

ИЗМЕРЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ФАЗЫ ПО МАГНИТНЫМ СВОЙСТВАМ В ДВУХФАЗНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЯХ

© 2019 г. М.К. Корх^{1,*}, М.Б. Ригмант^{1,**}, Е.Ю. Сажина¹, А.В. Кочнев¹

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург,
ул. Софьи Ковалевской, 18
E-mail: *korkhmk@imp.uran.ru; **rigmant@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 04.07.2019; после доработки 16.08.2019
Принята к публикации 23.08.2019

Проведены исследования магнитных свойств образцов, изготовленных из двухфазных аустенитно-ферритных и аустенитно-мартенситных хромоникелевых сталей различных марок. Целью исследований было установление корреляции между магнитными параметрами исследуемых сталей в полях 250—600 А/см и процентным содержанием в них ферромагнитных фаз феррита и мартенсита деформации. Для этого были определены параметры петель магнитного гистерезиса образцов: коэрцитивная сила, максимальная намагниченность, остаточная намагниченность; а также параметры зависимостей дифференциальной магнитной восприимчивости от магнитного поля: максимальное значение дифференциальной магнитной восприимчивости, площадь под зависимостями. Показано, что по значению максимума дифференциальной магнитной восприимчивости можно однозначно определить содержание феррита или мартенсита деформации в исследуемых сталях, независимо от амплитуды перемагничивающего поля.

Ключевые слова: аустенит, феррит, мартенсит, хромоникелевые стали, намагниченность, коэрцитивная сила, дифференциальная магнитная восприимчивость, магнитный фазовый анализ.

DOI: 10.1134/S0130308219110046

ВВЕДЕНИЕ

Хромоникелевые коррозионно-стойкие стали на основе аустенита (γ -фаза) широко используются в различных отраслях промышленности при изготовлении различных изделий и конструкций, в том числе ответственного назначения. Эксплуатационные свойства таких сталей зависят, в первую очередь, от их фазового состава. Так, например, содержание в них феррита (α -фаза) может напрямую определять их стойкость к воздействию агрессивных сред, а мартенсит (α' -фаза), появляющийся при изготовлении или в процессе эксплуатации вследствие воздействия пластических деформаций, в значительной степени влияет как на коррозионную стойкость, так и на механические свойства изделий.

Аустенит по магнитным свойствам парамагнитен, феррит и мартенсит деформации ферромагнитны. В связи с этим для контроля содержания феррита и мартенсита в аустените широко применяются методы магнитного фазового анализа, позволяющие косвенным путем по магнитным свойствам определять содержание α и α' -фаз [1—7]. Основным общепризнанным методом контроля содержания ферромагнитных фаз в парамагнитных сталях является контроль их намагниченности насыщения (J_s). Данный метод удобен тем, что величина намагниченности насыщения напрямую связана с содержанием феррита или мартенсита деформации в исследуемом объекте. При этом (в отличие, например, от методов микроскопии) могут быть исследованы образцы или объекты достаточно больших габаритов, а содержание ферромагнитных фаз будет рассчитано по всему объему контролируемого объекта, а не на небольшом участке поверхности [1, 8—16]. Схожая картина наблюдается при сравнении магнитных и вихретоковых методов контроля фазового состава. При использовании методов магнитного фазового анализа возможен контроль содержания ферромагнитных фаз на значительной глубине исследуемого объекта (единицы и десятки мм), в то время как вихретоковый метод позволяет контролировать фазовый состав только в поверхностных и приповерхностных слоях объекта [17].

