

Научная статья
УДК 669.24'292:537.311.3:536.21
DOI 10.18101/2306-2363-2022-1-47-57

ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ И ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ СТАЛИ 38ХНЗМА ВБЛИЗИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

© **Горбатов В. И.**

кандидат физико-математических наук, доцент,
Уральский государственный горный университет
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
научный сотрудник,
Институт теплофизики УрО РАН
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 107А
gorbatov@ursmu.ru.

© **Ильиных С. А.**

кандидат физико-математических наук, доцент,
Уральский государственный горный университет
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

© **Куриченко А. А.**

кандидат физико-математических наук, доцент,
Уральский государственный горный университет
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

© **Полев В. Ф.**

кандидат физико-математических наук, доцент,
Уральский государственный горный университет
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

© **Манжуев В. М.**

кандидат физико-математических наук, доцент,
Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В. Р. Филиппова
670034, г. Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8

Аннотация. В данной работе представлены экспериментальные данные по измерению коэффициента температуропроводности $a(T)$ и удельного электросопротивления $\rho(T)$ конструкционной стали марки 38ХНЗМА в интервале температур 600–1600 К. Показано, что в режиме нагрев-охлаждение зависимости $a(T)$ и $\rho(T)$ имеют значительный температурный гистерезис, связанный со структурным превращением мартенсит-аустенит. Установлены температуры магнитного (температура Кюри) и мартенситного превращений при термоциклировании со скоростью до 10 К/мин. Получены аппроксимирующие уравнения для определения $a(T)$ и $\rho(T)$. Проведена оценка температурной зависимости коэффициента теплопроводности данного сплава при высоких температурах. По результатам измерения удельного электросопротивления с помощью закона Видемана-Франца-Лоренца определен электронный вклад переноса энергии в общий процесс теплопроводности. Показано, что для определения температур начала и конца магнитных и структурных фазовых переходов в стали марки 38ХНЗМА лучше всего подходит анализ температурной зависимости температуропроводности $a(T)$.

Ключевые слова: температуропроводность, электросопротивление, сталь 38ХНЗМА, аустенит, мартенсит, точка Кюри, структурные превращения, метод плоских температурных волн, высокие температуры.

Для цитирования: Горбатов В. И., Ильиных С. А., Куриченко А. А., Полев В. Ф., Манжуев В. М. Температуропроводность и электросопротивление стали 38ХНЗМА вблизи фазовых превращений // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2022. Вып. 1. С. 47–57.

Введение

Для улучшения механических свойств и эксплуатационных характеристик горного инструмента учеными ведутся исследовательские работы не только по созданию новых высокопрочных конструкционных материалов, но и по формированию высокопрочного состояния в уже известных сталях и сплавах. В последнем случае основные усилия направлены на использовании различных видов фазовых превращений, возникающих в сплавах при изменении температуры. Так, например, существование в железе и его сплавах прямого $\alpha \rightarrow \gamma$ и обратного $\gamma \rightarrow \alpha$ мартенситного превращения, который, как правило, сопровождается большим температурным гистерезисом, открывает возможность с помощью локального нагрева (лазерного или индукционного) изменять заданным образом фазовый состав по объему изделия, т.е. получить материал с неоднородными физическими свойствами [1, 2]. Однако для практического применения такого метода необходимо достаточно точно идентифицировать температуры начала и конца фазовых превращений в конкретном сплаве, а также величину температурного гистерезиса с учетом скорости его нагрева и охлаждения.

Как известно, важную информацию о температуре и виде фазового превращения в металлах и сплавах могут дать исследования температурных зависимостей удельного электросопротивления ρ и коэффициента температуропроводности a [3, 4]. Такой подход обусловлен тем, что зависимости $\rho(T)$ и $a(T)$ в окрестности температур фазового перехода ведут себя строго определенным образом. При фазовом переходе первого рода (полиморфные превращения) удельное электросопротивление и температуропроводность изменяются скачком. Вблизи температур фазового превращения второго рода (точка Кюри, порядок-беспорядок) зависимость $\rho(T)$ имеет аномалию в виде точки излома или точки перегиба, а зависимость $a(T)$ имеет ярко выраженную форму λ -образного минимума [5, 6].

