

УДК 669.017.3

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РАСПАДА ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО АУСТЕНИТА ПОРОШКОВЫХ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ПОРИСТОСТИ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ивашко А.Г., д.т.н., профессор кафедры информационных систем (ivashco@mail.ru)
Цыганова М.С., к.т.н., доцент кафедры информационных систем (mademid2@mail.ru)
Набатов Р.И., студент (nabatov.roman@yandex.ru)

Тюменский государственный университет
(625003, Россия, Тюмень, ул. Володарского, 6)

Аннотация. Для определения режимов термической обработки стали необходимы термокинетические диаграммы распада аустенита. Построение этих диаграмм экспериментальным путем является сложным и крайне трудоемким процессом. В данной работе предлагается имитационная модель процесса фазовых превращений, учитывающая особенности структуры порошковых сталей, а также методика проведения компьютерных экспериментов при различных режимах охлаждения стали. Предлагаемая модель позволяет по данным изотермических диаграмм для двух значений пористости стали определить кинетические параметры распада аустенита и прогнозировать кинетику превращения в этой стали для других значений пористости как в изотермических условиях, так и при непрерывном охлаждении. Адекватность модели проверялась на сталях У8 и ПК80 различной пористости с использованием опубликованных экспериментальных данных.

Ключевые слова: термическая обработка, порошковые стали, фазовые превращения, распад аустенита, пористость, имитационное моделирование, прогнозирование кинетики фазовых превращений, изотермические и термокинетические диаграммы, неомогенное зарождение, компьютерный эксперимент.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-3-191-196

Для моделирования кинетики распада переохлажденного аустенита и прогнозирования структуры стали после термообработки широко используются изотермические и термокинетические диаграммы, полученные экспериментальным путем. Однако использование этих диаграмм в случаях, когда режим термической обработки существенно отличается от режимов в экспериментах, некорректно. В связи с этим, было разработано множество математических моделей, позволяющих прогнозировать кинетику фазовых превращений при охлаждении стали [1 – 7].

В работах [1] и [6] отмечается, что применение моделей, построенных на основе уравнения кристаллизации А. Н. Колмогорова или уравнения Аврами, к описанию распада аустенита при непрерывном охлаждении позволяет получить лишь качественное соответствие данным эксперимента. Поэтому в ряде работ [6 – 8] были предложены имитационные модели фазовых превращений в стали. Следует отметить, что хотя модели, предлагаемые в указанных работах, и применялись для описания кинетики распада аустенита в порошковых сталях, ни одна из этих моделей не учитывала явно особенности структуры таких сталей. Исследования многих авторов [9 – 12] показывают, что основные закономерности превращения переохлажденного аустенита порошковых сталей аналогичны закономерностям, наблюдаемым для кованных и литых сталей

соответствующего химического состава. В то же время, поры являются структурной составляющей порошковых сталей, и пористость оказывает существенное влияние на кинетику распада аустенита таких сталей.

В работе [7] была предложена методика прогнозирования кинетики распада аустенита в сталях различной пористости на основе аппроксимации кинетических параметров превращения, найденных для нескольких значений пористости. При этом имитационная модель, описывающая непосредственно зарождение и рост зерен новой фазы, не учитывала наличие частиц порошка (и, как следствие, рост зерна новой фазы только в пределах одной частицы), а также наличие пор. Кроме того, модель построена на основе предположения о гомогенном характере зарождения (вероятность образования центров новой фазы одинакова во всех частях непревращенного объема), которое, применительно к превращениям в порошковых сталях, можно считать слишком упрощенным.

В настоящей работе поставлена задача построить и реализовать имитационную модель распада переохлажденного аустенита с учетом особенностей структуры порошковых сталей, позволяющую:

- определить значения кинетических параметров превращения на основе экспериментально полученных изотермических диаграмм для некоторых значений пористости стали;

- используя найденные значения кинетических параметров, расчетным путем построить термодинамические диаграммы для этих же значений пористости, а также изотермические и термокинетические диаграммы данной стали с другими значениями пористости.

В основе предлагаемой модели лежит следующая схема.

