

УДК 620.179.14

DOI 10.22213/2413-1172-2018-4-4-12

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА,
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ
ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ***

М. К. Корх, кандидат технических наук, Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

М. Б. Ригмант, кандидат физико-математических наук, Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Ю. В. Корх, кандидат технических наук, Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

А. П. Ничипурук, доктор технических наук, Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Данная работа посвящена вопросам фазового анализа и контроля содержания фазовых составляющих в коррозионно-стойких хромоникелевых сталях аустенитного и аустенитно-ферритного классов, широко используемых в различных отраслях современной промышленности и машиностроения.

В первой части работы приведены результаты исследований связи между электрическими свойствами и фазовым составом образцов исследуемых сталей в исходном состоянии и после их пластической деформации. С помощью сканирующего зондового микроскопа методами атомно-силовой и электросиловой (метод зонда Кельвина) микроскопии получены изображения поверхности исследуемых образцов. Анализ данных изображений позволяет определить изменения фазового состава аустенитных и аустенитно-ферритных сталей после пластической деформации. Также установлено, что распад фазы аустенита вследствие деформационных воздействий и последующее образование фазы мартенсита деформации приводит к изменению удельного электрического сопротивления образцов, по величине которого можно судить о количестве образующегося мартенсита деформации.

Во второй части статьи представлены новые приборные разработки, предназначенные для экспрессного (в том числе неразрушающего) контроля электрических и магнитных свойств сталей на основе аустенита. Своевременный и достоверный контроль этих свойств необходим для проведения качественной и количественной оценки фазового состава изделий как после их изготовления, так и во время эксплуатации.

Ключевые слова: аустенит, феррит, мартенсит деформации, фазовый анализ, сканирующая зондовая микроскопия, удельное электрическое сопротивление, магнитная проницаемость.

Введение

Хромоникелевые стали аустенитного и аустенитно-ферритного классов обладают рядом свойств, благодаря которым широко применяются при изготовлении деталей, узлов и конструкций ответственного назначения. К таким свойствам относятся: повышенная коррозионная стойкость к воздействию агрессивных сред, жаропрочность, высокая пластичность и ударная вязкость. Качество данных сталей прежде всего определяется их фазовым составом, который включает в себя основную фазу парамагнитного аустенита (γ -фаза)

и некоторое количество ферромагнитной фазы феррита (α -фаза). Зачастую пластическая деформация аустенитных и аустенитно-ферритных сталей может приводить к распаду фазы аустенита и образованию в материале изделия ферромагнитной фазы мартенсита деформации (α' -фаза) [1, 2]. В результате такого фазового перехода меняются магнитные и механические свойства стали, возникают зоны с повышенными внутренними напряжениями. Сталь становится более твердой и хрупкой, снижается ее коррозионная стойкость [3, 4], поэтому контроль фазового состава аустенитных и аусте-

нитно-ферритных сталей является важной и актуальной задачей.

Для контроля процентного содержания ферромагнитных α - и α' -фазы в парамагнитном аустените традиционно используются методы магнитного фазового анализа [5–8]. Однако исследования, проведенные авторами данной работы в [9, 10], показали, что вследствие изменения фазового состава наряду с магнитными свойствами деформируемой стали меняются также ее электрические свойства. Исследования изменений электрических свойств хромоникелевых сталей вследствие воздействия пластической деформации и разработка новых средств контроля таких изменений представляют большой научный и практический интерес. В связи с этим первая часть статьи посвящена описанию результатов измерений электрических свойств и их связи с фазовым составом исследуемых сталей, также здесь приведена краткая характеристика и оценка эффективности используемых в работе методов контроля электрических свойств применительно к проблеме фазового анализа сталей на основе аустенита.

Во второй части статьи представлены новые приборы, разработанные в лаборатории магнитного структурного анализа отдела неразрушающего контроля ИФМ УрО РАН и предназначенные для контроля электрических и магнитных свойств сталей: прибор «Микроомметр специализированный» для контроля удельного электрического сопротивления (ρ) образцов и изделий протяженной формы из сталей и сплавов с различным химическим составом; прибор «ФерроКОМПАС» (контактный определитель магнитной проницаемости (μ) аустенитных сталей) с содержанием ферромагнитных фаз менее 1 %.

Образцы и методы исследования их электрических свойств

В качестве объекта исследований выступали образцы из аустенитных и аустенитно-ферритных сталей с различным химическим составом и содержанием фазы феррита, которое определялось по величине намагниченности насыщения образцов с учетом их химического состава [11]. Результаты измерений α -фазы приведены в табл. 1.

