<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-3-45-53>

УДК 620.179.14

Контроль фазового состава и магнитных свойств изделий ответственного назначения из аустенитно-ферритных и аустенитно-мартенситных сталей

М. Б. Ригмант, М. К. Корх

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики металлов им. М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук», Екатеринбург, Российская Федерация

В работе описаны результаты исследований корреляции магнитных свойств и фазового состава образцов из аустенитных сталей различных марок. Также в работе представлены приборы ИФМ УрО РАН, которые успешно применяются для неразрушающего контроля магнитных свойств и фазового состава аустенитных сталей и сплавов в различных отраслях промышленности РФ. Приборы позволяют определять качество материала как в лабораторных, так и в эксплуатационных условиях.

Ключевые слова: аустенитные стали и сплавы, феррит, мартенсит, относительная магнитная проницаемость

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Диагностика», № AAAA-A18-118020690196-3).

Для цитирования: Ригмант М. Б., Корх М. К. Контроль фазового состава и магнитных свойств изделий ответственного назначения из аустенитно-ферритных и аустенитно-мартенситных сталей // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 3. С. 45–53. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-3-45-53>

For citation: Rigmant M. B., Korkh M. K. Control of the phase composition and magnetic properties of products made of austenitic-ferritic and austenitic-martensitic steels // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2020. No. 3. P. 45–53. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-3-45-53>

Поступила 13.07.2020 Отрецензирована 12.08.2020 Одобрена 14.08.2020 Опубликована 14.10.2020

В ИФМ УрО РАН на протяжении длительного периода проводятся исследования по разработке методов и средств для производственного контроля фазового состава и измерения магнитных свойств изделий из аустенитных сталей и сплавов [1–7]. Производственные и эксплуатационные характеристики таких изделий, в том числе жаропрочность, жаростойкость, коррозионная стойкость, пластичность, магнитные свойства и т. д., во многом определяются фазовым составом материала. Кроме основной фазы аустенита в стали обычно требуется наличие фазы феррита (2–12 %), присутствие которого обеспечивает прочностные и другие свойства как при низких, так и при высоких температурах. Количество фер-

ритной фазы для разных марок аустенитных сталей строго регламентируется.

Кроме основной парамагнитной фазы аустенита (γ -фазы) и дополнительной фазы феррита (α -фаза) при изготовлении и эксплуатации изделий, при воздействии на них пластических деформаций в материале стали может появляться мартенсит деформации (α' -фаза). Ферромагнитные по своим свойствам феррит и мартенсит деформации существенным образом влияют на механические и прочностные свойства аустенитных сталей, определяют способность стали противостоять воздействию агрессивных сред, в связи с чем контроль фазового состава является одной из первостепенных задач при изготовлении и эксплуатации деталей и конструкций из аустенитных сталей.

Для данных целей широко используется метод магнитного насыщения, при котором

содержание ферромагнитных включений в материале определяется по величине его намагниченности насыщения (J_s , А/см). Однако для реализации метода магнитного насыщения на практике требуется крупногабаритное дорогостоящее оборудование для создания магнитных полей большой напряженности ($H_s \geq 5000$ А/см), что делает данный метод применимым скорее в лабораторных условиях, затрудняя его использование в условиях производства, где необходим экспрессный неразрушающий контроль большого числа готовых изделий. В связи с этим актуальной является задача определения корреляции других магнитных параметров (помимо J_s) с процентным содержанием ферромагнитных фаз в исследуемых сталях, т.к. на основе данных параметров в дальнейшем могут быть спроектированы и изготовлены новые средства измерения фазового состава аустенитных сталей.

В первой части данной работы описаны результаты исследований корреляции между магнитными параметрами частных петель гистерезиса и процентным содержанием α -или α' -фазы в двухфазных (аустенитно-ферритных или аустенитно-мартенситных) образцах [8]. Образцы изготавливались из аустенитных и аустенитно-ферритных сталей различных марок. Из одного слитка стали вырезалось от двух до четырех образцов квадратного сечения 8×8 мм и длиной 100 мм. Всего было получено 6 наборов аустенитно-ферритных и 1 набор аустенитно-мартенситных образцов. Марки сталей, из которых изготавливались аустенитно-ферритные образцы, приведены в таблице 1.