Необходимо отметить, что определение намагниченности насыщения проводится в полях от 5000 А/см. Это подразумевает использование крупногабаритных электромагнитов, намагничивающих катушек и мощных источников тока, что не всегда возможно реализовать в производственных условиях при контроле готовых изделий. В связи с этим интерес представляют исследования магнитных свойств и их связи с процентным содержанием ферромагнитных фаз в аустенитных сталях в полях напряженностью много меньшей 5000 А/см. В данной статье проведены исследования магнитных свойств и их связи с процентным содержанием α и α' -фаз в аустенитно-ферритных и аустенитно-мартенситных сталях в полях до 600 А/см.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе были использованы двухфазные (аустенит—феррит и аустенит—мартенсит деформации) образцы, изготовленные из аустенитных и аустенитно-ферритных сталей различных марок. Из одного слитка стали вырезали от двух до четырех образцов. Всего было получено 6 наборов образцов аустенитно-ферритных сталей и 1 набор образцов аустенитно-мартенситной стали. Марки исследуемых в работе аустенитно-ферритных сталей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Марки аустенитно-ферритных сталей

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

Образцы, включающие в себя помимо аустенита мартенсит деформации, были изготовлены из аустенитной стали 05X18H11, не содержащей мартенситную фазу в исходном состоянии (до деформации). Мартенсит деформации в структуре стали получали путем ее прокатки при комнатной температуре. Процентное содержание феррита ($F_{\%}$, %) и мартенсита деформации ($M_{\%}$, %) определяли по величине намагниченности насыщения образцов. Данные о содержании ферромагнитных фаз в образцах приведены ниже в табл. 2 — 4.

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		
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

С помощью установки Remagraf C-500 «Magnet-Physik» была измерена намагниченность (J , А/см) каждого образца в трех диапазонах магнитного поля (H , А/см): $-300—300$ А/см; $-450—450$ А/см; $-600—600$ А/см. Погрешность измерения намагниченности не превышает 3 %, погреш-

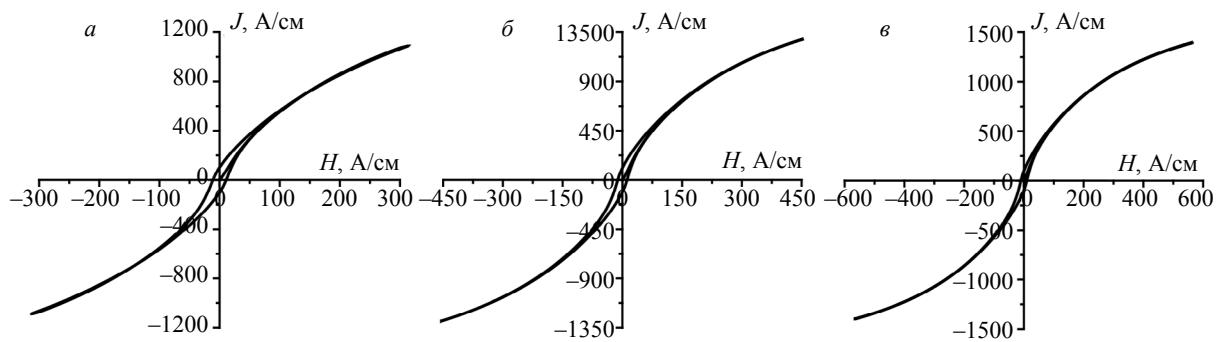


Рис. 1. Пример измеренных петель гистерезиса для образца № 4-1 в полях:
 а — $-300\text{—}300$ А/см; б — $-450\text{—}450$ А/см; в — $-600\text{—}600$ А/см.

ность измерения магнитного поля не превышает 1%. Перед каждым циклом измерений производилось размагничивание исследуемых образцов. Намагничивание образцов, содержащих мартенсит деформации, проводилось вдоль направления прокатки. 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 образца № 4-1 (содержание феррита 20,1%), приведен на рис. 1.

Из петель, построенных в полях $-300\text{—}300$ А/см, $-450\text{—}450$ А/см и $-600\text{—}600$ А/см, вырезали восходящую спинку в трех диапазонах H : $-250\text{—}250$ А/см, $-400\text{—}400$ А/см, $-550\text{—}550$ А/см соответственно (см. рис. 2).