Также была осуществлена холодная деформация образцов из двухфазной аустенитно-ферритной стали 08X21H6M2T (содержание α -фазы 18 %) путем их прокатки с предварительной выдержкой в жидком азоте. Вследствие этого за счет распада фазы аустенита в материале образцов появилась третья фаза – мар-

тенсит деформации. Процентное содержание феррита при этом оставалось неизменным [12]. Степень деформации образцов оценивалась по изменению их площади сечения. Содержание α' -фазы рассчитывалось по величине прироста намагниченности насыщения образцов по сравнению с ее исходным значением для недеформированного образца, содержащего 18 % α -фазы (табл. 2).

Таблица 1. Марки сталей, номера образцов и процентное содержание α -фазы

№ образца	Марка стали	Содержание α -фазы, %
1	0X17H7ГТ	2,8
2	08X20H9C2БТЮ	6,7
3	12X21H5Т	12,1
4	12X25H5ТМФЛ	26,8
5	X21H8M2ТД	40,9
6	0X32H8	67,3
7	04X25H5M2	81,9

Таблица 2. Образцы из стали 08X21H6M2T

№ образца	Степень деформации, %	Содержание α -фазы, %	Содержание α' -фазы, %
1	0	18	0
2	3		6
3	10		20
4	15		28
5	30		39
6	45		42

Для проведения исследований электрических свойств образцов и установления корреляции между этими свойствами и фазовым составом образцов использовались два метода.

Первый метод – метод зонда Кельвина, относящийся к методам сканирующей зондовой микроскопии [13–15]. Данный метод позволяет визуализировать распределение электрических потенциалов на поверхности исследуемого объекта, а также производить оценку их величины. Исследования были выполнены на сканирующем зондовом микроскопе Solver Next в Центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН.

Второй метод – измерение электрического сопротивления (R) образцов по четырехконтактной схеме – был осуществлен с помощью лабораторной установки, включающей в себя высокостабилизированный источник постоянного тока, семиразрядный вольтметр и эталонное сопротивление. После измерения R был произведен расчет удельного электрического сопротивления образцов с учетом измеренной величины электрического сопротивления, площади сечения образцов и длины участка, на котором измерялось R .

Результаты исследований фазового состава образцов методом зонда Кельвина

На рис. 1 приведены результаты исследований фазового состава образца из стали 08X21Н6М2Т в недеформированном состоянии (см. табл. 2, обр. № 1).

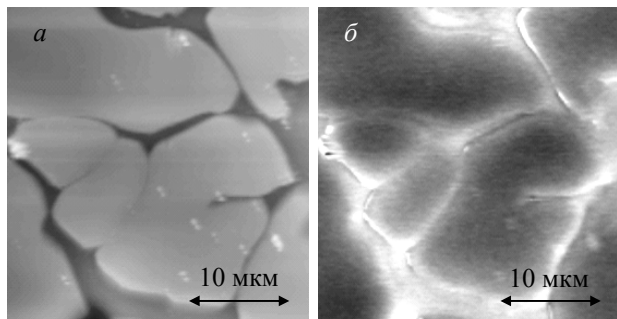


Рис. 1. Результаты исследований фазового состава на поверхности образца из стали 08X21Н6М2Т в исходном состоянии: *a* – атомно-силовое изображение (топография) поверхности образца; *б* – электросиловое изображение поверхности образца, полученное по методу зонда Кельвина

На рис. 2 приведены результаты исследований фазового состава деформированного образца из стали 08X21Н6М2Т, содержащего мартенсит деформации помимо исходных γ - и α -фазы (см. табл. 2, обр. № 2).

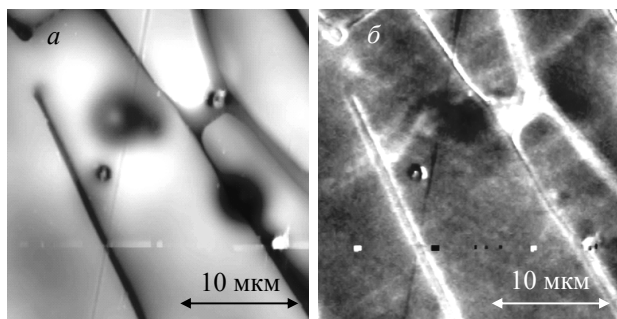


Рис. 2. Результаты исследований фазового состава на поверхности деформированного трехфазного образца из стали 08X21Н6М2Т: *a* – атомно-силовое изображение (топография) поверхности образца; *б* – электросиловое изображение поверхности образца, полученное по методу зонда Кельвина

На рис. 1, *a*, 2, *a* показана топография исследуемых участков поверхности образцов, поверхность которых была подготовлена с помощью шлифовки и электролитического травления, где области темного цвета – это фаза феррита, светлые области – фаза аустенита.