Аустенитно-мартенситные образцы были изготовлены из аустенитной стали 05X18H11, не содержащей ферромагнитные фазы в исходном состоянии (до деформации). Путем деформирования прокаткой при комнатной температуре

Таблица 1

Марки сталей аустенитно-ферритных образцов

№ набора	1	2	3	4	5	6
Марка стали	0X17H7ГТ	08X20H9C2БТЮ	12X21H5Т	12X25H5ТМФЛ	03X22H6M2	0X32H8

Таблица 2

Процентное содержание феррита в образцах из наборов № 1, 2, 3

Набор № 1		Набор № 2		Набор № 3	
№ образца	$F_{\%}$, %	№ образца	$F_{\%}$, %	№ образца	$F_{\%}$, %
1-1	1,36	2-1	6,88	3-1	13,0
1-2	1,58	2-2	5,45		
1-3	1,41	2-3	6,68		
1-4	1,82	2-4	5,56	3-2	13,0
среднее $F_{\%}$	1,54	среднее $F_{\%}$	6,14	среднее $F_{\%}$	13,0

Таблица 3

Процентное содержание феррита в образцах из наборов № 4, 5, 6

Набор № 4		Набор № 5		Набор № 6	
№ образца	$F_{\%}$, %	№ образца	$F_{\%}$, %	№ образца	$F_{\%}$, %
4-1	20,1	5-1	40,6	6-1	61,3
4-2	22,6	5-2	42,0	6-2	58,8
4-3	20,6	5-3	39,4	6-3	61,8
4-4	22,2	5-4	41,4	6-4	60,0
среднее $F_{\%}$	21,4	среднее $F_{\%}$	40,85	среднее $F_{\%}$	60,5

Таблица 4

Процентное содержание мартенсита деформации в образцах из стали 05X18H11

№ образца	M1	M2	M3	M4
$M_{\%}$, %	2,50	7,45	12,5	18

в структуре стали образовывалась мартенсит деформационная фаза. Процентное содержание феррита ($F\%$, %) и мартенсита деформации ($M\%$, %) в образцах определялось по величине их намагниченности насыщения. Данные о процентном содержании ферромагнитных фаз в образцах приведены в таблицах 2–4.

С помощью установки *Remagraf C-500* «Magnet-Physik» для каждого из образцов были проведены измерения его намагниченности (J , А/см) в трех диапазонах магнитного поля (H , А/см): $-300\dots300$; $-450\dots450$; $-600\dots600$ А/см. Для графического представления полученных результатов в виде петель магнитного гистерезиса и дальнейшей математической обработки данных были использованы специализированные математические программные пакеты. Пример петель, построенных в трех диапазонах поля для аустенитно-ферритного образца № 4-1 (содержание феррита 20,1 %), приведен на рисунке 1.

Также были построены зависимости дифференциальной магнитной восприимчивости от магнитного поля – $\chi_{\text{dif}}(H)$. Примеры полученных зависимостей $\chi_{\text{dif}}(H)$ для образца № 4-1 в трех диапазонах поля показаны на рисунке 2.

По петлям магнитного гистерезиса и кривым $\chi_{\text{dif}}(H)$ для всех исследуемых образцов были определены магнитные параметры: коэрцитивная сила – H_c , остаточная намагниченность – J_r , максимальная намагниченность – J_{max} , максимум дифференциальной магнитной восприимчивости – $\chi_{D\text{max}}$, площадь кривой $\chi_{\text{dif}}(H)$ – $S\chi_{\text{dif}}$. Как показали дальнейшие исследования, каждый из данных параметров в большей или меньшей степени коррелирует с процентным содержанием α - или α' -фазы в образце. Далее были построены зависимости параметров H_c , J_r , J_{max} , $\chi_{D\text{max}}$, $S\chi_{\text{dif}}$ от процентного содержания ферромагнитных фаз в образцах. Наилучшую корреляцию с процентным

Рис. 1. Пример измеренных петель гистерезиса для образца № 4-1 в полях: а) $-300\dots300$ А/см; б) $-450\dots450$ А/см; в) $-600\dots600$ А/см

Рис. 2. Зависимости $\chi_{\text{dif}}(H)$ для образца № 4-1 в полях: а) $-250\dots250$ А/см; б) $-400\dots400$ А/см; в) $-550\dots550$ А/см

содержанием α - или α' -фазы показали параметры J_{max} , χ_{Dmax} , $S\chi_{dif}$, что проиллюстрировано ниже на рисунках 3–8. Для построения зависимостей на данных рисунках использованы значения магнитных параметров, измеренных на петлях магнитного гистерезиса и кривых магнитной восприимчивости, построенных в диапазоне магнитного поля $-300 \dots 300$ А/см. В диапазонах магнитных полей $-450 \dots 450$ и $-600 \dots 600$ А/см характер зависимостей не изменялся.