Кроме того, эффективное применение конструкционных материалов невозможно без знания их температурных зависимостей теплофизических и кинетических свойств в широком интервале температур (вплоть до плавления). Недостаток такой экспериментальной информации является основным препятствием на пути выяснения особенностей физических процессов, протекающих в этих сплавах. Такие данные необходимы также для математического моделирования процесса распространения тепла в них, которое требуется при проведении разнообразных проектно-конструкторских работ и при разработке технологических приемов по упрочнению сплавов.

Целью настоящей работы является измерение температуропроводности, удельного электросопротивления и оценка коэффициента теплопроводности хромоникельмолибденовой среднелегированной стали марки 38ХНЗМА, а также

определение температур начала и конца фазовых превращений в процессе нагрева и охлаждения в интервале температур от 300 до 1600 К. Интерес к данным исследованиям обусловлен тем, что сталь марки 38ХН3МА широко применяется для изготовления ответственных деталей с высокими требованиями по механическим свойствам при нормальных и повышенных температурах.

Обзор научной и справочной литературы показал, что экспериментального исследования температурной зависимости коэффициента температуропроводности $a(T)$ этой марки стали не проводилось, а сведения о температурных зависимостях удельного электросопротивления $\rho(T)$ и коэффициента теплопроводности $\lambda(T)$ имеются только до температуры 1073 К (800 °С) [7, 8].

Методика измерений

Образцы для исследования температуропроводности и удельного электросопротивления вырезались из одного и того же прутка стали марки 38ХН3МА электроискровым методом с постоянным охлаждением в масле. Готовые образцы перед загрузкой в измерительную ячейку подвергали дополнительной ручной шлифовки. Измерения размеров, полученных образцов, выполняли на приборе ИЗВ-1 с точностью ± 1 мкм. Химический состав стали 38ХН3МА приведен в [7].

Измерения температурных зависимостей температуропроводности $a(T)$ выполняли методом плоских температурных волн [9] на двух оригинальных автоматизированных установках, с общей относительной среднеквадратичной погрешностью, не превышающей 3 % при доверительной вероятности 0.95.

На первой установке измерения температуропроводности проводили в атмосфере чистого гелия, который запускали в водоохлаждаемую камеру после предварительного вакуумирования до давления 10^{-2} Па. Среднюю температуру образца изменяли при помощи кольцевой печи электросопротивления по заданному временному графику, а температурные волны возбуждали модулированным по амплитуде излучением лазера ЛГН-701 [10]. Образец для проведения исследований на этой установке имел форму плоскопараллельной квадратной пластины размером 12×12 мм² и толщиной 1.489 мм. Оптимальную частоту модуляции лазерного излучения для данного образца выбирали из интервала $6 < \nu < 12$ Гц. Средняя скорость нагрева и охлаждения образца на этой установке не превышала 10 К/мин.

На второй установке нагрев образца и генерацию колебаний температуры на его поверхности осуществляли в вакууме частично модулированным пучком электронов, ускоряемых высоковольтным электрическим полем, приложенным между катодом и образцом [11]. Образцы представляли собой плоскопараллельные диски диаметром 10 мм и толщиной 0.503 и 0.66 мм. Модуляцию электронного пучка осуществляли с частотой, лежащей в интервале от 8 до 32 Гц. Максимальная скорость нагрева исследуемых образцов за пределами температур фазовых переходов на этой установке достигала значений ~ 200 К/мин.