На рис. 1, *б*, 2, *б*, приведены электросиловые изображения этих же участков поверхности, полученные методом зонда Кельвина. Установлено, что γ -фаза на поверхности образца в неде-

формированном состоянии (области темного цвета на рис. 1, *б*) имеет отрицательный электрический потенциал, величина которого равна примерно -10 мВ, а электрический потенциал α -фазы (светлые участки на рис. 1, *б*) является положительным, и его величина составляет около 30 мВ.

После деформации образцов и образования в их составе α' -фазы на поверхности аустенита начинают появляться зоны в виде полос или пятен (см. рис. 2, *б*) с положительным электропотенциалом (порядка $20-30$ мВ). Это связано, по всей видимости, с распадом γ -фазы, образованием α' -фазы, а также с перераспределением легирующих элементов, сопровождающих данные процессы [16, 17].

Таким образом, метод зонда Кельвина позволяет определять наличие и идентифицировать фазовые составляющие в аустенитно-ферритной стали как в исходном состоянии, так и после ее пластической деформации, когда в составе стали может появиться третья α' -фаза.

Однако несмотря на то, что прослеживается определенная корреляция между величиной электропотенциала на поверхности аустенита и количеством образующегося мартенсита деформации, метод зонда Кельвина оказывается пригоден, скорее, для качественной оценки процентного содержания фазовых составляющих. При таких исследованиях возможен контроль небольшого (порядка 100×100 мкм) участка поверхности образца без возможности получить информацию о внутренних слоях объекта исследований. Исследования участков большей площади требуют значительных временных затрат, например, сканирование участка площадью $0,01$ мм² займет около 1 часа. Кроме того, методы сканирующей зондовой микроскопии требуют наличия сложного оборудования и квалифицированного персонала для проведения исследований. Более подробно исследования данного вида сталей с помощью метода зонда Кельвина описаны авторами в работе [18].

Результаты исследований фазового состава образцов по величине их удельного электрического сопротивления

В работе [19] авторами была установлена однозначная корреляция между фазовым составом образцов и их удельным электрическим сопротивлением для аустенитных и аустенитно-ферритных сталей различных марок.

На рис. 3 представлены результаты исследований зависимости между величиной ρ и процентным содержанием феррита в двухфазных

недеформированных аустенитно-ферритных образцах (см. табл. 1).

Из рис. 3 видно, что рост удельного электрического сопротивления происходит практически линейно при увеличении процентного содержания феррита в образцах, несмотря на их различный химический состав. Это позволяет сделать вывод, что величина ρ данных сталей в значительной степени обусловлена их фазовым составом.

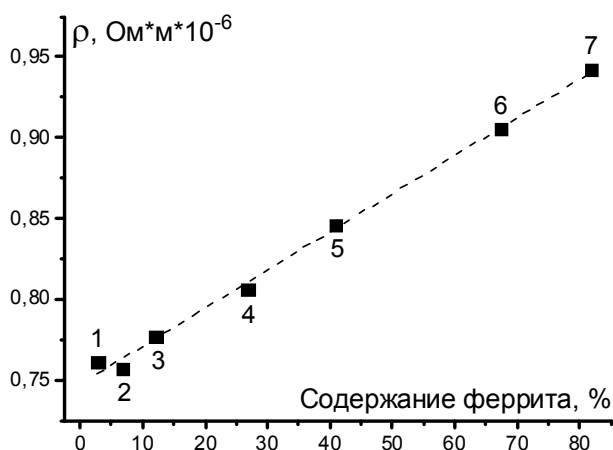


Рис. 3. Зависимость величины удельного электрического сопротивления от содержания α -фазы в образцах из аустенитных и аустенитно-ферритных хромоникелевых сталей

Далее были проведены исследования зависимости величины ρ от процентного содержания α' -фазы в аустенитно-ферритных образцах из стали 08X21Н6М2Т, как в исходном состоянии, так и после холодной деформации прокаткой (см. табл. 2), результаты исследований приведены на рис. 4.

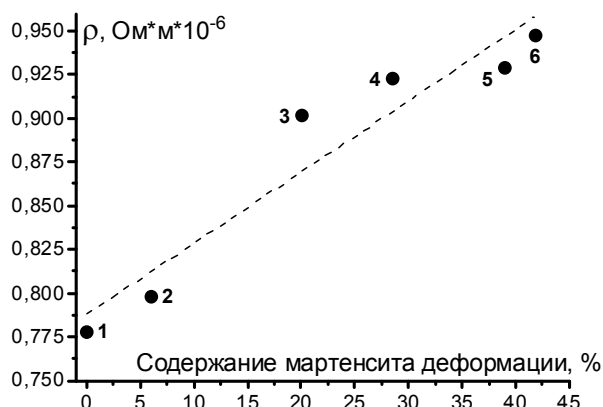


Рис. 4. Зависимость величины удельного электрического сопротивления от содержания мартенсита деформации в образцах из стали 08X21Н6М2Т

Из графика на рис. 4 видно, что с ростом процентного содержания α' -фазы растет вели-

чина удельного электрического сопротивления образцов.

