



The article is dedicated to analysis of the existing calculation methods of thermalphysic characteristics of steel of different chemical composition depending on temperature and development of new methods for determination of actual heat capacity of the carbon types of steel.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, НАН Беларуси,
С. М. КАБИШОВ, Е. В. КАЛИНЕВИЧ, Р. Б. ВАЙС, БНТУ

УДК 669.041

АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ НАГРЕВА

При решении задач теплопроводности применительно к процессам затвердевания, охлаждения и нагрева стальных слитков и заготовок необходимо использовать современный математический аппарат, наиболее полно учитывающий нелинейность теплофизических характеристик металла в зависимости от температуры, и особенности условий теплообмена, обусловленные конструктивными и технологическими характеристиками оборудования. Такой подход позволяет более точно определить динамику изменения температур в теле, что особенно важно, если процесс имеет технологические ограничения (например, по термонапряжениям и деформациям).

В настоящее время учет нелинейности теплофизических свойств стали при моделировании высокотемпературных процессов осуществляется с использованием экспериментальных данных, приведенных в справочной литературе [1], либо расчетных методик. Справочной информации о зависимости теплофизических свойств различных марок стали от температуры явно недостаточно. В связи с этим значительный интерес наряду с экспериментальными данными представляют расчетные методики, позволяющие с приемлемой точностью определить искомые характеристики.

В расчетах нагрева заготовок в пламенных печах [2, 3], как правило, используются эмпирические формулы для описания зависимости коэффициентов теплопроводности, удельной теплоемкости и массовой плотности стали от температуры, предложенные в статье В.А. Маковского [4].

Аппроксимирующая формула для расчета коэффициента теплопроводности имеет вид [4]:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + a_1 \left(\frac{t}{100} \right) - \frac{a_2}{\operatorname{cha}_3 \left(\frac{t-t_0}{100} \right)}. \quad (1)$$

Среднюю теплоемкость можно рассчитать по формуле

$$c_m(t) = c_{m_0} + a_1 \left(\frac{t}{100} \right)^n - \frac{a_2}{\operatorname{ch} \left[a_3 \left(\frac{t-t_0}{100} \right) \right]}, \quad (2)$$

а истинную теплоемкость — из выражения

$$c(t) = c_0 + a_1 \left(\frac{t}{1000} \right)^n - a_2 e^{-a_3(t-t_0)}. \quad (3)$$

Значения коэффициентов c_0 , a_1 , ..., a_3 , n , t_0 приведены в [4].

Зависимость истинной теплоемкости от температуры, согласно [4], характеризуется графиком с одним четко выраженным максимумом (рис. 1).

Зависимость плотности стали от температуры В.А. Маковский предлагает рассчитывать по формуле

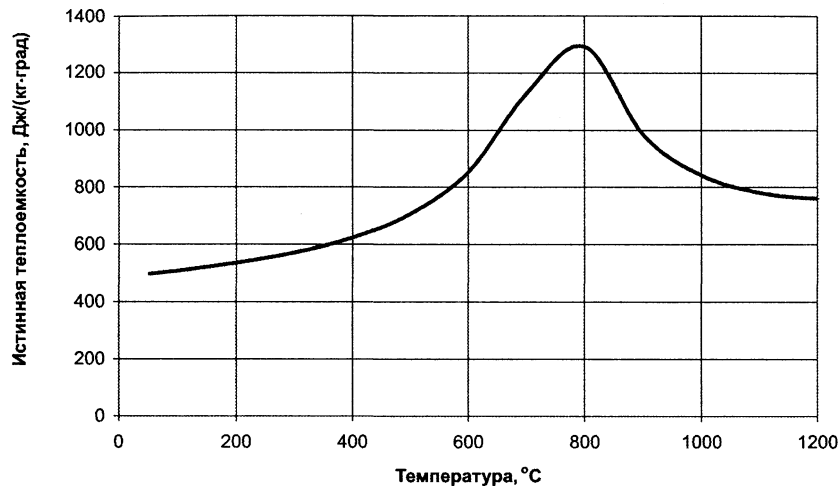


Рис. 1. Расчетная зависимость истинной теплоемкости стали 45 от температуры согласно методике В.А. Маковского [4]