Так как количество аустенитно-ферритных образцов достаточно велико, то на рисунках 3, 5 и 7 для более удобного представления полученных результатов при построении графиков используются средние значения процентно-

го содержания ферритной фазы и исследуемого магнитного параметра в пределах одного набора аустенитно-ферритных образцов.

Таким образом, исходя из приведенных выше зависимостей, для контроля процентного содержания ферромагнитных фазовых составляющих в аустенитной стали, помимо намагниченности насыщения, может быть использован еще ряд магнитных параметров. Это позволит отказаться от использования крупногабаритного оборудования, необходимого для контроля величины J_s , и перейти к разработке малогабаритных портативных устройств, позволяющих осуществлять неразрушающий контроль магнитных параметров в полях малой (по сравнению с H_s) напряженностью.

Рис. 3. Зависимости $J_{max}(F_{\%})$ аустенитно-ферритных образцов, построенные по средним значениям J_{max} и $F_{\%}$

Рис. 4. Зависимости $J_{max}(M_{\%})$ аустенитно-мартенситных образцов

Рис. 5. Зависимости $S\chi_{dif}(F_{\%})$ аустенитно-ферритных образцов, построенные по средним значениям $S\chi_{dif}$ и $F_{\%}$

Рис. 6. Зависимости $S\chi_{dif}(M_{\%})$ аустенитно-мартенситных образцов

Рис. 7. Зависимости $\chi_{Dmax}(F\%)$ аустенитно-ферритных образцов, построенные по средним значениям $S\chi_{dif}$ и $F\%$

Рис. 8. Зависимости $\chi_{Dmax}(M\%)$ аустенитно-мартенситных образцов

Приборы неразрушающего контроля фазового состава и магнитных свойств сталей

Определение магнитной проницаемости маломагнитных аустенитных сталей. Измерение магнитной проницаемости парамагнитных материалов и близких к ним по свойствам аустенитных сталей проводят обычно на установках баллистического типа или на магнитных весах. Для исследований изготавливают образцы в виде миниатюрных таблеток или пластинок и помещают их между полюсами электромагнита. По силе втягивания образца в межполюсное пространство с известным градиентом магнитного поля определяют магнитную восприимчивость или проницаемость исследуемого материала. К недостаткам метода следует отнести невозможность применения в промышленных условиях на готовых изделиях. Из других методов контроля магнитной проницаемости можно отметить метод прохождения изучаемого материала через дифференциальные катушки с большим количеством измерительных витков (как это происходит в аэропортах). При наличии металлических включений срабатывает звуковая и видеосигнализация. Недостатком этого метода является то, что при таком контроле не создаются требуемые большие магнитные поля и метод является чисто качественным.

На некоторых предприятиях страны применяются приборы иностранного произ-

водства, работающие на аналогичных принципах с российскими ферритометрами. Это в первую очередь *Feritscope MP30* и *Feritscope MP30E-S* (Германия), которые имеют возможность измерения относительной магнитной проницаемости индукционным методом. Измерительная часть датчика имеет вид полусферы, которая позволяет концентрировать магнитное поле до магнитных полей порядка 10^2 – 10^3 А/см. Это существенно повышает чувствительность и точность измерений. Однако «точечное» намагничивание полусферическим преобразователем уменьшает зону контроля. Минусом этого метода является также небольшая глубина промагничивания объекта.

В Институте физики металлов Уральского отделения Академии наук на основании опыта многолетних работ [9–12] предложен и внедрен в производство прибор «Измеритель магнитной проницаемости аустенитных сталей – ИМПАС» (в настоящее время «ФерроКОМПАС»), представленный на рисунке 9.

Прибор «ФерроКОМПАС» предназначен для измерения относительной магнитной проницаемости μ (магнитной восприимчивости $\chi = \mu - 1$) изделий из аустенитных сталей локальным методом. Измерение магнитной проницаемости производится по величине магнитного поля рассеяния намагниченного материала и осуществляется накладным преобразо-

вателем Холла, который закреплен в центре локального постоянного магнита (рис. 10).

