

плава, недостаточна. Это косвенно отражает наличие существенной неравновесности расплава. В таком случае не исключено, что в дальнейшем потребуется провести дополнительные эксперименты и(или) изменить параметры их проведения, например, температурный интервал и(или) время выдержки. Высокий коэффициент корреляции говорит о тесноте связи используемых параметров и в этом случае может оказаться нецелесообразным проводить дальнейшие эксперименты с тем же объектом. Таким образом, появляется возможность сократить объем экспериментов без ухудшения качества результата.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. № 2386948 РФ. Способ бесконтактного измерения вязкости высокотемпературных металлических расплавов / А.М. Поводатор, В.В. Конашков, В.В. Вьюхин, В.С. Цепелев; опубл. 20.04.2010, бюл. № 11.
2. Пат. № 2299425 РФ. Способ для бесконтактного измерения электрического сопротивления металлического твердого образца или его расплава методом вращающегося магнитного поля и

- устройство для его осуществления / А.М. Поводатор, В.В. Вьюхин, В.С. Цепелев, А.Г. Тягунов; опубл. 20.05.2007, бюл. № 14.
3. Корсунский А.М., Кочетков Г.М. // Физика металлов и металловедение. 1971. Т. 32. Вып. 1. С. 178, 179.
4. Баум Б.А., Тягунов Г.В., Третьякова Е.Е., Цепелев И.С. – В кн.: Свойства металлических расплавов. Ч. 1. – Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 2008. С. 109 – 111.
5. Измерения в промышленности. Справочник / Под ред. П. Профоса. – М.: Metallurgia, 1980. Раздел 2.5.2.3. С. 115.
6. Пат. № 104721 РФ. Устройство для исследования высокотемпературных металлических расплавов / А.М. Поводатор, В.В. Конашков, В.В. Вьюхин, В.С. Цепелев; опубл. 25.05.2011, бюл. № 14А.
7. Фремке А.В. – В кн.: Электрические измерения. – Л.: Энергия, 1980. С. 53.
8. Фремке А.В. – В кн.: Электрические измерения. – Л.: Энергия, 1980. С. 383, 384.
9. Белоусов А.А., Бахвалов С.Г., Алешина С.Н. Физико-химические свойства жидкой меди и ее сплавов. Справочник. – Екатеринбург: изд. УрО РАН, 1997. С. 72, 73.
10. Ларионов В.Н. – В кн.: Свойства металлических расплавов. Ч. 2. – Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 2008. С. 79 – 82.

© 2012 г. А.М. Поводатор, В.В. Конашков,  
В.С. Цепелев, В.В. Вьюхин  
Поступила 12 июля 2011 г.

УДК 669.15'26-194:536.2

**Б.П. Юрьев, Н.А. Спирин**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (филиал в г. Первоуральске)

### ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ МАРКИ ШХ15 В ПРОЦЕССЕ НАГРЕВА

Хромистые заэвтектоидные стали (марок ШХ6, ШХ9, ШХ15 и т.п.) относятся к типу конструкционных, хотя по составу и свойствам принадлежат к классу инструментальных [1]. Эти стали широко применяются в промышленности, особенно при производстве шарикоподшипников. Характерным представителем этой группы является сталь марки ШХ15, которая имеет наибольшее распространение.

Известно, что эффективность использования сталей в значительной степени определяется качеством термической обработки. Реализация оптимального с этой точки зрения графика термической обработки в промышленных печах сопряжена с большими трудностями по обеспечению однородности температурного режима во всем объеме металла. Одна часть этих трудностей обусловлена неравномерностью тепловой работы печей, сложностью конфигурации или массивностью изделий. Другая часть обусловлена тем, что нагрев металла сопровождаются следующие явления [2]: изменение физических и механических свойств, структурные изменения, фазовые превращения, объемные изменения, связанные с термическим расширением, физико-химические изменения (окисление, обезуглероживание и т.д.). Все эти процессы, протекающие с поглощением

или выделением теплоты, оказывают значительное влияние на формирование температурного поля. Поэтому при исследовании процесса термической обработки или при проектировании печей необходимо иметь полное представление о структуре и свойствах нагреваемого металла как в исходном состоянии, так и во всем диапазоне изменения температуры.

Нужно отметить, что имеющихся в технической литературе сведений о свойствах стали марки ШХ15 (и главное о теплофизических свойствах) явно недостаточно. Многочисленные справочники используют в основном те немногие данные, которые впервые были систематизированы в книге [3]. В настоящей работе сделана попытка в какой-то мере восполнить этот пробел.