$$\rho(t) = \rho_{20} \frac{1}{1 + 3\alpha_t(t - 20)}, \quad (4)$$

где $\alpha_t(t) \cdot 10^6 = \alpha_0 + a_1 \left(\frac{t}{1000} \right) - \frac{a_2}{\operatorname{ch} \left[a_3 \left(\frac{t - t_0}{100} \right)^2 \right]}$ — коэффициент линейного расширения.

Соответствующие значения коэффициентов $\lambda_0, c_0, \rho_0, \alpha_0, a_1, \dots, a_3$ приведены в [4].

В отличие от методики В.А. Маковского немецкий ученый Г. Велк предлагает использовать для расчета теплофизических параметров сталей в зависимости от химического состава и температуры эмпирические формулы в виде полиномов высоких порядков [5].

Общая форма такого полинома

$$P(x, y) = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^n a_{ik} x^i y^k \quad (5)$$

или в подробной записи

$$P(x, y) = (a_{00} + a_{01}y + a_{02}y^2 + \dots) + (a_{10} + a_{11}y + a_{12}y^2 + \dots)x + (a_{20} + a_{21}y + a_{22}y^2 + \dots)x^2 + \dots \quad (6)$$

Выбор значений m, n и a_{ik} осуществлялся с помощью специальной программы таким образом, чтобы отклонение между всеми результатами измерений и соответствующими расчетными значениями не превышало установленного предела. В результате были получены расчетные формулы для определения искомых теплофизических характеристик.

Кроме того, автором было установлено, что для лучшей сходимости экспериментальных и расчетных данных поверхность приближения целесообразно строить не для всей области температур и содержаний легирующих добавок, а выбирать две температурные области — между 0 и 800 °С и между 800 и 1200 °С и две области содержаний легирующих компонентов — между 0 и 7% (для углеродистых сталей) и между 3 и 8% (для низколегированных сталей). Для расчета теплоемкости указанный диапазон температур следует разбить на три области. Но при этом автор не приводит формулы и коэффициенты для определения теплоемкости стали при температурах от 675 до 775 °С, т.е. в диапазоне структурных превращений. Данный недостаток существенно ограничивает область применения рассмотренной расчетной методики.

При расчете коэффициентов теплопроводности и массовой плотности, согласно методикам Велка [5] и Маковского [4], получается достаточно точное совпадение с экспериментальными данными, а максимальные погрешности возникают при расчете коэффициента истинной теплоемкости. Поэтому в данном случае актуальна разработка новых методик расчета истинной теплоемкости.

Такая попытка была предпринята в работе [5], авторы которой поставили перед собой задачу вывода формулы, описывающей температурную зависимость истинной теплоемкости для случая, когда при непрерывном охлаждении аустенита образуется несколько различных фаз.

Для случая образования нескольких фаз в ходе превращений остывающего аустенита с учетом принципа аддитивности формула для истинной теплоемкости стали имеет вид [6]

$$c(T) = c_0(T) + \frac{m_1 L_1}{\delta T_1} \exp \left[-a_1^2 \left(\frac{T_{10} - T}{T_{10} - T_{11}} \right)^2 \right] + \frac{m_2 L_2}{\delta T_2} \exp \left[-a_2^2 \left(\frac{T_{20} - T}{T_{20} - T_{21}} \right)^2 \right] + \dots, \quad (7)$$

где $a_1, a_2, \dots, m_1, m_2, \dots$ – константы, характеризующие специфику превращений аустенита в дочерние фазы «1», «2»; L_1, L_2, \dots – теплоты превращений тех же фаз; $T_{10}, T_{20}, \dots, T_{11}, T_{21} \dots$ – температуры начала и конца превращений фаз; $\delta T_1 = T_{10} - T_{11}, \delta T_2 = T_{20} - T_{21} \dots$ – температурные интервалы превращений аустенита в дочерние фазы;

$$c_0 = 462 + 0,21(T - 323), \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}. \quad (8)$$

Разработанная методика расчета истинной теплоемкости позволяет воспроизвести графики температурной зависимости коэффициента $c_p(T)$ с несколькими пиками, наличие которых зафиксировано для стали с повышенным содержанием хрома.