Так как конструкция датчика исключает влияние поля постоянного магнита на результат измерений, то на преобразователь Холла воздействует только поле рассеяния ($H_{рас.}$) от намагниченного участка. Поле рассеяния от намагниченного контролируемого участка однозначно связано с величиной магнитной проницаемости μ (или восприимчивости $\chi = \mu - 1$) через выражение:

$$H_{рас.} = k \cdot J_s \cdot \frac{(\mu - 1)}{(\mu + 1)} = k \cdot J_s \cdot \frac{(\mu - 1)}{2}. \quad (1)$$

Формула (1) справедлива и для слабомагнитных материалов, когда $\mu < 1,05$ и $(\mu - 1)/(\mu + 1) \approx \chi / 2$. Тогда (1) принимает вид:

$$H_{рас.} = \text{const} \cdot \chi. \quad (2)$$

Видно, что изменения восприимчивости со значения $\chi = 0,001$ до $\chi = 0,002$ (то есть всего на одну тысячную) повышает величину поля рассеяния $H_{рас.}$ сразу в два раза, что делает предложенный авторами метод чувствительным к малым значениям магнитной восприимчивости (проницаемости).

Разработанный в ИФМ УрО РАН прибор «ФерроКОМПАС» (серии ИМПАС), использующий феррозонды или датчики Холла в качестве магниточувствительных преобразователей, позволяет проводить локальный неразрушающий контроль величины магнитной проницаемости в диапазоне $1,001 \leq \mu \leq 1,200$, определяя таким образом наличие ферромагнитных включений в парамагнитном материале при их содержании на уровне 0,01–1 %. Данная модификация прибора, помимо цифрового индикатора, имеет встроенный АЦП, позволяющий передавать результаты измерений на персональный компьютер для их дальнейшего сохранения и обработки.

Определение фазового состава аустенитных и аустенитно-ферритных сталей. Помимо приборов контроля магнитной проницаемости маломагнитных хромоникелевых сталей с содержанием ферромагнитных фаз менее 1 %, в ИФМ УрО РАН разработаны и успешно внедрены приборы контроля фазового состава аустенитно-ферритных

Рис. 9. Измеритель магнитной проницаемости аустенитных сталей «ФерроКОМПАС»

Рис. 10. Принципиальная схема работы датчика приборов серии «ИМПАС» («ФерроКОМПАС»): 1 – постоянный магнит; 2 – датчик Холла; 3 – объект контроля (ОК); 4 – область внутри ОК намагничиваемая с помощью постоянного магнита

и аустенитно-мартенситных сталей. На рисунке 11 представлен прибор «Ферритометр ФХ-3 ИФМ», предназначенный для контроля процентного содержания феррита в аустенитных сталях в диапазоне 0,1–20 и 20–80 % (обзорный диапазон). На рисунке 12 изображен прибор ИМДС-1 (Измеритель мартенсита деформации сталей), который помимо содержания ферритной фазы может измерять процентное содержание мартенсита деформации в хромоникелевых сталях и сплавах.

По аналогии с прибором «ФерроКОМПАС» первичные преобразователи данных приборов имеют в своем составе постоянный магнит и магниточувствительные элементы, с помощью которых осуществляется регистрация и измерение полей рассеяния

Рис. 11. Прибор «Ферритометр ФХ-3 ИФМ»

Рис. 12. «Прибор ИМДС-1»

от намагниченного участка объекта контроля. Первичный преобразователь представляет собой датчик накладного типа, позволяющий проводить измерения как на образцах, так и на поверхности готовых изделий в лабораторных, цеховых и полевых условиях без вывода изделий и объектов из эксплуатации.

Представленные в работе приборы внедрены более чем на 20 крупных предприятиях России в нефтегазовой отрасли, в судостроении, в химическом машиностроении, а также на предприятиях, имеющих отношение к аэрокосмической индустрии: в «ФГУП ЦНИИ им. академика А.А. Бочвара» и АО «УПП «Вектор».

Заключение

1. На основании исследований магнитных свойств аустенитно-ферритных и аустенитно-мартенситных сталей установлены корреляционные связи фазового состава и ряда магнитных параметров, таких как: коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, максимальная намагниченность, площадь под зависимостью $\chi_{dif}(H)$, максимум зависимости $\chi_{dif}(H)$. Показано, что все исследуемые параметры коррелируют с фазовым составом и могут быть использованы для контроля содержания фазы феррита или фазы мартенсита деформации в двухфазных хромоникелевых сталях при перемагничивании по частным циклам.

2. В работе представлен прибор «ФерроКОМПАС» предназначенный для неразрушающего контроля относительной магнитной проницаемости материалов деталей и механизмов

на уровне $\mu \leq 1,01$, что очень важно для изделий с высокими требованиями к стабильности «маломagnetного» состояния.

3. Представлены приборы «ФХ-3 ИФМ» и «ИМДС-1», с помощью которых может быть осуществлен экспрессный неразрушающий контроль фазового состава хромоникелевых сталей, имеющих в своем составе, помимо основной фазы аустенита, феррит и мартенсит деформации.