Колебания температуры на поверхности образцов (противоположной к нагреваемой) на обеих установках регистрировали фотодатчиками на основе германиевого фотодиода. Среднюю температуру образцов измеряли термопарой ВР5/ВР20 толщиной 50 мкм, концы которой приваривали точечной сваркой к поверхности в центре образца без образования спаев. Сигналы с датчиков после прохождения через линейные нормирующие цепи подавались на внешний анало-

го-цифровой преобразователь E14-440 и затем поступали в компьютер для дальнейшей обработки. Определение амплитуды и фазового сдвига колебаний температуры на второй поверхности образца по отношению к колебаниям теплового потока осуществляли в соответствии с процедурой, использующей преобразование Фурье.

Измерения удельного электросопротивления выполняли четырехзондовым потенциометрическим стационарным методом в атмосфере гелия [5, 12]. Исследуемые образцы представляли собой параллелепипеды высотой 12 мм и сечением 1.5×1.5 мм². К ним на расстоянии 8-10 мм друг от друга на одной и той же плоскости образца приваривались две платина-платинородиевые термодпары толщиной 50 мкм, одноименные ветви которых использовались затем в качестве потенциальных электродов для измерения напряжений при заданном токе в образце. Максимальная (при доверительной вероятности 0.95) относительная погрешность, обусловленная в основном погрешностью определения геометрических размеров рабочего участка, не превышала 2 %. Скорость нагрева и охлаждения образца на этой установке при переходе из одного стационарного состояния в другое не превышала 10 К/мин.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Результаты экспериментального исследования температурных зависимостей коэффициента температуропроводности стали марки 38ХНЗМА частично представлены на рис. 1. Эти данные получены нами в серии измерений при нагреве (кривая 1) и охлаждении (кривая 2) исходного (не отожженного) образца в интервале температур 600–1400 К, а затем при нагреве того же образца (кривая 3) до температуры 1600 К.

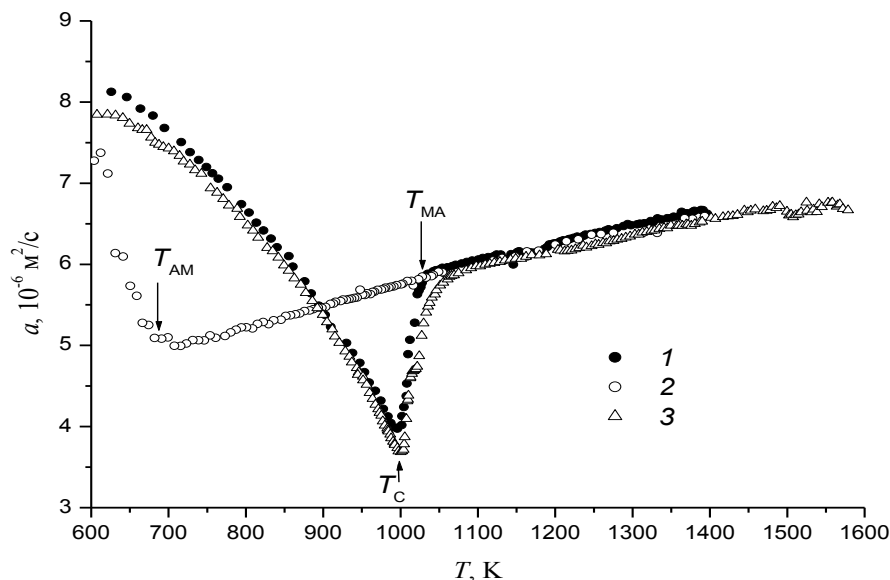


Рис. 1. Температурная зависимость температуропроводности стали марки 38ХНЗМА: 1 — первый нагрев, 2 — охлаждение, 3 — повторный нагрев

Из хода графических зависимостей $\alpha(T)$ видно, что при нагреве образца вблизи $T_C = 1000 \pm 5$ К наблюдается четко выраженный λ -минимум температуропроводности, соответствующий фазовому переходу второго рода. Значение T_C совпадает с температурной Кюри бинарного сплава Fe-Ni с содержанием никеля 3 ат. % [12]. Поскольку в исследуемой нами стали 38ХНЗМА основным легирующим элементом являются Ni (~3%), то можно считать, что при 1000 К сталь претерпевает магнитное фазовое превращение (температура Кюри), при котором ферромагнитный мартенсит (α -железо) переходит в парамагнитное состояние (β -железо).