Анализ справочных данных по вопросу положения пика теплоемкости показал, что для углеродистых марок сталей он происходит в узком интервале температур, незначительно изменяющемся при различном содержании углерода в стали. Так, для стали 35 он составляет 1319 Дж/(кг·град) при 750 °С, что хорошо согласуется с формулой Маковского (3) [4] (пиковое значение теплоемкости равно 1291 Дж/(кг·град)). Для остальных углеродистых сталей пик находится либо выше (стали 15, 20, 45), либо ниже указанного значения (стали 08, У8) [1]. Следует отметить еще одну существенную особенность: при температурах 0–600 и выше 1000 °С графики истинной теплоемкости для всех углеродистых сталей практически совпадают (рис. 2).

При оценке адекватности формул для расчета истинной теплоемкости для некоторых марок стали формула Маковского (3) дает значительные расхождения между расчетными и справочными данными (рис. 2), особенно в области высоких температур (более 800 °С). Кроме того, при рассмотрении диапазона структурных превращений также наблюдаются значительные погрешности расчетов (высота пика, его положение и ширина).

Что касается методики Велка [5], то она позволяет получить достаточно точные результаты в диапазоне температур до 675 и свыше 775 °С (рис. 2). Но использовать ее в практических расчетах процессов нагрева стальных слитков и заготовок затруднительно, так как отсутствует информация о значениях истинной теплоемкости в диапазоне структурных превращений.

Очевидно, что параметр c_p зависит от структурного состояния металла, в связи с чем для понимания указанной зависимости необходимо обратиться к закономерностям структурных превращений в стали, протекающих при формировании стальных заготовок, поступающих в нагревательную печь, что сделано в работе [6].

Результаты, полученные с использованием указанной методики, наиболее точно отражают характер зависимости $c_p(T)$ (рис. 3). Тем не менее, при температурах от 300 до 700 °С наблюдается значительное расхождение расчетных и экспериментальных данных.

Результаты, приведенные ниже, являются продолжением исследований [6]. При этом сравнение расчетных и справочных данных также свидетельствует о том, что предлагаемый авторами [6] подход не всегда позволяет получить достоверные результаты.

Анализ работы [6] показал, что принятая зависимость $c_0(T)$ в виде (8) не согласуется со справочными данными. Кроме того, требует учета влияние химического состава стали на величину теплоты структурных превращений. Варианты, предлагаемые в работе [6], не позволяют добиться удовлетворительной точности при изменении содержания углерода или иных легирующих элементов. В то же время, согласно данным Неймарка, теплота эвтектоидного превращения (L) для углеродистых сталей изменяется весьма значительно (см. таблицу).