В отличие от метода зонда Кельвина данный метод позволяет осуществлять контроль и производить оценку процентного содержания фаз в достаточно больших объемах исследуемых сталей. Однако здесь расчет содержания фазовых составляющих осуществляется по величине удельного электрического сопротивления, которая является косвенной характеристикой свойств и состояния объекта контроля. Она может зависеть от многих факторов: степени деформации, размера зерна, типа кристаллической решетки, температуры окружающей среды и др. Так, достоверный расчет процентного содержания мартенсита деформации в стали по величине ρ представляется возможным осуществить, только зная ρ для данной стали в недеформированном состоянии. Однако метод контроля удельного электрического сопротивления по сравнению с предыдущим является гораздо более экспрессным, менее трудозатратным и может быть реализован не только в лабораторных, но и в производственных условиях за счет разработки и изготовления малогабаритных портативных средств измерения.

Приборы для контроля удельного электрического сопротивления

Помимо вопросов контроля фазового состава двух- и трехфазных хромоникелевых сталей требования к величине удельного электрического сопротивления стальных изделий и конструкций предъявляются, например, при выпуске деталей электрических машин на предприятиях энергетического комплекса. Это обусловлено тем, что при попадании в сильные магнитные поля деталей и узлов (например, на электростанциях) в них начинают протекать большие токи, что, в свою очередь, может приводить к нагреву данных объектов.

Для решения задачи контроля удельного электрического сопротивления стальных объектов, как в лабораторных условиях, так и на производстве, в лаборатории магнитного структурного анализа ИФМ УрО РАН были разработаны малогабаритные специализированные измерители удельного электрического сопротивления различных модификаций.

Прибор «Измеритель удельного электрического сопротивления» внедрен на ООО «Энергомаш» (г. Белгород) для выходного контроля величины удельного электрического сопротивления материалов выпускаемой продукции.

Прибор «Миллиомметр специализированный МС-1-ИФМ» внедрен на ОАО «Златоустовский

метизный завод» для контроля величины ρ готовых изделий протяженной формы (прутки и проволока диаметром 1...12 мм).

Прибор «Омметр специализированный МСЗ-ИФМ» внедрен в отделе главного метролога ООО «Металлургический завод «КАМАСТАЛЬ – Мотовилихинские заводы» (г. Пермь).

На рис. 6 представлена последняя на данный момент модификация прибора для контроля удельного электрического сопротивления.



Рис. 6. Прибор «Микроомметр специализированный»

Прибор включает в себя измерительную часть 1, в которой закрепляется образец или изделие для измерения его удельного сопротивления по четырехконтактной схеме, а также блок усиления, обработки и вывода сигнала на индикацию 2. Благодаря системе подпружиненных контактов, реализованной в измерительной части устройства, прибор позволяет измерять электрическое сопротивление в диапазоне 1 мкОм...20 мОм образцов различной формы сечения длиной от 80 мм, высотой от 3 до 12 мм. В зависимости от решаемой задачи возможно измерение электрического сопротивления протяженных объектов, таких как прутки или проволока, на участке длиной до 1 м. Предусмотрена калибровка прибора по стандартным образцам с известным значением ρ . Габаритные размеры прибора: 225×180×90 мм.

Прибор имеет встроенный АЦП для преобразования измеряемого сигнала в цифровой вид и передачи его на персональный компьютер по цифровому интерфейсу USB. Для дальнейшей обработки данных и сохранения полученных результатов измерений разработано специализированное программное обеспечение, получен сертификат о его государственной регистрации.

Программное обеспечение прибора позволяет выводить на экран ПК и осуществлять запись в память ПК результатов измерений электрического сопротивления образцов и изделий из различных сталей и сплавов; даты и времени измерений, внесение информации в раздел «Примечания» (№ образца, марка стали, ФИО

оператора, производящего измерения, и т. д.); вводимых оператором геометрических размеров исследуемого участка объекта контроля и последующий автоматический расчет удельного электрического сопротивления стали или сплава, из которого выполнен исследуемый объект.

На прибор «Микроомметр специализированный» во ФГУП «УНИИМ» (г. Екатеринбург) получен сертификат о калибровке государственного образца, кроме того, данная модификация прибора прошла успешную апробацию на ФГУП «Прометей» (г. Санкт-Петербург).