При дальнейшем повышении температуры в интервале от 1030 до 1060 К на кривой 3 виден резкий скачок температуропроводности от $4.5 \cdot 10^{-6}$ до $5.8 \cdot 10^{-6}$ м²/с, который по форме соответствует размытому фазовому переходу первого рода. Поэтому можно предположить, что в этом интервале температур парамагнитный мартенсит постепенно переходит в аустенит (γ -железо). Поскольку выше этого интервала температур зависимости $\alpha(T)$, полученные при нагреве и затем при охлаждении от 1600 К, совпадают, то можно утверждать, что полное превращение мартенсита в аустенит происходит при $T_{MA} = 1060$ К. Полученные значения температур фазовых превращений хорошо согласуются с температурами критических точек A_{C1} (993 К) и A_{C3} (1063 К), представленными для стали марки 38ХНЗМА в [7].

При понижении температуры равновесная парамагнитная аустенитная фаза переохлаждается до $T_{AM} = 670 \pm 5$ К и затем начинает переходить в ферромагнитный мартенсит, что характеризуется изломом на кривой $\alpha(T)$. Подобный температурный гистерезис температуропроводности наблюдается для других типов сталей на основе железа, например 16Х12В2ФТаР и ЧС-139 [13, 14].

При повторном нагреве образца значения температуропроводности во всем исследованном диапазоне температур лежат ниже значений, полученных при первом нагреве образца. Можно предположить, что эта разница, сравнимая с погрешностью измерения температуропроводности, связана с исходным состоянием не отожженного образца.

Анализ кривых удельного электросопротивления по выявлению температур фазовых переходов выполним с учетом следующих соображений. В случае отсутствия каких-либо превращений в исследуемом сплаве 38ХНЗМА температурный ход зависимости $\rho(T)$ образца должен иметь линейный вид. Возникновение любых отклонений от линейности в процессе нагрева или охлаждения следует рассматривать как развитие в образце фазовых или внутри фазовых превращений.

Экспериментальные данные по удельному электросопротивлению в виде температурных зависимостей представлены на рис. 2. Здесь показаны зависимости $\rho(T)$ (кривые 1 и 2), полученные нами в цикле «нагрев-охлаждение» исходного образца, и кривые 3 и 4, полученные при повторных циклированиях того же образца до температуры ~1600 К.

Измерения показывают, что при нагреве стали 38ХНЗМА от 300 до 1060 К наблюдается явный нелинейный рост электросопротивления (кривые 1 и 3) с изменением кривизны нелинейности (с положительной на отрицательную) вблизи 1000 К. Такая зависимость $\rho(T)$ в сплавах на основе железа связана с магнитным

разупорядочением, происходящем в α -железе. Значит, вблизи 1000 К мартенсит переходит из ферромагнитного состояния в парамагнитное состояние. Линейный рост электросопротивления выше $T_{MA} = 1060$ К свидетельствует о завершении перехода парамагнитного мартенсита в парамагнитный аустенит в интервале 1000–1060 К.

Охлаждение образцов от 1600 К показывает, что обратное превращение аустенита в мартенсит начинается при более низкой температуре. На это указывает резкое отклонение от линейности зависимости $\rho(T)$ (кривые 2 и 4) вблизи $T_{AM} = 670$ К. Однако точно определить температуру окончания данного превращения невозможно из-за плохой воспроизводимости результатов измерения электросопротивления при $T = 300$ К.