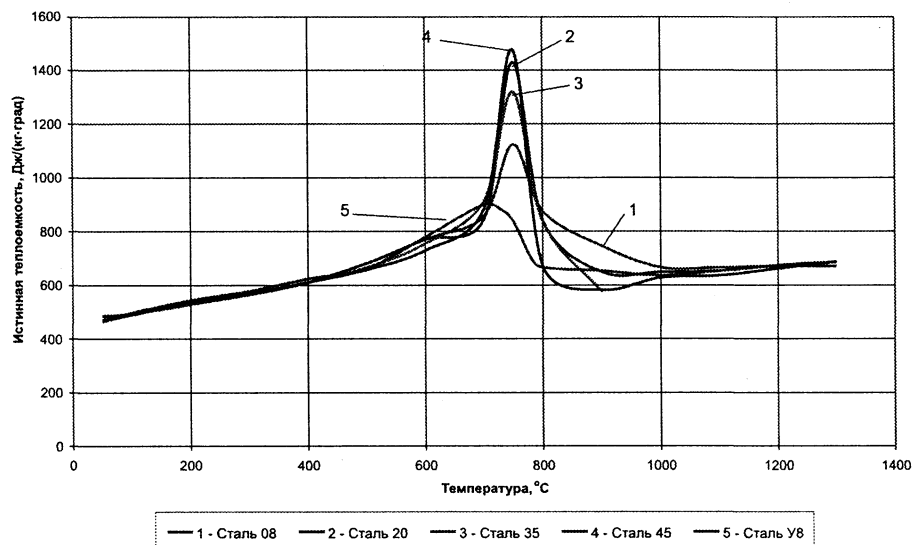


Рис. 2. Зависимость истинной теплоемкости углеродистых сталей от температуры согласно [1]

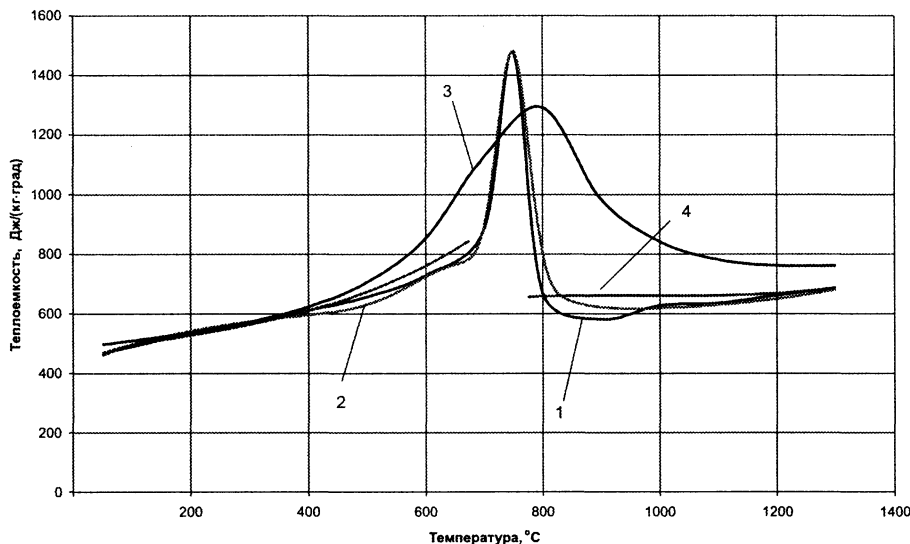


Рис. 3. Сравнение расчетных значений истинной теплоемкости для стали 45, полученных по справочным данным [1] (1); по методике Тимошпольского-Самойловича [6] (2); по методике Маковского [4] (3); по методике Велка [5] (4)

Теплота эвтектоидного превращения углеродистых сталей в зависимости от содержания углерода [5]

Содержание углерода, мас. %	0,15	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	Примечание
$L_{эвт}$, кДж/кг	4,18	11,85	32,2	51,8	61,3	55,8	46,1	Для отожженных или нормализованных сталей
	2,75	6,28	21,6	38,4	53,0	42,7	33,5	Для закаленных сталей

Учитывая сказанное, при решении поставленной задачи коэффициент в зависимости (8) для $c_0(T)$ был изменен, что позволило в дальнейшем при температурах выше 1000 °C получать значения, более близкие к справочным данным:

$$c_0(T) = c_0 + 0,16(T - 323) \text{ — для углеродистых сталей с содержанием [C] до 0,8\%};$$

$c_0(T) = c_0 + 0,18(T - 323) \text{ — для высокоуглеродистых сталей с содержанием [C] от 0,8 до 2,14\%},$
где T — текущее значение температуры, К.