Без надежных данных о теплофизических свойствах затруднено дальнейшее совершенствование процессов термической обработки труб в нагревательных печах, и прежде всего процесса отжига, а также оптимизация конструктивных и режимных параметров их работы. Без этих данных трудно учесть влияние большинства из перечисленных выше факторов на распределение температур в материале садки, на продолжительность тепловой обработки, на расход топлива и т.д.

Так, в процессе отжига стальных труб в окислительной атмосфере в различные моменты времени, при различных температурах от внешнего источника требуется отнимать теплоту с различной интенсивностью. Характер изменения интенсивности подвода теплоты в полной мере может быть отображен изменением энтальпии при нагревании труб, а скорость изменения температуры в садке труб – коэффициентом температуропроводности.

Определение теплоемкости материалов расчетным путем с учетом данных о химическом составе и теплоемкости отдельных элементов представляет определенную трудность из-за недостаточной изученности применения правила аддитивности. Рассматриваемый метод усложняется еще и тем, что изменение химического состава материалов в процессе нагрева может приводить к образованию таких соединений, которые отсутствуют при комнатных температурах, соответствующих условиям химического и структурного контроля.

Затраты теплоты на нагрев труб в садке будут определяться суммой физической теплоемкости и удельной затраты теплоты на процессы, связанные с изменением магнитных свойств стали или тепловыделений за счет окисления железа и горения углерода в стали, т.е. кажущейся теплоемкостью [4].

Теплопроводность стали зависит от ряда факторов: химического состава, температуры, структуры, степени загрязнения примесями, а также от условий обработки. В результате стали одинакового химического состава могут иметь различную структуру, а следовательно, и различную теплопроводность [2, 5]. Определение совокупной зависимости теплофизических свойств сталей от ряда факторов представляет большую сложность и возможно лишь экспериментальным путем. Одной из задач настоящей работы и являлось экспериментальное определение теплофизических свойств стали марки ШХ15 в процессе нагрева в широком интервале температур.

Исследование свойств рассматриваемого материала проведено для двух исходных структур: зернистого и мелкопластинчатого перлита. Такой выбор сделан из следующих соображений. Структура зернистого перлита, позволяющая провести качественную обработку стали марки ШХ15 резанием, в то же время является оптимальной, исходной структурой для термической обработки под закалку. В свою очередь структура мелкопластинчатого перлита является оптимальной перед отжигом стали ШХ15 на зернистый перлит. Структура мелкопластинчатого перлита обычно получается после горячей механической обработки (ковки, прокатки и т.д.), если правильно выдержан температурный режим. В противном случае для получения структуры мелкопластинчатого перлита проводится нормализация [1]. Следовательно, выбранные исходные структуры имеют большое значение в практике термической обработки стали марки ШХ15.

Изучение теплофизических свойств исследуемой стали проводилось на образцах, изготовленных из об-

щей заготовки со структурой зернистого перлита первого балла. Для получения структуры мелкопластинчатого перлита половина образцов была подвергнута нормализации (нагрев до температуры 930 – 950 °С, выдержка в течение 30 мин и охлаждение на воздухе). Сталь имела следующий химический состав (по массе): 1,02 % С; 1,40 % Cr; 0,31 % Mn; 0,22 % Si; 0,10 % Cu; 0,086 % Ni; 0,002 % S; 0,019 % P.

Измерение коэффициента линейного расширения в зависимости от температуры проводилось на дифференциальном dilatометре фирмы «Карл Вейсс». Его величину определяли расчетом из выражения

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta l}{n L_0 (T - 293)} + 0,54 \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

где  $\bar{\alpha}$  – коэффициент линейного расширения,  $K^{-1}$ ;  $\Delta l$  – удлинение образца по указателю dilatометра, мм;  $n = 200$  – коэффициент увеличения dilatометра;  $L_0 = 65$  – длина образца диам. 11 мм при температуре 293 К, мм;  $T$  – температура образца, К;  $0,54 \cdot 10^{-6}$  – постоянная dilatометра.

Результаты изменений величины  $\bar{\alpha}$  приведены на рис. 1.

Плотность стали  $\rho_0$ ,  $кг/м^3$ , при температуре 293 К находили путем тщательного обмера и взвешивания образцов цилиндрической формы по следующему уравнению:

$$\rho_0 = \frac{4 M_0}{\pi d_0^2 L_0}, \quad (2)$$

где  $M_0$  – масса образца, кг;  $d_0$  – диаметр образца, м.