Прибор для контроля относительной магнитной проницаемости аустенитных сталей

Согласно техническим требованиям, предъявляемым к магнитным свойствам аустенитных сталей некоторых марок, содержание в их объеме ферромагнитных фаз не должно превышать 1 %, более того, лежать в диапазоне 0,001...0,1 %, т. е. данные стали почти на 100 % должны состоять из фазы аустенита, которая является парамагнетиком. Такие стали широко используются при изготовлении изделий и конструкций, магнитные свойства которых не должны изменяться при воздействии на них сильных магнитных полей. Из аустенитных парамагнитных сталей изготавливаются детали часовых механизмов, навигационное оборудование, буровые трубы наклонного и горизонтального бурения. Появление ферромагнитных фаз в материале таких изделий может приводить, например, к ухудшению их фрикционных свойств из-за налипания на поверхность ферромагнитных частиц, к сложности позиционирования навигационного оборудования и буровых труб в магнитном поле земли и т. д. Кроме того, появление ферромагнитных фаз в аустените даже в малых количествах – на уровне десятых и сотых долей процента – может свидетельствовать о фазовых переходах γ -фаза \rightarrow α' -фаза, что может приводить к появлению в таких местах микронапряжений, которые в дальнейшем могут стать причиной трещинообразования.

Так как в данном случае речь идет о содержании в стали ферромагнитных фаз в сверхмалых количествах, то напрямую измерить их содержание (например, по величине намагниченности насыщения) не представляется возможным. Для оценки магнитного состояния аустенитных парамагнитных сталей в качестве приемосдаточной характеристики используют относительную магнитную проницаемость, ве-

личина которой должна лежать в диапазоне $1,001 \leq \mu \leq 1,2$. В данном случае основная трудность измерения относительной магнитной проницаемости заключается в ее малой величине. Для получения достоверного результата измерений необходимо воздействовать на контролируемую зону исследуемого объекта магнитными полями высокой напряженности, чтобы зарегистрировать магнитные поля рассеяния от ферромагнитных фаз, содержащихся в ничтожно малых количествах в контролируемом объекте. Кроме того, необходимо компенсировать магнитные поля рассеяния от внешних источников (магнитное поле Земли, оборудование, массивные металлические объекты), величина которых может во много раз превышать величину магнитных полей рассеяния от ферромагнитных фаз в аустенитных сталях, что может приводить к огромной погрешности при измерениях или делать их невозможными. Также необходимо обеспечить высокую локальность измерений, так как ферромагнитные включения в парамагнитных аустенитных сталях обладают малыми размерами и могут распределяться неоднородно.

В настоящее время известен ряд устройств, предназначенных для контроля относительной магнитной проницаемости сталей. Однако данные устройства позволяют контролировать μ с содержанием ферромагнитных фаз от единиц до десятков процентов, когда величина относительной магнитной проницаемости может составлять сотни и тысячи единиц. В связи с этим разработка устройства для контроля μ парамагнитных аустенитных сталей, обеспечивающего необходимую чувствительность и локальность контроля, является важной и актуальной задачей.

Прибор «ФерроКОМПАС» (серия «ИМПАС»), разработанный и изготовленный в лаборатории магнитного структурного анализа ИФМ УрО РАН представлен на рис. 7.



Рис. 7. Прибор «ФерроКОМПАС» – измеритель магнитной проницаемости аустенитных сталей

Данный прибор предназначен для измерения относительной магнитной проницаемости образцов и изделий из аустенитных сталей и сплавов локальным методом в диапазоне $1,001 \leq \mu \leq 1,2$. Прибор имеет встроенную отстройку от влияния внешних магнитных полей на результат измерений, а также встроенный аккумулятор, что позволяет проводить измерения в лабораторных, цеховых и полевых условиях. Предусмотрена калибровка прибора по стандартным образцам с известным значением μ . Габаритные размеры прибора: 190×180×90 мм.

Главной особенностью прибора является конструкция его датчика. В состав датчика входит постоянный магнит высокой энергии на основе сплава редкоземельных металлов. Это позволяет создавать в зоне контроля поля напряженностью от 200 до 500 кА/м в зависимости от размеров используемого магнита. В качестве магниточувствительного элемента (измерительного преобразователя) в датчике прибора используется датчик Холла.

Датчик Холла располагается в нейтральной части магнита таким образом, чтобы воздействие магнитного поля постоянного магнита на датчик Холла и показания прибора было минимальным. При установке такой конструкции на поверхности объекта, имеющего ферромагнитные включения, в объекте возникают поля рассеяния от этих включений, которые и регистрируются датчиком Холла. Величина этих полей рассеяния оказывается пропорциональна величине относительной магнитной проницаемости исследуемого материала в зоне контроля. Использование датчика данной конструкции позволяет проводить экспрессный, локальный, неразрушающий контроль μ на поверхности изделий и конструкций, в том числе конструкций сложной формы, как после их изготовления, так и во время эксплуатации.