Анализ зависимостей истинной теплоемкости от температуры для других углеродистых марок стали показал, что, несмотря на явно выраженный одиночный пик при температуре структурных превращений, описать реальное изменение $c(T)$ с помощью формулы вида (7) не представляется возможным. Даже при наличии одного фазового перехода (аустенито-перлитного для стали с содержанием углерода 0,8%) формула (7), включающая три экспоненты, значительно точнее отображает искомую зависимость, а для сталей с иным содержанием углерода еще добавляется экспонента, характеризующая промежуточный фазовый переход. Согласно диаграмме состояния Fe—C при [C]=0,02–0,8%, из аустенита выделяется феррит, а в сталях с содержанием углерода от 0,8 до 2,14% — вторичный цементит. Данные явления также вносят свой вклад в зависимость истинной теплоемкости стали от температуры. Целесообразно это учесть, добавив в выражение (7) еще одну экспоненту, температура пика которой будет равна температуре промежуточного фазового перехода.

Таким образом, для углеродистых марок стали выражение для расчета истинной теплоемкости имеет вид

$$c(T) = c_0(T) + \frac{m_i L_i}{\delta T_i} \exp \left[-a_i^2 \left(\frac{T_i - T}{\delta T_i} \right)^2 \right], \tag{9}$$

где $i=1...4$ (кроме стали с содержанием углерода 0,8%, для нее $i=1...3$).

Следует отметить, что в предлагаемой формуле изменяется физический смысл слагаемых по сравнению с трактовкой авторов [3]. Если температуры структурных превращений, т.е. T_1 и T_2 , могут быть определены из диаграммы состояния Fe—C, то температуры дополнительных слагаемых T_3 и T_4 , а также все δT_i и L_i предполагают наличие расчетных формул. В результате предварительных расчетов и аппроксимации полученных данных были установлены следующие значения и зависимости:

для углеродистых сталей с содержанием [C] до 0,8%

$$T_3=923\text{K}, T_4=1033\text{K}, \delta T_1 = 70, \delta T_2 = 350, \delta T_3 = 1100, \delta T_4 = 170,$$

$$L_1=44076-85622x^2+50357x,$$

$$L_2=5163,2-74009x^2+70232x,$$

$$L_3=2622,3-92590x^2+80523x,$$

$$L_4=14775+154544x^2-142489x,$$

для высокоуглеродистых сталей с содержанием [C] от 0,8 до 2,14 %

$$T_3=750\text{K}, T_4=943\text{K}, \delta T_1 = 100, \delta T_2 = 473, \delta T_3 = 1200, \delta T_4 = 600,$$

$$L_1=5000+13455((x/0,8)-1)^{3/4},$$

$$L_2=20180((x/0,8)-1)^{3/4},$$

$$L_3=27000+3370((x/0,8)-1)^{3/4},$$

$$L_4=18500-10100((x/0,8)-1)^{3/4},$$

где x — содержание углерода в стали.

С использованием представленной методики была проведена серия расчетов истинной теплоемкости для ряда углеродистых сталей. Некоторые результаты в сравнении со справочными данными приведены на рис. 4.