В результате измерений и расчетов получено, что  $\rho_0 = 7798 \pm 7$   $кг/м^3$ . Зависимость плотности стали от температуры находим из выражения

$$\rho(T) = \frac{\rho_0}{K_v(T)}, \quad (3)$$

где  $K_v(T) = 1 + 3\bar{\alpha}(T - 293)$ .

Результаты расчета плотности стали приведены на рис. 1.

Изменение энтальпии стали в процессе нагрева до температуры 773 К изучалось на негерметичной [6], а

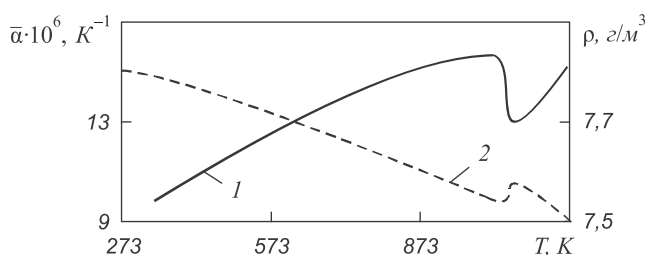


Рис. 1. Зависимости коэффициента линейного расширения (1) и плотности (2) стали марки ШХ15 от температуры

при более высоких температурах – на вакуумной [7] установках с адиабатическим калориметром. Кроме того, при температурах выше 773 К образцы нагревали в защитной атмосфере гелия. Точность измерения энтальпии стали в опытах составляла  $\pm 1\%$ .

Изменение энтальпии  $\Delta H_{T_K}^{T_n}$ , кДж/кг, стали при нагревании в интервале от температуры  $T_K$ , К, калориметра до температуры  $T_n$ , К, печи определяли по формуле

$$\Delta H_{T_K}^{T_n} = \frac{W(\Delta T - \Delta T_{\text{амп}} G_{\text{амп}})}{G}, \quad (4)$$

а среднюю теплоемкость  $\bar{c}_p$ , кДж/(кг·К), находили из выражения

$$\bar{c}_p = \frac{W(\Delta T - \Delta T_{\text{амп}} G_{\text{амп}})}{(T_n - T_K)G}, \quad (5)$$

где  $W$  – тепловое значение калориметра, кДж/К;  $\Delta T$  и  $\Delta T_{\text{амп}}$  – изменение температуры оболочки калориметра за время опыта и от 1 г ампулы, К;  $G$  и  $G_{\text{амп}}$  – масса исследуемого образца и ампулы, кг.

Определение истинной теплоемкости стали проводили путем дифференцирования экспериментально полученной зависимости ее энтальпии от температуры. Результаты расчета истинной теплоемкости приведены на рис. 2, а.

Измерение коэффициента температуропроводности осуществлялось методом регулярного режима второго рода, учитывающим зависимость температуропроводности материала от температуры, в процессе монотонного нагрева образцов цилиндрической формы [8].

При практическом использовании метода регулярного режим необходимо решение трех основных задач: обеспечение симметричного нагрева исследуемого

образца; измерение перепада температур в образце; измерение скорости изменения температуры образца.

Описанные в литературе [9] конструкции нагревательных устройств для образцов цилиндрической формы имеют по крайней мере один из двух недостатков: обладают большой тепловой инерцией; не обеспечивают защиты образца и измерительных термопар от магнитного поля электронагревателя.

По этой причине была разработана и изготовлена портативная электрическая трубчатая печь, конструкция которой приведена на рис. 3. С целью снижения тепловой инерции печь выполнена по возможности менее массивной, с минимальной толщиной теплоизоляции. Центральная труба 3 выполняет несколько функций: является контейнером для нагревательных образцов 8, несет на себе электронагреватель, является магнитным экраном для образцов и термопар 15. Конструкция электронагревателя обеспечивает снижение его магнитного влияния в 80 – 100 раз по сравнению со спиральным нагревателем той же мощности. Такая конструкция нагревателя значительно надежнее бифиллярной спирали и одинакова с ней по эффективности снижения влияния магнитного поля.

Расчет коэффициента  $a$ , м<sup>2</sup>/с, температуропроводности осуществляли по формуле

$$a = \frac{R^2 b}{4\Delta T}, \quad (6)$$

где  $R$  – расстояние от оси образца до заданной точки, м;  $b$  – скорость изменения температуры в этой точке, К/с;  $\Delta T$  – разность температур на оси образца и в заданной точке, К.