- В пространстве задана некоторая область (моделируемый объем), которая в начальный момент времени занята старой фазой (аустенитом).
- Моделируемый объем разбивается на фрагменты (частицы). Границы частиц задаются уравнениями плоскостей, каждому из которых сопоставляется номер.
- Некоторое количество частиц (в зависимости от значения пористости) определяется как поры.
- В случайные моменты времени в случайных областях пространства, занятого старой фазой, возникают объекты – центры зарождения новой фазы. Зародыши новой фазы могут возникать на гранях частиц и на границах пор, причем вероятность возникновения зародыша на границах пор существенно выше, чем на гранях частиц.
- Каждый объект может занимать область произвольной формы. Для простоты реализации использовался шар заданного радиуса r_0 .
- После возникновения нового зародыша происходит его рост (в пределах частицы, в которой он образовался), при этом радиус шара линейно увеличивается со временем.
- Допускается, что зародыш, не достигший заданного критического размера, может исчезнуть с определенной вероятностью.

Для математического описания указанных процессов использовалась терминология теории массового обслуживания [13]. Моделируемый объем рассматривался как система массового обслуживания, каналами обслуживания которой являются возможные центры зарождения новой фазы. Они могут быть расположены на гранях частиц и на границах пор. В систему поступает поток заявок на возникновение зародышей. Каждая заявка характеризуется моментом поступления τ_j и координатами центра вновь образующегося объекта (x_j, y_j, z_j) . Если в системе в данный момент имеется свободный канал, то очередная заявка принимается. До тех пор, пока зародыш новой фазы имеет размер меньше критического, канал, обслуживающий данную заявку, может освободиться с определенной вероятностью (вследствие исчезновения зародыша). Канал может оказаться занятым как вследствие того, что на этот канал поступила новая заявка, так и вследствие роста ранее образованных зародышей, которые поглощают соответствующую область в пространстве.

При построении модели предполагалось, что поток τ_j моментов поступления заявок в систему и поток

векторов (x_j, y_j, z_j) могут быть описаны отдельно как независимые случайные объекты соответствующими законами распределения. Последовательность τ_j рассматривалась как поток однородных событий. Исходя из физических закономерностей процесса фазового превращения было принято, что этот поток обладает свойствами:

- стационарности (вероятность поступления заявки в течение заданного промежутка времени определяется только длиной этого промежутка и не зависит от расположения данного промежутка на временном отрезке процесса превращения);
- отсутствия последствия (вероятность поступления заявки в течение заданного промежутка времени не зависит от того, сколько заявок поступило на любом другом промежутке, не пересекающемся с данным промежутком);
- ординарности (вероятность поступления двух и более заявок в течение малого промежутка времени пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью поступления одной заявки).

В этом случае рассматриваемый поток является простейшим (стационарным пуассоновским) и, в соответствии с положениями теории вероятностей, время между поступлениями двух заявок имеет показательное распределение с параметром λ , где λ – интенсивность потока. Если интенсивность потока задана, то можно получить последовательность $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots$, где t_1 – время поступления первой заявки, $t_k, k = 2, 3, \dots$ – время между поступлениями $(k-1)$ -й и k -й заявки, как последовательность псевдослучайных чисел, имеющих показательное распределение с параметром λ . Тогда моменты $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k, \dots$ поступления заявок в систему могут быть выражены соотношениями

$$\tau_1 = t_1, \tau_2 = t_1 + t_2, \dots, \tau_k = t_1 + t_2 + \dots + t_k, \dots$$

Координаты центров вновь образующихся объектов определялись по следующему правилу. Сначала генерируется равномерно распределенное псевдослучайное число, определяющее номер плоскости (границу частицы), на которой может произойти зарождение центра новой фазы. После этого независимо генерируются еще два псевдослучайных числа, равномерно распределенных на интервале, задаваемом размерами соответствующей области, определяющие координаты x_j и y_j возможного центра зарождения. Координата z_j рассчитывается, исходя из полученных значений x_j и y_j в соответствии с уравнением выбранной ранее плоскости.

В ходе моделирования могут произойти следующие события:

- зарождение зерна новой фазы на границе двух частиц;
- зарождение зерна новой фазы на границе поры;
- распад образованного ранее зародыша, не достигшего критического размера.

В момент наступления очередного события рассчитывается объем области, занятой новой фазой. Для определения этого объема использовался метод Монте-Карло.