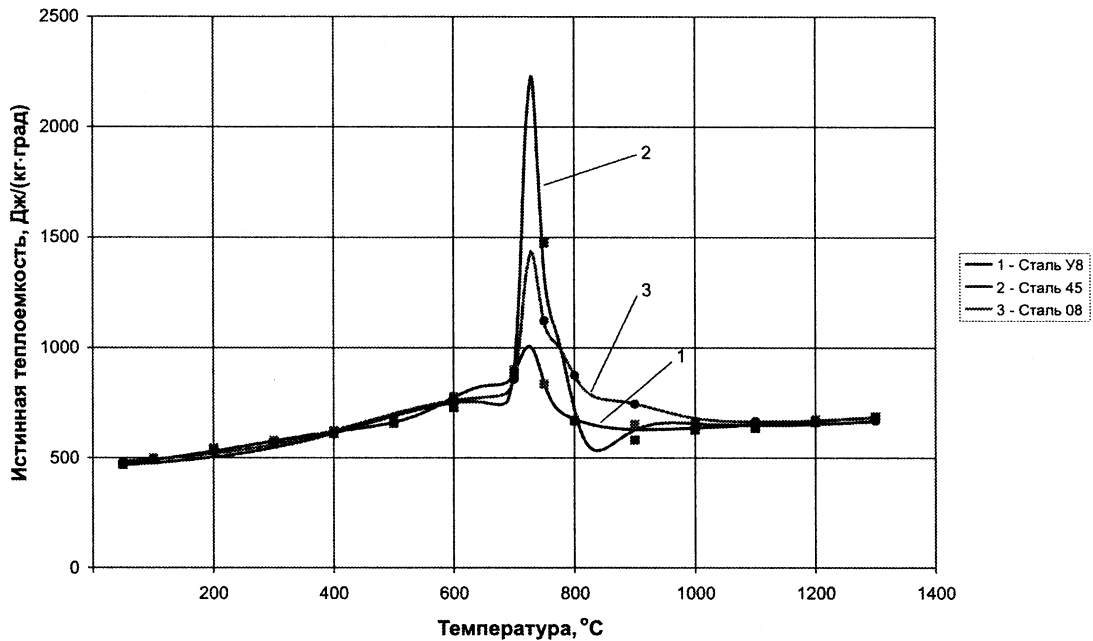


Рис. 4. Сравнение расчетных и справочных значений истинной теплоемкости для углеродистых сталей: маркеры — справочные данные; сплошные линии — расчетные результаты

Очевидно, что предлагаемая методика расчета истинной теплоемкости для углеродистых марок стали позволяет получить результаты, имеющие хорошую сходимость со справочными данными. На наш взгляд, достоинство новой методики состоит в том, что при минимуме необходимых исходных данных (содержание углерода) и без разбиения температурного интервала на отдельные участки есть возможность расчетным путем получить значения истинной теплоемкости.

Следует отметить, что использование уравнения (9) позволяет отобразить наличие нескольких пиковых скачков теплоемкости, характерных для сталей, имеющих повышенное содержание марганца, кремния, хрома и других элементов. Это дает основание для продолжения исследований с целью получения расчетных зависимостей $c_p(T)$ для легированных марок стали.

Таким образом, в настоящей работе представлена методика расчета истинной теплоемкости для углеродистых сталей, которая дает возможность с высокой точностью определять значения $c_p(T)$ в диапазоне температур 50–1300 °C. При этом достаточно знать содержание углерода в стали и использование состояния Fe–C. Данную методику целесообразно применять при математическом моделировании процессов нагрева стальных слитков и заготовок для получения более достоверных результатов.

Литература

1. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справ. / Под ред. Б.Е. Неймарка. М.; Л.: Энергия, 1967.
2. Стальной слиток. В 3 т. Т.3. Нагрев / В.И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович, И. А. Трусова, В.В. Филиппов; Под общ. ред. В.И. Тимошпольского, Ю.А. Самойловича. Мн.: Белорусская наука, 2001.
3. Тимошпольский В.И., Самойлович Ю.А. Нагрев стали: Справ. пособ. Мн.: Выш. шк., 1990.
4. Маковский В.А. Эмпирические формулы для выражения температурной зависимости теплофизических свойств стали // Сталь. 1972. № 1. С. 87–89.
5. Велк Г. Формулы для расчета теплофизических свойств стали на ЭВМ // Черные металлы. 1971. № 5. С. 46–50.
6. Тимошпольский В.И., Самойлович Ю.А., Хопова О.Г. Теплофизические процессы при нагреве металла в кольцевых печах // Литье и металлургия. 2005. №2. С. 62–76.