Следует также заметить, что форма экспериментальных кривых, полученных при нагреве, в интервале температур от 300 до 1060 К хорошо согласуется с ходом зависимости $\rho(T)$, построенной по справочным данным для этой марки стали (кривая 5) [7]. В то же время видно, что разница в численных значениях удельного электросопротивления при фиксированной температуре существенна и превышает погрешность измерений. Действительно, при $T = 873$ К измеренное нами значение $\rho(T) = 84.6 \times 10^{-8}$ Ом·м больше справочного значения на 10.4×10^{-8} Ом·м. Отклонение составляет 12 %. Если при этом учесть, что кривая $\rho(T)$ при первом нагреве исходного образца (кривая 1) до 900 К лежит ниже кривой 3, полученной при его повторном нагреве, то можно предположить, что данные расхождения могут быть связаны, во-первых, со скоростью нагрева и охлаждения стали (кривая 1), а, во-вторых, с наличием остаточного аустенита после охлаждения образца от высокой температуры (кривая 3).

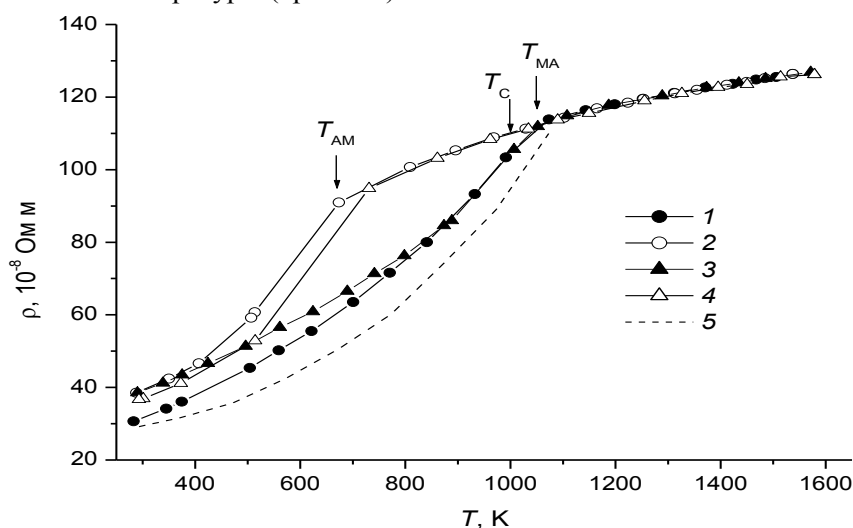


Рис. 2. Температурные зависимости электросопротивления стали марки 38ХНЗМА при термоциклировании: 1 — первый нагрев; 2 — охлаждение; 3,4 — повторный нагрев и охлаждение; 5 — справочные данные [7].

В связи со сложной зависимостью коэффициента температуропроводности и удельного электросопротивления от температуры получить единую аппроксимацию экспериментальных данных не представляется возможным. Поэтому ис-

пользовалась обработка в ограниченных температурных диапазонах. В интервале 600–1000 К получены следующие зависимости:

$$a(T) = (9.484 - 5.523 \cdot 10^{-3} T + 1.283 \cdot 10^{-5} T^2 - 1.312 \cdot 10^{-8} T^3) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$\rho(T) = (10.28 + 0.13T - 1.508 \cdot 10^{-4} T^2 + 1.138 \cdot 10^{-7} T^3) \cdot 10^{-8} \text{ Ом м}.$$

При охлаждении от 1600 К до температуры T_{AM} аппроксимационные уравнения имеют вид:

$$a(T) = (2.514 + 4.08 \cdot 10^{-3} T - 8.59 \cdot 10^{-7} T^2) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$\rho(T) = (8.992 + 0.18T - 9.967 \cdot 10^{-5} T^2 + 2.076 \cdot 10^{-8} T^3) \cdot 10^{-8} \text{ Ом м}.$$

Достоверность аппроксимации составила $R^2 = 0,9996$. Эти зависимости описывают данные, полученные на отожженных образцах при скоростях нагрева не превышающих 10 К/мин.

Для определения коэффициента теплопроводности использовали соотношение [16]:

$$\lambda = a c_p d, \quad (1)$$

где a — температуропроводность; c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении; d — плотность образца.