Кинетика процесса в данной модели определяется следующими параметрами: λ – интенсивность потока зарождения зерен новой фазы на гранях частиц; λ_p – интенсивность потока зарождения зерен новой фазы на границах пор, $\lambda_p > \lambda$; l – линейная скорость роста зерен новой фазы; r_0 – радиус зерна новой фазы при зарождении; $r_{кр}$ – критический радиус распада зерен новой фазы; μ – вероятность распада зерен новой фазы, не достигших критического радиуса.

Все эти параметры зависят от температуры выдержки аустенита. Было разработано программное обеспечение, позволяющее произвести компьютерный эксперимент, в ходе которого, согласно описанной выше схеме, для данного набора значений кинетических параметров, соответствующего температуре T , моделировался реальный процесс образования новой фазы и рассчитывалась доля распавшегося аустенита $V_T(\lambda, \lambda_p, l, r_0, r_{кр}, \mu, t)$ в зависимости от времени t . Процесс моделирования продолжался до полного распада аустенита, либо до момента времени, соответствующего окончанию реального эксперимента.

Процедура определения оптимальных значений параметров модели обрабатывалась на имеющихся экспериментальных данных о кинетике распада аустенита в стали ПК40Н2М пористости 3 % [9, 14]. Эта сталь была выбрана потому, что для нее имеются не только данные о времени начала и конца превращения, но и кинетические кривые распада аустенита для различных режимов охлаждения. Для получения оптимальных значений параметров модели необходимо было минимизировать суммарное отклонение функции $V_T(\lambda, \lambda_p, l, r_0, r_{кр}, \mu, t)$ от экспериментальных значений на протяжении всего

времени превращения. В работах [6 – 8] такую оптимизацию предлагалось выполнять на основе метода наименьших квадратов. Однако этот подход не учитывает неоднородности временных промежутков между экспериментальными точками, вследствие чего возможна ситуация, когда параметры модели будут «подгоняться» в пользу низко отклонения на нескольких близко расположенных временных точках ценой высокого отклонения на двух далеко расположенных точках. Поэтому было принято решение минимизировать не сумму квадратов отклонений по всем временным точкам (как в методе наименьших квадратов), а площадь области, ограниченной графиком функции $V_T(\lambda, \lambda_p, l, r_0, r_{кр}, \mu, t)$, и экспериментально полученной кинетической кривой. В качестве метода оптимизации, как и в работах [6 – 8], использовался метод Хука-Дживса [15]. С целью уменьшения влияния случайных факторов (распределения зародышей новой фазы во времени и в пространстве) на результат имитационного эксперимента для каждого набора значений параметров выполнялось 100 прогонов модели, по результатам которых строилась усредненная кривая фазового превращения. На рис. 1 приведены кинетические кривые изотермического распада аустенита при температурах 366 и 580 °С, полученные экспериментальным и расчетным путем. Следует обратить внимание на то, что предлагаемая модель адекватно описывает кинетику превращения и при температурах выше 500 °С (когда распад аустенита в стали ПК40Н2М происходит не до конца), в то время как в моделях, представленных в работах [6 – 8], в этой ситуации приходилось использовать искусственные приемы для ограничения роста новой фазы. Указанное преимущество данной модели связано с неомогенностью зарождения зерен новой фазы: с развитием превращения происходит «исчерпание» мест возможного зарождения (все грани частиц становятся