Величина перепадов температуры  $\Delta T$  при измерениях не превышала 5 – 8 К. Это позволило вести расчет по

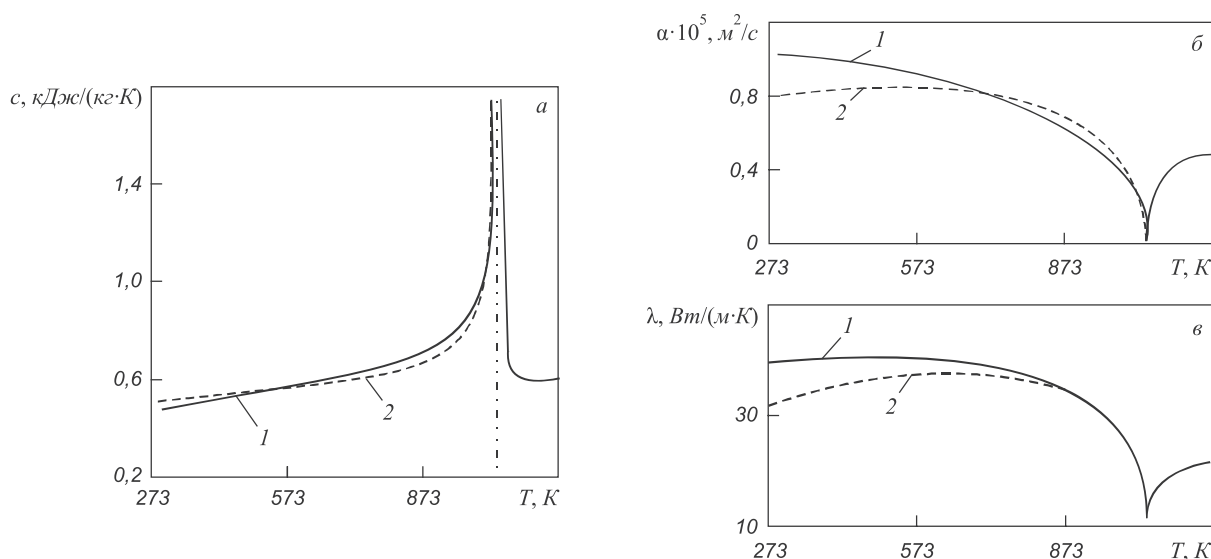


Рис. 2. Зависимость истинной теплоемкости (а), коэффициентов температуропроводности (б) и теплопроводности (в) стали 3Х15 от температуры:

1 – для структуры зернистого перлита; 2 – для структуры мелко-пластинчатого перлита

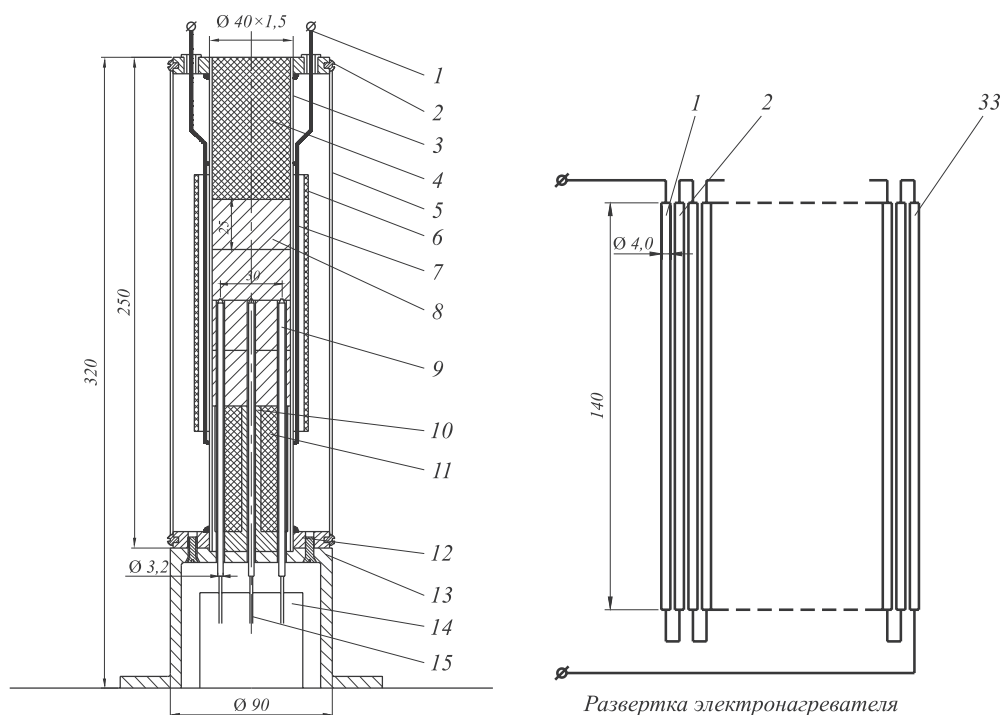


Рис. 3. Конструкция нагревательной электропечи для измерения температуропроводности:

- 1 – нихром диам. 1,2 мм; 2 – изолятор; 3 – труба (диам. 40×1,5 сталь марки 1Х18Н10Т); 4 – цилиндр (шамот ультралегковесный); 5 – труба (диам. 90×1,0 сталь марки 1Х18Н10Т); 6 – асбестовая изоляция; 7 – элемент нагревателя (трубка фарфоровая диам. 40 мм); 8 – образец; 9 – «соломка» двухканальная; 10 – подпятник (сталь 45); 11 – полый цилиндр (шамот ультралегковесный); 12 – фланец (сталь 45); 13 – подставка (сталь 45); 14 – окно для вывода термопар; 15 – термопара ХА диам. 0,5 мм

уравнению (6) без введения нелинейных поправок [10]. Для регистрации столь малых перепадов применялся автоматический потенциометр ЭПР-09 с растянутой шкалой 0 – 100 °С. Изменение пределов измерения осуществлялось при помощи переносного потенциометра ПП-63. Для повышения точности измерений нагрев одного и того же образца проводился 7 – 8 раз с разной скоростью. Отношение  $b/\Delta T$  определялось как угловой коэффициент линии регрессии для зависимости  $b_i = f(\Delta T_i)$  методом наименьших квадратов.

Метод измерения температуропроводности был проверен предварительно на стали марки 45. Отклонение полученных результатов от литературных данных не превышало  $\pm 5\%$  [10]. Результаты измерения коэффициента температуропроводности стали марки ШХ15 приведены на рис. 2, б. Расчет коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·К), исследуемого материала проведен по результатам измерения плотности, теплоемкости и температуропроводности по известному соотношению

$$\lambda = \alpha \rho r. \quad (7)$$

Результаты расчетов приведены на рис. 2, в.

**Выводы.** На основе существующих методов определены теплофизические свойства стали марки ШХ15 (теплоемкость, коэффициенты тепло- и температуропроводности) в интервале температур 298 – 1173 К. Полученные в работе результаты могут быть использованы как при

проектировании новых нагревательных печей для термообработки полуфабрикатов (проката, поковок и т.д.) или готовых изделий из стали марки ШХ15, так и при оптимизации существующих процессов термообработки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Раузин Я.Р. Термическая обработка хромистой стали. – М.: Госнаучтехиздат машиностроительной литературы, 1963. – 384 с.
2. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. – М.: Госнаучтехиздат литературы по черной и цветной металлургии, 1962. – 567 с.
3. Конструкционные стали. Справочник. Т. 1 / Под ред. Н.Т. Гудцова. – М.: Госнаучтехиздат литературы по черной и цветной металлургии, 1947. – 482 с.
4. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Л. Теплообмен в доменной печи. – М.: Металлургия, 1966. – 355 с.
5. Капытов В.Ф. Нагрев стали в печах. – М.: Госнаучтехиздат литературы по черной и цветной металлургии, 1955. – 264 с.
6. Серебrenников Н.Н., Гельд П.В. // Сталь. 1954. № 3. С. 199 – 201.
7. Серебrenников Н.Н., Кренцис Р.П., Гельд П.В. // Заводская лаборатория. 1960. Т. 26. № 1. С. 109 – 203.
8. Юрьев Б.П., Ярошенко Ю.Г., Хомутигин В.С., Швыдкий В.С. // Изв. АН СССР. Металлы. 1977. № 1. С. 70 – 73.
9. Рафалович И.М., Денисова И.А. Определение теплофизических свойств металлургических материалов. – М.: Металлургия, 1971. – 160 с.
10. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А.Г. Шашков, Г.М. Волоосов, Т.Н. Абраменко, В.П. Козлов. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.

© 2012 г. Б.П. Юрьев, Н.А. Спиринов  
Поступила 19 июня 2011 г.