С помощью соотношения (1) по результатам измерения температуропроводности была рассчитана температурная зависимость коэффициента теплопроводности $\lambda(T)$. В расчетах зависимости $\lambda(T)$ использовали результаты измерения температуропроводности $a(T)$, а также литературные данные по температурным зависимостям удельной теплоемкости $c_p(T)$ и плотности $d(T)$ для чистого железа [4] с учетом смещения температуры Кюри и температуры полиморфного $\beta \rightarrow \gamma$ превращения, характерных для стали 38ХНЗМА. Такое заимствование вполне оправдано, поскольку в данном сплаве содержание железа составляет 94 вес. %, а основными легирующими элементами являются Ni (~3 вес. %) и Cr (~1 вес. %).

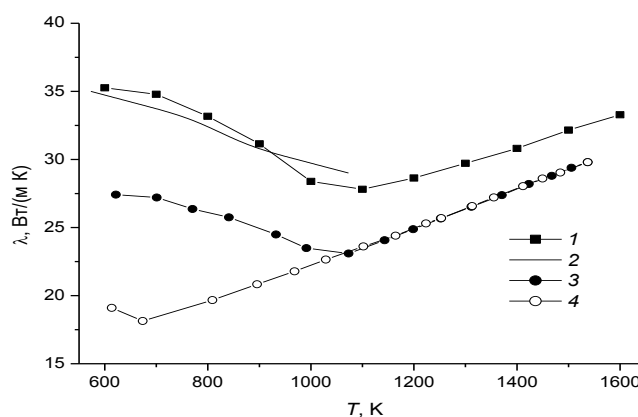


Рис. 3. Температурные зависимости коэффициента теплопроводности стали марки 38ХНЗМА: 1 — коэффициент полной теплопроводности; 2 — справочные данные [8]; 3, 4 — электронная составляющая коэффициента теплопроводности при нагреве и охлаждении соответственно

Результаты расчета температурной зависимости коэффициента теплопроводности представлены на рис. 3 (кривая 1). Общая погрешность определения $\lambda(T)$, исключая окрестности температур фазовых переходов, оценивается нами в 5–7 %. Полученные значения в интервале температур от 600 до 1073 К хорошо согласуются с экспериментальными данными (кривая 2), представленными в марочнике [8]. Расхождение наших результатов и литературных данных не превышает 4 %.

В металлах и сплавах, испытывающих разного рода фазовые превращения, теплопроводность можно оценить также исходя из того, что перенос тепловой энергии в них осуществляется двумя типами носителей: электронами проводимости и колебаниями кристаллической решетки [4], т.е.

$$\lambda = \lambda_{\text{э}} + \lambda_{\text{ф}},$$

где $\lambda_{\text{э}}$ — электронная составляющая, $\lambda_{\text{ф}}$ — решеточная составляющая теплопроводности.

Температурную зависимость электронной составляющей теплопроводности можно определить с помощью закона Видемана-Франца $\lambda = LT/\rho$ по результатам измерения электросопротивления $\rho(T)$ в цикле «нагрев-охлаждение». Такая оценка $\lambda_{\text{э}}(T)$ с использованием стандартного числа Лоренца представлена на рис. 3 (кривые 3 и 4).

Из рисунка видно, что с повышением температуры полная теплопроводность $\lambda(T)$ мартенсита нелинейно (с отрицательной кривизной) убывает, а полная теплопроводность $\lambda(T)$ аустенита линейно возрастает. Аналогичным образом ведет себя при нагреве образца и электронная составляющая $\lambda_{\text{э}}$ (кривая 3). Из сравнения графиков можно заключить, что рост полной теплопроводности аустенита (выше 1100 К) обусловлен вкладом электронной составляющей $\lambda_{\text{э}}$, которая при высоких температурах дает основной вклад в полную теплопроводность. Вклад решеточной составляющей $\lambda_{\text{ф}}$ здесь не превышает 10 %. Вклад $\lambda_{\text{ф}}$ в теплопроводность мартенсита более существенен и составляет 18–20 %.