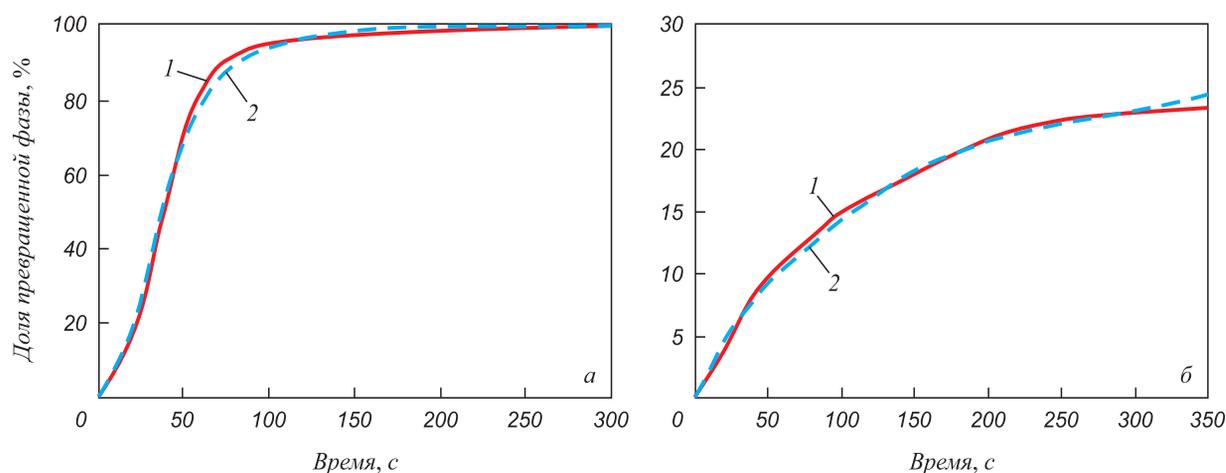


Рис. 1 Кинетическая кривая изотермического распада аустенита стали ПК40Н2М пористости 3 % при T , °С: 366 (а); 580 (б); 1 – данные эксперимента; 2 – результаты расчета

Fig. 1. The kinetic curve of isothermal transformation of austenite at PK40N2M steel with porosity of 3 % T , °С: 366 (a); 580 (б); 1 – experimental dat; 2 – results of the calculation

уже занятыми растущими зародышами новой фазы) и дальнейшее приращение объема новой фазы происходит только за счет роста уже образованных зародышей. При высоких температурах скорость роста невысока, что и объясняет столь медленную скорость превращения (рис. 1, б).

Значения кинетических параметров, найденные по изотермическим диаграммам для некоторых значений пористости стали, могут быть использованы для прогнозирования кинетики превращения в этой же стали:

- в изотермических условиях с другими значениями пористости;
- при непрерывном охлаждении с теми же или с другими значениями пористости.

При решении поставленных задач учитывалось, что вероятность зарождения центров новой фазы очень чувствительна к изменениям в структуре стали, а линейная скорость роста зародышей, напротив, является структурно-малочувствительным фактором [10]. Поэтому предполагалось, что линейная скорость роста не изменяется при изменении пористости стали, а увеличение скорости превращения, наблюдаемое с увеличением пористости, происходит за счет увеличения поверхности пор, следствием которого является увеличение интенсивности зарождения.

В разработанной авторами системе имитационного моделирования реализована возможность определения оптимальных значений параметров модели с учетом отклонения расчетных кривых от экспериментальных одновременно на двух значениях пористости. Для выполнения процедур оптимизации была выбрана сталь ПК80. Использовались экспериментальные данные о кинетике распада аустенита в сталях У8 и ПК80 различной пористости, представленные в работе [10]. Кинетические параметры модели определялись при выполнении оптимизации одновременно на двух значениях пористости: 6–8 и 26–28 %. Значения параметров, найденные для этих пористостей, уже без каких-либо изменений использовались для моделирования изотермического превращения в стали ПК80 пористости 15–16 %. Построенная в результате моделирования изотермическая диаграмма, а также диаграмма, полученная экспериментальным путем (по данным работы [10]), представлены на рис. 2.

Для выполнения моделирования фазового превращения при непрерывном охлаждении необходимо описать зависимость температуры от времени, а также зависимость кинетических параметров превращения от температуры (для конкретного режима охлаждения от времени) и при проведении имитации учитывать эти зависимости. При определении зависимости температуры от времени за основу были взяты кривые охлаждения, полученные экспериментально. С имеющихся кривых охлаждения считывался ряд точек (t_j, T_j) , $j = 1, 2, \dots, n$, где T_j – значение температуры в момент времени t_j , которые использовались для линейной интерполяции

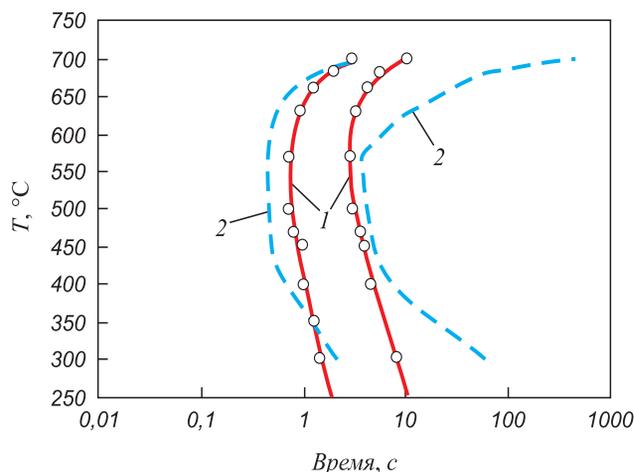


Рис. 2. Изотермическая диаграмма стали ПК80 пористости 15–16 %:

1 – данные эксперимента [10]; 2 – результаты расчета

Fig. 2. Isothermal diagram of PK80 steel with porosity of 15–16 %: 1 – experimental data [10]; 2 – results of the calculation

функции $T(t)$. Для каждого режима охлаждения определялся момент времени t_0 , для которого $T(t_0) = 727$ °C. При $t < t_0$ температура охлаждаемого образца остается выше критической, образец находится в области устойчивости аустенита, поэтому зарождение зерен новой фазы не происходит. Имитация зарождения и роста начиналась только с момента времени t_0 . При этом полагалось $\lambda(727) = 0$, $\lambda_p(727) = 0$, $l(727) = 0$. Зависимость кинетических параметров превращения от температуры при $t > t_0$, т. е. $T < 727$ °C, описывалась путем линейной интерполяции значений параметров модели, полученных в результате оптимизации на этапе моделирования превращения в изотермических условиях.

Моделирование распада аустенита при непрерывном охлаждении, как и в случае изотермического превращения, выполнялось по принципу «от события к событию». На основе текущих значений кинетических параметров определялся момент времени, соответствующий наступлению следующего события. На этот момент времени находилось значение температуры и рассчитывались значения параметров модели, соответствующих этой температуре, а также определялся объем новой фазы. Новые значения параметров становились текущими. Процесс моделирования продолжался до полного распада аустенита, либо до момента достижения температуры начала мартенситного превращения M_n . По результатам моделирования были построены термокинетические диаграммы для стали У8 и ПК80 пористости 15–16 %. Диаграммы представлены на рис. 3. Как видно, разработанная имитационная модель адекватно описывает кинетику фазового превращения при непрерывном охлаждении.

Выводы. Создана имитационная модель фазовых превращений при термической обработке порошковых сталей. Разработано программное обеспечение, реа-

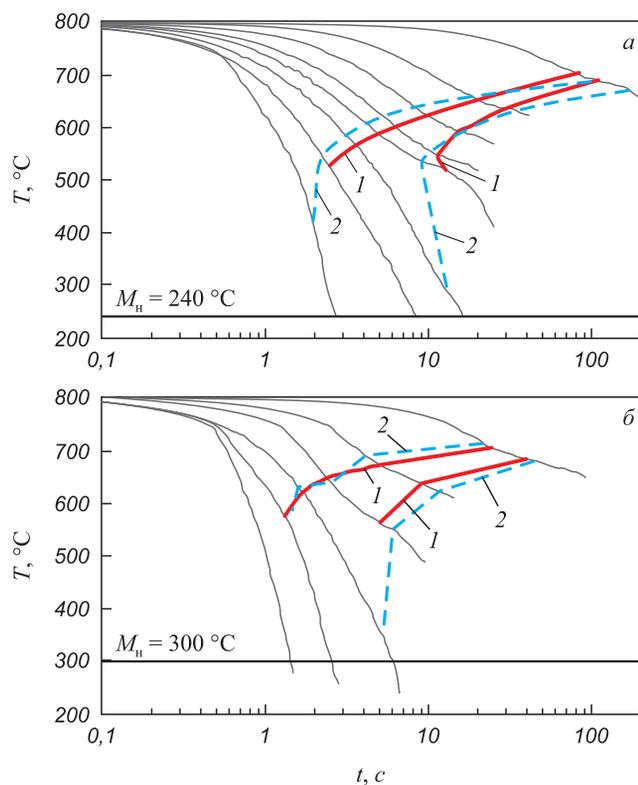


Рис. 3. Термокинетическая диаграмма стали У8 (а) и ПК80 пористости 15 – 16 % (б):
1 – данные эксперимента [10]; 2 – результаты расчета

Fig. 3 Thermokinetic diagrams for Yu8 steel (a) and for PK80 steel with porosity of 15 – 16 % (b):
1 – experimental data [10]; 2 – results of the calculation

лизующее предложенную модель и позволяющее выполнять компьютерные эксперименты, моделирующие процесс распада аустенита как в изотермических условиях, так и при непрерывном охлаждении.