Как и «Микроомметр специализированный», прибор «ФерроКОМПАС» имеет встроенный АЦП для передачи сигнала на ПК по интерфейсу USB, после чего с помощью специально разработанного программного обеспечения осуществляется обработка поступающих данных и их запись в память ПК.

На конструкцию датчика и прибор «ФерроКОМПАС» получены патенты [20, 21]. Приборы серии «ИМПАС» (в том числе прибор «ФерроКОМПАС») прошли успешную апробацию и были внедрены на ФГУП «Прометей» (г. Санкт-Петербург); УПП ОАО «Вектор» (г. Екатеринбург); ФГУП ФНПЦ «Прогресс» (г. Омск).

Заключение

Рассмотрены методы и средства контроля фазового состава двух- и трехфазных хромоникелевых сталей на основе аустенита по их электрическим свойствам. Приведены результаты исследований фазового состава двумя методами контроля электрических свойств: методом зонда Кельвина и с помощью измерения удельного электрического сопротивления образцов из хромоникелевых сталей. Показана корреляция между величиной электрических потенциалов на поверхности исследуемых образцов и их фазовым составом; получены изображения, позволяющие идентифицировать все фазовые составляющие в стали как в исходном недеформированном состоянии, так и после пластической деформации, когда в материале стали появляется третья фаза – мартенсит деформации. Установлена связь между величиной удельного электрического сопротивления и фазовым составом исследуемых сталей. Показано, что рост удельного электрического сопротивления исследуемых сталей обусловлен прежде всего их фазовым составом. Отмечены достоинства и ограничения данных методов, а также их применимость на практике.

В качестве средства измерения удельного электрического сопротивления в работе предложен малогабаритный портативный прибор «Микроомметр специализированный», позволяющий осуществлять измерения удельного электрического сопротивления образцов и готовых изделий протяженной формы из сталей и сплавов разных марок, в том числе в условиях производства.

Для контроля качества аустенитных сталей по магнитным свойствам в работе предложен прибор «ФерроКОМПАС», предназначенный для экспрессного локального неразрушающего контроля относительной магнитной проницаемости изделий и конструкций (в том числе ответственного назначения) из парамагнитных аустенитных сталей и сплавов.

Библиографические ссылки

1. Филиппов М. А., Литвинов В. С., Немировский Ю. Р. Стали с метастабильным аустенитом. М.: Металлургия, 1988. 255 с.
2. Курдюмов В. Г., Утевский Л. М., Энтин Р. И. Превращения в железе и стали. М.: Наука, 1977. 236 с.
3. Коррозионное растрескивание аустенитных и ферритоперлитных сталей / В. В. Сагарадзе, Ю. И. Филиппов, А. Ф. Матвиенко, Б. И. Мирошников, В. Е. Лоскутов, В. А. Канайкин. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 228 с.

4. Fahr D. Stress-and strain-induced formation of martensite and effects on strength and ductility of metastable austenitic stainless steels. *Metallurgical Transactions*, 1971, vol. 2, no 7, pp. 1883-1892.

5. Анаев Б. А. Фазовый магнитный анализ сплавов. М.: Металлургия, 1976. 281 с.

6. Меринов П. Е., Мазена А. Г. Определение мартенсита деформации в сталях аустенитного класса магнитным методом // Заводская лаборатория, 1997. № 3. С. 47–49.

7. Меринов П. Е. Магнитная ферритометрия // Неразрушающие методы контроля. Спецификатор различий в национальных стандартах различных стран. Серия: Международная инженерная энциклопедия. 1995. Т. 3. С. 68–128.

8. Щербинин В. Е., Горкунов Э. С. Магнитный контроль качества металлов. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 264 с.

9. Korkh M. K., Korkh Yu. V., Rigmant M. B., Kazantseva N. V., Vinogradova N. I. Using Kelvin probe force microscopy for controlling the phase composition of austenite-martensite chromium-nickel steel. *Russian journal of nondestructive testing*, 2016, vol. 52, pp. 664-672.

10. Ogneva M. S., Rigmant M. B., Kazantseva N. V., Davydov D. I., Korkh M. K. Effect of deformation martensite on the electrical and magnetic properties of plastically deformed chromium-nickel steel. *Russian journal of nondestructive testing*, 2017, vol. 53, pp. 644-651.

11. Анаев Б. А. Фазовый магнитный анализ сплавов. М.: Металлургия, 1976. 281 с.

12. Гудремон Э. Специальные стали: в 2 т. М.: Металлургиздат, 1966. Т. 2.

13. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учеб. пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений / Российская академия наук; Институт физики микроструктур. Н. Новгород, 2004. 110 с.