Заключение

Получены новые экспериментальные данные по коэффициенту температуропроводности a и удельному сопротивлению ρ ферритно-мартенситной стали 38ХНЗМА при циклировании в режиме «нагрев-охлаждение» от 300 до 1600 К. По этим данным определены температуры начала и конца структурного фазового перехода мартенсит-аустенит и температура магнитного (ферромагнетик-парамагнетик) превращения в мартенсите при скоростях нагрева образцов, не превышающих 10 К/мин.

Показано, что магнитное превращение в сплаве проявляется в виде глубокого минимума на температурной зависимости $a(T)$, а взаимные фазовые переходы аустенит-мартенсит происходят со значительным температурным гистерезисом. Показано также, что для определения температур начала и конца фазовых превращений аустенит-мартенсит, а также величины температурного гистерезиса в стали 38ХНЗМА лучше всего подходит анализ температурной зависимости температуропроводности $a(T)$.

Полученные данные могут быть использованы при тепловых расчётах узлов и деталей, изготовленных из стали 38ХНЗМА и работающих при высоких темпе-

ратурах. На основании полученных результатов осуществима возможность с помощью локального нагрева (лазерного или индукционного) изменять заданным образом фазовый состав по объему готового изделия, т.е. получить материал с требуемыми физическими свойствами.

Литература

1. Головин Г. Ф., Зимин Н. В. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева. Ленинград: Машиностроение, 1990. 87 с. Текст: непосредственный.
2. Либман М. А., Эстрин Э. И. Мартенситные превращения и проблема создания материалов с неоднородными физическими свойствами // Фазовые превращения и прочность кристаллов: сборник тезисов VIII Международной конференции. Черноголовка, 2014. С. 6–10. Текст: непосредственный.
3. Лившиц Б. Г., Крапошин В. С., Линецкий Я. Л. Физические свойства металлов и сплавов. Москва: Металлургия, 1980. 320 с. Текст: непосредственный.
4. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Москва: Металлургия, 1989. 384 с. Текст: непосредственный.
5. Akhtyamov E. R., Gorbатов V. I., Polev V. F. and Korshunov I. G. Electrical Resistivity and Thermal Electromotive Force of Ni75V25, Ni72V28, and Ni67V33 Alloys at High Temperatures // *Physics of Metals and Metallography*. 2017. V. 118, No. 6. P. 546–552.
6. Gorbатов V. I., Polev V. F., Il'inykh S. A., Starostin A. A. and Korshunov I. G. Effect of Small Titanium Concentrations on the Thermal Diffusivity of Fe–Ti System Alloys at High Temperatures // *High Temperature*. 2019. V. 57, No. 5. P. 636–640.
7. Драгунов Ю. Г., Зубченко А. С., Каширский Ю. В. и др. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. Москва: Машиностроение, 2014. 1216 с. Текст: непосредственный.
8. Сорокин В. Г., Волоспикова А. В., Вяткин С. А. и др. Марочник сталей и сплавов. Москва: Машиностроение, 1989. 640 с. Текст: непосредственный.
9. Ивлиев А. Д. Метод температурных волн в теплофизических исследованиях // *Теплофизика высоких температур*. 2009. Т. 47, № 5. С. 771–702. Текст: непосредственный.
10. Теплофизические свойства твердых растворов иттрий-гольмий в интервале температур от комнатных до 1400 К / А. Д. Ивлиев, М. Ю. Черноскутов, В. В. Мешков, А. А. Куриченко // *Теплофизика высоких температур*. 2020. Т. 58, № 3. С. 336–343. Текст: непосредственный.
11. Температуропроводность железа при высоких температурах / В. И. Горбатов, В. Ф. Полев, И. Г. Коршунов, С. Г. Талуц // *Теплофизика высоких температур*. 2012. Т. 50, № 2. С. 313–320. Текст: непосредственный.
12. Методы и устройства измерения термоЭДС и электропроводности термоэлектрических материалов при высоких температурах / А. Т. Бурков, А. И. Федотов, А. А. Касьянов, Р. И. Пантелеев, Т. Накама // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2015. Т. 15, № 2. С. 173–192. Текст: непосредственный.
13. Теплофизические свойства сплавов на основе металлов подгруппы железа при высоких температурах / С. Г. Талуц, А. Л. Смирнов, Ю. В. Глаголева [и др.]. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. 108 с. Текст: непосредственный.
14. Коэффициент температуропроводности стали 16Х12В2ФТaP в широком интервале температур / А. Ш. Агажанов, И. В. Савченко, Д. А. Самошкин [и др.] // *Вестник НГУ. Сер. Физика*. 2013. Т. 8, вып. 3. С. 163–167. Текст: непосредственный.
15. Агажанов А. Ш., Станкус С. В., Самошкин Д. А. Коэффициент температуропроводности стали ЧС-139 в широком интервале температур // *Теплофизика и аэромеханика*.