Создана методика прогнозирования кинетики распада аустенита в порошковых сталях различной пористости на основе имеющихся экспериментальных данных для двух значений пористости. Разработано программное обеспечение, реализующее все необходимые расчеты. Результаты моделирования показывают удовлетворительное соответствие экспериментальным данным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kisino T., Nagaki S., Inoue T. Phase transformations, thermal conduction and elasto-plastic stress in hardening of steel // *Materials*. 1979. Vol. 28. No. 312. P. 861 – 867.
2. Мирзаев Д.А., Окишев К.Ю., Счастливец В.М. и др. Кинетические закономерности образования феррита из аустенита сплавов Fe – 9 % Cr различной чистоты по примесям внедрения // *Физика металлов и металловедение*. 1998. Т. 86. Вып. 6. С. 90 – 105.
3. Окишев К.Ю. Исчерпание мест зарождения и кинетические параметры аустенитферритного превращения в сплавах Fe – 9 % Cr // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy*. 2012. Вып. 15 (274). С. 116 – 121.
4. Ткаченко И.Ф., Ткаченко К.И. О кинетике начальной стадии перлитного превращения в нелегированной стали // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2003. № 4. С. 43 – 45.
5. Кристан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. Ч. 1. Термодинамика и общая кинетика. – М.: Мир, 1978. – 808 с.
6. Гуревич Ю.Г., Ивашко А.Г., Цыганова М.С. Математическое моделирование распада аустенита с целью построения термокинетической диаграммы расчетным путем // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2004. № 9. С. 45 – 48.
7. Гуревич Ю.Г., Цыганова М.С. Построение изотермических и термокинетических диаграмм порошковых сталей различной пористости расчетным путем // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2006. № 1. С. 47 – 50.
8. Ивашко А.Г., Цыганова М.С., Полищук И.Н. Компьютерное моделирование превращения фаз в процессе термической обработки // *Вестник Тюменского государственного университета*. 2008. № 6. С. 129 – 140.
9. Гуревич Ю.Г., Анциферов В.Н., Буланов В.Я., Ивашко А.Г. Термокинетические и изотермические диаграммы порошковых сталей: Справочник / Под ред. Ю. Г. Гуревича. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 259 с.
10. Ермаков С.С., Вязников Н.Ф. Порошковые стали и изделия. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1990. – 319 с.
11. Анциферов В.Н., Буланов В.Я., Богодухов С.И., Гревнов Л.М. Термохимическая обработка порошковых сталей. – Екатеринбург: УрО РАН, 1997. – 481 с.
12. Анциферов В.Н., Боброва С.Н., Перельман О.М., Шацов А.А. Изотермический распад аустенита порошковой никель-молибденовой стали // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1993. № 8. С. 18 – 20.
13. Таха Х. Введение в исследование операций. – 7-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 912 с.
14. Гуревич Ю.Г., Ивашко А.Г. Кинетика распада переохлажденного аустенита порошковых сталей. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 1998. – 153 с.
15. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс. – М: Радио и связь, 1988. – 128 с.

Поступила 3 октября 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 3, pp.191–196.

THE STUDY OF DECOMPOSITION KINETICS OF SUPERCOOLED AUSTENITE OF POWDER STEELS WITH DIFFERENT POROSITY BY SIMULATION MODELING

A.G. Ivashko, M.S. Tsyganova, R.I. Nabatov

Tyumen State University, Tyumen, Russia

Abstract. Thermokinetic diagrams of austenite decomposition are necessary to determine regimes of thermal treatment of steel. Building-up of these diagrams by experiments is difficult and labour intensive process. In this work the simulation model of process of phase transformations,

taking into account the structure of powder steels, and the methodology for computer experiments with different models of steel cooling are offered. The proposed model allows to determine the kinetic parameters of austenite decomposition for two values of porosity steel according to the isothermal diagrams, and to predict the kinetics of the transformations in this steel as isothermal and continuous cooling. The adequacy of the model was tested on steels with different porosity using published experimental data.