14. Nonnenmacher M., O'Boyle M. P., Wickramasinghe H. K. [Kelvin probe force microscopy]. *Applied Physics Letters*, 1991, vol. 58, no. 25, pp. 2921-2923.

15. Melitz W., Shen J., Kummel A. C., Lee S. Kelvin probe force microscopy and its application. *Surface Science Reports*, 2011, vol. 66, pp. 1-27.

16. Femenia M., Canalias C., Pana J., Leygraf C. Scanning Kelvin Probe force microscopy and magnetic force microscopy for characterization of duplex stainless steels. *Journal of the Electrochemical Society*, 2003, vol. 150, no. 6, pp. B274-B281.

17. Schmutz P., Frankel G. S. [Characterization of AA2024 T3 by scanning Kelvin probe force microscopy]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1998, vol. 145, no. 7, pp. 2285-2295.

18. Korkh M. K., Korkh Yu. V., Rigmant M. B., Kazantseva N. V., Vinogradova N. I. Using Kelvin probe force microscopy for controlling the phase composition of austenite-martensite chromium-nickel steel. *Russian journal of nondestructive testing*, 2016, vol. 52, pp. 664-672.

19. Ogneva M. S., Rigmant M. B., Kazantseva N. V., Davydov D. I., Korkh M. K. Effect of deformation martensite on the electrical and magnetic properties of plasti-

cally deformed chromium-nickel steel. *Russian journal of nondestructive testing*, 2017, vol. 53, pp. 644-651.

20. Пат. RU U1 РФ, МПК G01N27/72, G01N27/87 № 179750. Устройство для локального контроля содержания ферромагнитных фаз в аустенитных сталях / М. Б. Ригмант, М. К. Корх, А. П. Ничипурук; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики металлов имени М. Н. Михеева» УрО РАН. Заявл. 20.12.2017; опубл. 23.05.2018, бюл. № 15.

21. Пат. RU U1 РФ, МПК G01N27/72, G01N27/87 № 179753. Прибор для локального измерения ферромагнитной фазы в аустенитных сталях / М. Б. Ригмант, М. К. Корх, А. П. Ничипурук; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики металлов имени М. Н. Михеева» УрО РАН. Заявл. 28.12.2017; опубл. 23.05.2018, бюл. № 15.

