированных сталей. Разработанный подход применен для моделирования неполного бейнитного превращения. Получены регрессионные зависимости параметров моделей мартенситного и бейнитного превращений от состава легирования.

Ключевые слова: сталь, легирование, аустенит, мартенсит, бейнит, кинетика превращения неполное превращение, регрессионная модель

Regression Models of the Alloy Steels Diffusionless Transformations

Fu Zhiyi

zhiyi.fu@mail.ru

Kurkin Alexey Sergeevich

ackurkin@mail.ru

SPIN-code: 1823-9010

Prikhodko Pavel Anreevich

mashinenpistole40@gmail.com

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. Based on analysis of the austenite anisothermal decomposition experimental diagrams array, a mathematical model for the alloy steels martensitic transformation kinetics is proposed. The developed approach is applied to modeling incomplete bainitic transformation. Regression dependences of the of the martensitic and bainitic transformation models parameters on the alloy composition are obtained.

Keywords: steel, alloying, austenite, martensite, bainite, transformation kinetics, incomplete transformation, regression model

Введение. Современные методы термообработки сталей, такие, как изотермическая закалка, требуют повышения точности расчета температурной зависимости степени мартенситного превращения. Известные формулы [1, 2] пригодны только для простейших углеродистых сталей. В опубликованных атласах диаграмм анизотермического распада аустенита имеются данные о зависимости степени мартенситного и бейнитного превращений от температуры. Их анализ позволяет построить надежные регрессионные модели для

расчета условий превращений по составу легирования сталей. Неполное бейнитное превращение, как и мартенситное, имеет бездиффузионный характер. Это позволяет использовать при моделировании этих превращений аналогичные подходы. Целью данной работы является разработка и идентификация моделей мартенситного и бейнитного превращений легированных сталей.

Материалы и методы. Для описания кинетики бездиффузионных превращений использована модель на основе уравнения Остина-Рикетта [1, 2]. Идентификация параметров модели проведена по экспериментальным диаграммам из атласа [3] (рис. 1).

Composition: 0.40% C - 1.33% Mn - 0.36% Si - 0.18% Mo - 0.003% B Austenitized at 843°C (1550°F) for 20 min