Keywords: thermal treatment, powder steel, phase transformations, decomposition of austenite, porosity, simulation modeling, prediction of kinetics of phase transformations, isothermal and thermokinetic diagrams, inhomogeneous nucleation, computer experiment.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-3-191-196

REFERENCES

1. Kisino T., Nagaki S., Inoue T. Phase Transformations, Thermal Conductions and Elasto-Plastic Stress in Hardening of Steel. *Materials*, 1979, vol. 28, no. 312, pp. 861–867.
2. Mirzaev D.A., Okishev K.Yu., Schastlivtsev V.M., Mirzoev A.A., Yakovleva I.L., Karzunov S.E. Kinetics of ferrite formation from austenite in Fe-9% Cr alloys with various concentrations of interstitial impurities. *Physics of Metals and Metallography*. 1998, vol. 86, Issue 6, pp. 590–600.
3. Okishev K.Yu. Nucleation site saturation and kinetic parameters of austenite-ferrite transformation in Fe-9% Cr alloys. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*. 2012. Issue 15 (274), pp. 116–121. (In Russ.).
4. Tkachenko I.F., Tkachenko K.I. On kinetics of initial stage of the pearlite transformation into non-alloy steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2003, no. 4, pp. 43–45. (In Russ.).
5. Christian J.W. *The Theory of Transformations in Metals and Alloys*. Pergamon Press, 1965, 975 p. (Russ.ed.: Christian J. *Teoriya prevrashchenii v metallakh i splavakh*. Moscow: Mir, 1978. 805 p.).
6. Gurevich Yu.G., Ivashko A.G., Tsyganova M.S. Mathematical modeling of austenite decomposition to calculate the thermokinetic diagram. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2004, no. 9, pp. 45–48. (In Russ.).
7. Gurevich Yu.G., Tsyganova M.S. Calculating of isothermal and thermokinetic diagrams of powder steels with different porosity. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2006, no. 1, pp. 47–50. (In Russ.).
8. Ivashko A.G., Tsyganova M.S., Polishchuk I.N. Computer modeling of phase transformations during thermal treatment. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2008, no. 6, pp. 129–140. (In Russ.).
9. Gurevich Yu.G., Antsiferov V.N., Bulanov V.Ya., Ivashko A.G. *Termokineticheskie i izometricheskie diagrammy poroshkovykh staley: Spravochnik* [Thermokinetic and isothermal diagrams of powder steels]. Gurevich Yu.G. ed. Ros. akad. nauk. Ural. otd-nie. In-t metallurgii. Ekaterinburg: UrO RAN, 2001, 259 p. (In Russ.).
10. Ermakov S.S., Vyaznikov N.F. *Poroshkovye stali i izdeliya* [Powder steels and products]. Leningrad: Mashinostroenie, Leningradskoe otdelenie, 1990, 319 p. (In Russ.).
11. Antsiferov V.N., Bulanov V.Ya., Bogodukhov S.I., Grevnov L.M. *Termokhimicheskaya obrabotka poroshkovykh staley* [Thermochemical treatment of powder steels]. Ekaterinburg: UrO RAN, 1997, 481 p. (In Russ.).
12. Antsiferov V.N., Bobrova S.N., Perel'man O.M., Shatsov A.A. Isothermal decomposition of austenite in powered nickel-molybdenum steel. *Metal Science and Heat Treatment*. 1993, vol. 35, no. 8, pp. 450–454.
13. Taha Hamdy A. *Operations research: an introduction*. New Jersey: Paerson Education, 2003. (Russ.ed.: Taha Hamdy A. *Vvedenie v issledovanie operatsii*. Moscow: Vil'yams, 2005, 912 p.).
14. Gurevich Yu.G., Ivashko A.G. *Kinetika raspada pereokhlazhdenogo austenita poroshkovykh staley* [Kinetics of decomposition of supercooled austenite of powder steels]. Kurgan: Izd-vo Kurgan. gos. un-ta, 1998, 153 p. (In Russ.).
15. Brian D. Bunday. *Basic Optimisation Methods*. London: Edward Arnold, 1984. 128 p. (Russ.ed.: Bunday B. *Metody optimizatsii. Vvodnyi kurs*. Moscow: Radio i svyaz', 1988, 128 p.).

Information about the authors:

A.G. Ivashko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Information Systems" (ivashco@mail.ru)

M.S. Tsyganova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Information Systems" (mademid2@mail.ru)

R.I. Nabatov, Student (nabatov.roman@yandex.ru)

Received October 3, 2014