References

- Filippov M. A., Litvinov V. S., Nemirovsky Yu. R. *Stali s metastabil'nyy austenitom* [Steels with metastable austenite]. Moscow, Metallurgija Publ., 1988, 255 p. (in Russ.).
- Kurdyumov V. G., Utevskiy L. M., Entin R. I. *Prevrashcheniya v zheleze i stali*. [Transformations in iron and steel]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 236 p. (in Russ.).
- Sagaradze V. V., Filippov I. I., Matvienko A. F., Miroshnichenko B. I., Loskutov V. E., Kanaikin V. A. *Korroziyonnoye rastreskivaniye austenitnykh i ferritoperlitnykh staley* [Corrosion cracking of austenitic and ferrite perlite steels]. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 2004, 228 p. (in Russ.).
- Fahr D. Stress and strain-induced formation of martensite and effects on strength and ductility of metastable austenitic stainless steels. *Metallurgical Transactions*, 1971, vol. 2, no 7, pp. 1883-1892.
- Apaev B. A. *Fazovyj magnitnyj analiz splavov* [Phase magnetic analysis of alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1976, 281 p. (in Russ.).
- Merinov P. E., Mazepa A. G. *Opreddeniye martensita deformatsii v stalyakh austenitnogo klassa magnitnym metodom* [Determination of strain-induced martensite in steels of austenitic class by magnetic method]. *Zavodskaya laboratoriya*, 1997, no. 3, pp. 47-49 (in Russ.).
- Merinov P. E. *Magnitnaya ferritometriya* [Magnetic ferritometry]. *Nerazrushayushchiye metody kontrolya. Spetsifikator razlichiy v natsional'nykh standartakh razlichnykh stran. Seriya: Mezhdunarodnaya inzhenernaya entsiklopediya*, 1995, vol. 3, p. 68-128 (in Russ.).
- Shcherbinin V. Ye., Gorkunov E. S. *Magnitnyy kontrol' kachestva metallov* [Magnetic quality control of metals]. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 1996, 264 p. (in Russ.).
- Korkh M. K., Korkh Yu. V., Rigmant M. B., Kazantseva N. V., Vinogradova N. I. [Using Kelvin probe force microscopy for controlling the phase composition of austenite-martensite chromium-nickel steel]. *Russian journal of nondestructive testing*, 2016, vol. 52, pp. 664-672.
- Ogneva M. S., Rigmant M. B., Kazantseva N. V., Davydov D. I., Korkh M. K. [Effect of deformation martensite on the electrical and magnetic properties of plastically deformed chromium-nickel steel]. *Russian journal of nondestructive testing*, 2017, vol. 53, pp. 644-651.
- Apaev B. A. *Fazovyj magnitnyj analiz splavov* [Phase magnetic analysis of alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1976, 281 p. (in Russ.).
- Gudremon E. *Spetsial'nyye stali* [Special steel]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1966, vol. 2 (in Russ.).
- Mironov V. L. *Osnovy skaniruyushchey zondovoy mikroskopi*. [Fundamentals of scanning probe microscopy]. N. Novgorod, Russian Academy of Sciences, Institute of Physics of Microstructures, 2004, 110 p. (in Russ.).
- Nonnenmacher M., O'Boyle M. P., Wickramasinghe H. K. Kelvin probe force microscopy. *Applied Physics Letters*, 1991, vol. 58, no. 25, pp. 2921-2923.
- Melitz W., Shen J., Kummel A. C., Lee S. Kelvin probe force microscopy and its application. *Surface Science Reports*, 2011, vol. 66, pp. 1-27.
- Femenia M., Canalias C., Pana J., Leygraf C. Scanning Kelvin Probe force microscopy and magnetic force microscopy for characterization of duplex stainless steels. *Journal of the Electrochemical Society*, 2003, vol. 150, no. 6, pp. B274-B281.
- Schmutz P., Frankel G. S. Characterization of AA2024 T3 by scanning Kelvin probe force microscopy. *Journal of the Electrochemical Society*, 1998, vol. 145, no. 7, pp. 2285-2295.
- Korkh M. K., Korkh Yu. V., Rigmant M. B., Kazantseva N. V., Vinogradova N. I. Using Kelvin probe force microscopy for controlling the phase composition of austenite-martensite chromium-nickel steel. *Russian journal of nondestructive testing*, 2016, vol. 52, pp. 664-672.
- Ogneva M. S., Rigmant M. B., Kazantseva N. V., Davydov D. I., Korkh M. K. Effect of deformation martensite on the electrical and magnetic properties of plastically deformed chromium-nickel steel. *Russian journal of nondestructive testing*, 2017, vol. 53, pp. 644-651.
- Rigmant M. B., Korkh M. K., Nичипурук A. P. *Ustrojstvo dlja lokal'nogo kontrolja sodержaniya ferromagnitnykh faz v austenitnykh staljah* [Device for local monitoring of the content of ferromagnetic phases in austenitic steels]. Patent RF U1 RF, МПК G01N27/72, G01N27/87, no. 179750, 2018.
- Rigmant M. B., Korkh M. K., Nичипурук A. P. *Pribor dlja lokal'nogo izmerenija ferromagnitnoj fazy v austenitnykh staljah* [Instrument for local measurement of the ferromagnetic phase in austenitic steels]. Patent RF U1 RF, МПК G01N27/72, G01N27/87, no. 179753, 2018.

Methods and Devices of Control of Phase Composition, Electrical and Magnetic Properties of Chromium-Nickel Steels

M. K. Korkh, PhD in Engineering, M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

M. B. Rigmant, PhD (Physics and Mathematics), M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Yu. V. Korkh, PhD in Engineering, M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

A. P. Nichipuruk, DSc in Engineering, M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

This paper is devoted to the problems of phase analysis and control of the content of various phases in corrosion-resistant chromium-nickel steels of austenitic and austenitic-ferritic classes widely used in various branches of modern industry and machine building.

The first part of the paper presents the results of studies of the relationship between the electrical properties and the phase composition of samples of steels being studied, both in the initial state and after their plastic deformation. Using the scanning probe microscope by means of the atomic-force and electro-power (Kelvin probe method) microscopy, images of the surface of the samples were obtained. Analysis of the image data makes it possible to determine the changes in the phase composition of austenitic and austenitic-ferritic steels after plastic deformation. With the help of scanning probe microscope using atomic-force and electro-power (Kelvin probe method) microscopy, images of the surface of the samples were obtained. Analysis of the image data makes it possible to determine the changes in the phase composition of austenitic and austenitic-ferritic steels after plastic deformation. It has also been found that the decay of the austenite phase due to deformation effects and the subsequent formation of a strain-induced martensite leads to a change in the electrical resistivity of the samples, the magnitude of which can be judged on the amount of a strain-induced martensite formed.

In the second part of the paper new instrument developments are developed for express (including non-destructive) control of electrical and magnetic properties of austenitic steels. Timely and reliable control of these properties is necessary for qualitative and quantitative assessment of the phase composition of products both after their manufacture and during operation.

Keywords: austenite, ferrite, strain-induced martensite, phase analysis, scanning probe microscopy, specific electrical resistance, magnetic permeability.

Получено 20.09.2018