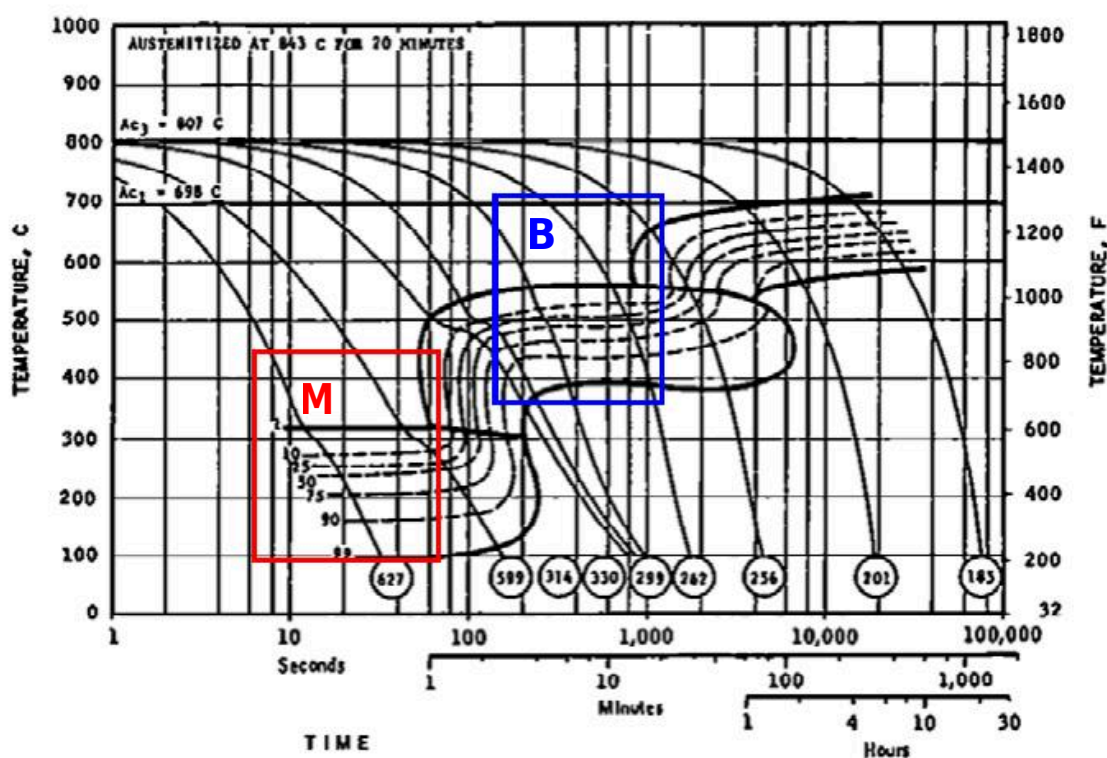


Рис. 1. Диаграмма анизотермического распада аустенита в стали 40Г2СМ [3]

Для обработки диаграмм была разработана специальная компьютерная программа. Регрессионный анализ данных проведен с помощью программы Statistics.

Результаты. Построены регрессионные зависимости от химического состава стали температур M_{10} , M_{50} и M_{90} для степеней мартенситного превращения 10, 50 и 90 %. Экспериментальные значения температур начала и окончания превращения менее достоверны, поскольку относительная точность измерения падает при малых количествах мартенсита или остаточного аустенита.

Обработка 171 диаграмм марок сталей из [3] с пределами легирования: $0,1\% < C < 0,4\%$; $Mn < 1,6\%$; $Si < 1,6\%$; $Ni < 4\%$; $Cr < 4,5\%$; $Mo < 1\%$ позволила

получить регрессионные модели с высокими коэффициентами множественной корреляции ($R > 0,96$):

$$M_{10} = 475 - C(297 + 61Ni + 109Mn) - 20Si \cdot Cr - 34Mo^2$$

$$M_{50} = 429 - C(278 + 55Ni + 117Mn) - 20Si \cdot Cr - 17Mo^2$$

$$M_{90} = 377 - C(292 + 57Ni + 91Mn + 133Mo) - 19Si \cdot Cr$$

Для обоснования уравнения превращения экспериментальные данные представлены на рис. 2 в нормированном виде $\bar{T} = \frac{T - M_{10}}{M_{10} - M_{90}}$. Для всех сталей $\bar{T} = 0$ при $T = M_{10}$ и $\bar{T} = -1$ при $T = M_{90}$.