Список литературы

1. ГОСТ 26364-90. Ферритометры для сталей аустенитного класса. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 1991. 8 с.
2. ГОСТ 8.518-84. Государственная система единства измерений. Ферритометры для сталей аустенитного класса. Методика поверки. М.: Издательство стандартов, 1985. 11 с.
3. ГОСТ 22838-77. Сплавы жаропрочные. Методы контроля и оценки макроструктуры. М.: Издательство стандартов, 1979. 27 с.
4. ГОСТ 11878-66. Сталь аустенитная. Методы измерения содержания ферритной фазы в прутках. М.: ФГУП «СТАНДАРТИН-ФОРМ», 2011. 6 с.
5. ANSI/AWS A4.2M:2006 (ISO 8249:2000 MOD) an American National Standard. Standard Procedures for Calibrating Magnetic Instruments to Measure the Delta Ferrite Content of Austenitic and Duplex Ferritic-Austenitic Stainless Steel Weld Metal. American Welding Society, 2006. 47 p.
6. Merinov P., Entin S., Beketov B., et al. The magnetic testing of the ferrite content of austenitic

stainless steel weld metal // *NDT International*. 1978. Vol. 11. No. 1. P. 9–14.

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

8. Корх М. К., Ригмант М. Б., Сажина Е. Ю. и др. Измерение содержания ферромагнитной фазы по магнитным свойствам в двухфазных хромоникелевых сталях // *Дефектоскопия*. 2019. № 11. С. 32–44.

9. Ригмант М. Б., Ничипурук А. П., Худяков Б. А. и др. Приборы для магнитного фазового анализа изделий из аустенитных коррозионно-стойких сталей // *Дефектоскопия*. 2005. № 11. С. 3–14.

10. *Международная инженерная энциклопедия. Неразрушающие методы контроля. Спецификатор различий в национальных стандартах различных стран. Т. 3* / Под ред. проф. В. Я. Кершенбаума. М.: Центр «Наука и техника». 1995. С. 68–128.

11. Ригмант М. Б., Ничипурук А. П., Корх М. К. Возможность раздельного измерения количества феррита и мартенсита деформации в трехфазных сталях аустенитного класса магнитным методом // *Дефектоскопия*. 2012. № 9. С. 19–23.

12. Корх М. К., Ригмант М. Б., Давыдов Д. И. и др. Определение фазового состава трехфазных хромоникелевых сталей по магнитным свойствам // *Дефектоскопия*. 2015. № 12. С. 20–31.

Об авторах

Ригмант Михаил Борисович – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики металлов им. М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук», Екатеринбург, Российская Федерация; специалист в области неразрушающего контроля, руководитель ряда проектов по разработке и изготовлению новых приборов для оценки электрических и магнитных свойств, а также фазового состава изделий из аустенитных сталей, внедренных на предприятиях Российской Федерации. Область научных интересов: контроль структуры и фазового состава сталей и сплавов, разработка новых приборов и средств измерений неразрушающего контроля и технической диагностики.

Корх Михаил Константинович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики металлов им. М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук», Екатеринбург, Российская Федерация.

Область научных интересов: контроль структуры и фазового состава сталей и сплавов, разработка новых приборов и средств измерений неразрушающего контроля и технической диагностики.

Control of the phase composition and magnetic properties of products made of austenitic-ferritic and austenitic-martensitic steels

Rigmant M. B., Korkh M. K.

M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

This article describes the results of studies aimed at investigating the correlation of magnetic properties and phase composition of samples from austenitic steels of various grades. In addition, the work describes devices, which are successfully employed at the Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences for non-destructive testing of the magnetic properties and phase composition of austenitic steels and alloys in various industries of the Russian Federation. These devices enable determination of the quality of various materials, both in laboratory and operating conditions.

Keywords: austenitic steels and alloys, ferrite, martensite, relative magnetic permeability

Funding: The study reported in this publication was carried out as part of a publicly funded research project No. AAAA-A18-118020690196-3 (research topic “Diagnostics”) and was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Information about the authors

Rigmant Mikhail Borisovich – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation; specialist in the field of non-destructive testing; head of a number of projects for the development and manufacture of new devices for assessing the electrical and magnetic properties, as well as the phase composition of products from austenitic steels, introduced at industrial facilities of the Russian Federation.

Research interests: control of the structure and phase composition of steels and alloys, development of new devices and measuring instruments for non-destructive testing and technical diagnostics.

Korkh Mikhail Konstantinovich – Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation.

Research interests: control of the structure and phase composition of steels and alloys, development of new devices and measuring instruments for non-destructive testing and technical diagnostics.