2013. Т. 20, № 5. С. 665–667. Текст: непосредственный.

16. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Ленинград: Энергия, 1974. 264 с. Текст: непосредственный.

Статья поступила в редакцию 30.01.2022; одобрена после рецензирования 21.02.2022; принята к публикации 11.05.2022

THERMAL CONDUCTIVITY AND ELECTRICAL RESISTANCE
OF 38KhN3MA STEEL NEAR PHASE TRANSFORMATIONS

Gorbatov V. I.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate Professor
Ural State Mining University
620144, Yekaterinburg, st. Kuibysheva, 30
Researcher
Institute of Thermal Physics, Ural Branch of the RAS
620016, Yekaterinburg, st. Amundsen, 107A
gorbatov@ursmu.ru.

Ilinykh S. A.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate Professor
Ural State Mining University
620144, Yekaterinburg, st. Kuibyshev, 30

Kurichenko A. A.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate Professor
Ural State Mining University
620144, Yekaterinburg, st. Kuibyshev, 30

Polev V. F.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate Professor
Ural State Mining University
620144, Yekaterinburg, st. Kuibyshev, 30

Manzhuev V. M.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate Professor
Buryat State Agricultural Academy
Ulan-Ude, st. Pushkin, 8
vmanzhuev@list.ru

Abstract. This paper presents experimental data on measuring the thermal diffusivity $a(T)$ and electrical resistivity $\rho(T)$ of 38KhN3MA structural steel in the temperature range 600–1600 K. It is shown that in the heating-cooling mode, the dependences $a(T)$ and $\rho(T)$ have a significant temperature hysteresis associated with the martensite-austenite structural transformation. The temperatures of the magnetic (Curie temperature) and martensitic transformations during thermal cycling at a rate of up to 10 K/min have been established. Approximating equations for determining $a(T)$ and $\rho(T)$ are obtained. The temperature dependence of the thermal conductivity coefficient of this alloy at high temperatures has been estimated. Based on the results of electrical resistivity measurements using the Wiedemann-Franz-Lorentz law, the electronic contribution of energy transfer to the overall process of heat conduction is determined. It is also shown that the analysis of the tem-

В. И. Горбатов, С. А. Ильиных, А. А. Куриченко, В. Ф. Полев, В. М. Манжуев. Температуропроводность и электросопротивление стали 38ХН3МА вблизи фазовых превращений

perature dependence of the thermal conductivity $\alpha(T)$ is best suited for determining the temperatures of the beginning and end of magnetic and structural phase transitions in steel grade 38KhN3MA.

Keywords: thermal diffusivity, electrical resistance, 38KhN3MA steel, austenite, martensite, Curie point, structural transformations, plane temperature wave method, high temperatures.

For citation

Gorbatov V. I., Ilinykh S. A., Kurichenko A. A., Polev V. F., Manzhuev V. M. Thermal conductivity and electrical resistance of 38KHN3MA steel near phase transformations // Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics. 2022; 1: 47-57 (In Russ.)

The article was submitted 30.01.2022; approved after reviewing 21.02.2022; accepted for publication 22.02.2022