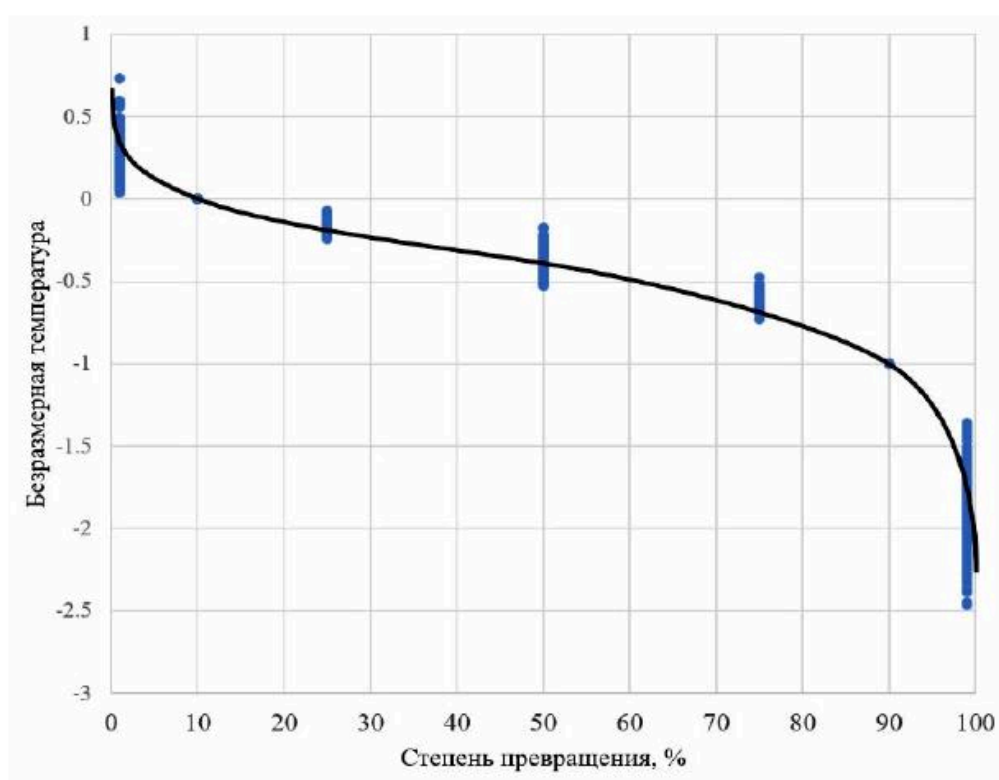


Рис. 2. Сопоставление безразмерных диаграмм мартенситного превращения

Характер рассеяния значений $\bar{T}$ позволяет описать зависимость степени превращения от температуры уравнением $p = \frac{1}{1 + \left(\frac{M_0 - M_{50}}{M_0 - T} \right)^m}$ с единым для

всех марок стали значением экспоненты превращения $m \approx 2,3$, где

$M_0 = \frac{M_{50}^2 - M_{90} M_{10}}{2M_{50} - M_{90} - M_{10}}$ — температура начала превращения.

Аналогичный подход был применен для моделирования неполного бейнитного превращения. На рис. 1 видно, что на участке начала бейнитного превращения **В** пунктирные изолинии горизонтальны, как и на участке мартенситного превращения **М**, т. е. степень превращения зависит только от температуры.

Обработка 87 диаграмм марок сталей из [3] позволила получить регрессионные модели с коэффициентами множественной корреляции $R > 0,97$:

$$B_{10} = 667 - C(247Mn + 46Ni) - Mn(78Cr - 22Mn + 100Mo) - \\ - Ni(18Cr + 24Mo) - 25Si$$

$$B_{50} = 635 - C(174Mn + 272Mo) - Mn(87Cr + 36Si) - 30Ni$$

$$B_{90} = 569 - C(173Mn + 306Cr) - Mo(56Mn + 98Si) - 32Ni + 17Cr$$

Зависимость максимальной степени неполного бейнитного превращения от температуры $p_{\max} = \frac{1}{1 + \left(\frac{B_0 - B_{50}}{B_0 - T} \right)^b}$ с экспонентой превращения $b \approx 4,7$,

где $B_0 = \frac{B_{50}^2 - B_{90}B_{10}}{2B_{50} - B_{90} - B_{10}}$ — температура начала превращения.

Обсуждение полученных результатов. Результаты исследований показывают, что легирование, как правило, приводит к понижению температурных интервалов бейнитного и мартенситного превращений. Как правило, наблюдается взаимодействие элементов, на что указывают попарные произведения содержаний элементов в формулах.

Заключение. Установлена аналогия температурных зависимостей мартенситного и неполного бейнитного превращений аустенита в доэвтектоидных легированных сталях. Разработаны регрессионные модели, связывающие температурные интервалы бейнитного и мартенситного превращений легированных сталей с их химическим составом. Модели построены на большом количестве надежных экспериментальных данных и дают существенно более высокую точность, чем ранее известные формулы.

Список источников

- [1] Куркин А.С. Исследование кинетики фазовых превращений легированной стали методами математического моделирования. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2019, т. 85, № 12, с. 25–32.
- [2] Austin J.B., Rickett R.L. Kinetics of the decomposition of austenite at constant temperature. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 1939, vol. 135, pp. 396–443.
- [3] Vander Voort G.F. Ed. *Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels*. ASM International, 1991, 766 p.