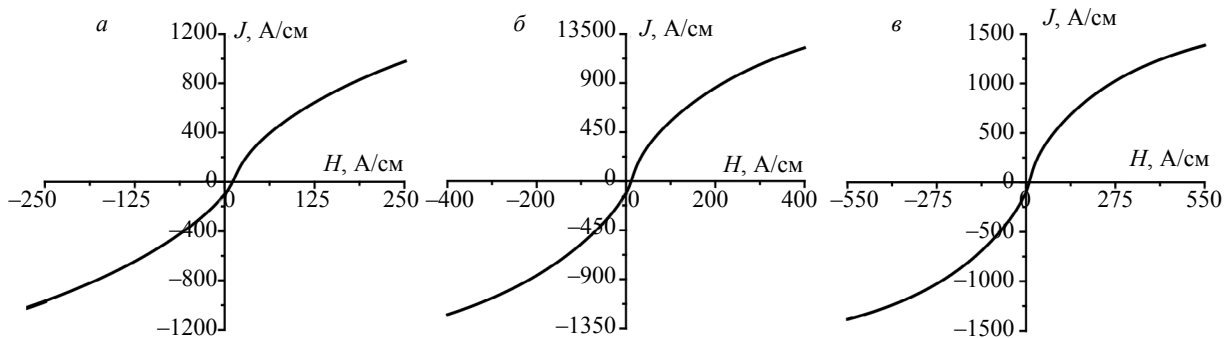


Рис. 2. Восходящие спинки петель гистерезиса для образца № 4-1 в полях:
 а — $-250\text{—}250$ А/см; б — $-400\text{—}400$ А/см; в — $-550\text{—}550$ А/см.

Также были построены кривые $\chi_{\text{dif}}(H)$ путем дифференцирования зависимостей на рис. 2 (где χ_{dif} — дифференциальная магнитная восприимчивость). Примеры полученных зависимостей $\chi_{\text{dif}}(H)$ для образца №4-1 в трех диапазонах полей показаны на рис. 3.

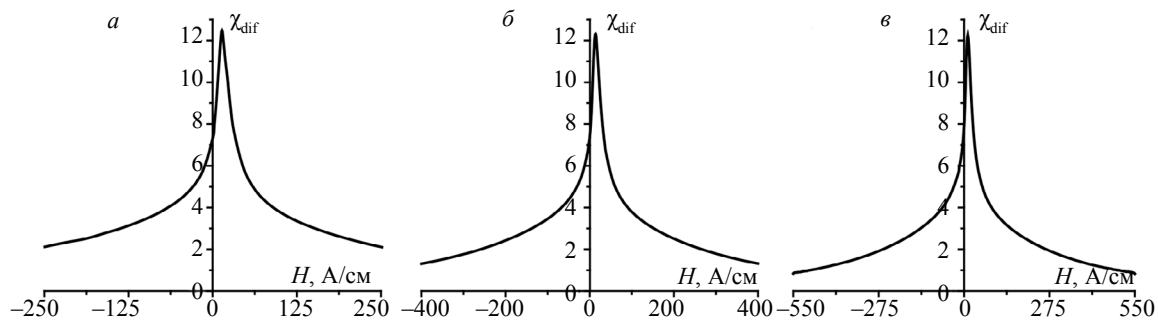


Рис. 3. Зависимости $\chi_{\text{dif}}(H)$ для образца № 4-1 в полях:
 а — $-250\text{—}250$ А/см; б — $-400\text{—}400$ А/см; в — $-550\text{—}550$ А/см.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для всех исследуемых образцов по построенным петлям магнитного гистерезиса и кривым $\chi_{\text{dif}}(H)$ были определены магнитные параметры, каждый из которых, как показали дальнейшие исследования, в большей или меньшей степени коррелирует с содержанием феррита или мартенсита деформации в образце. По петлям магнитного гистерезиса были определены коэрцитивная сила (H_c , А/см) и остаточная намагниченность (J_r , А/см). По восходящей спинке определялась максимальная намагниченность (J_{max} , А/см) в полях 250 А/см (рис. 2а), 400 А/см (рис. 2б), 550 А/см (рис. 2в). По зависимостям $\chi_{\text{dif}}(H)$ определялись максимум дифференциальной магнитной восприимчивости ($\chi_{D_{\text{max}}}$) и площадь под ними ($S_{\chi_{\text{dif}}}$).

ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТНЫХ ПЕТЕЛЬ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

На рис. 4 приведены петли магнитного гистерезиса образцов №3-1 и М3, построенные в поле $-600—600$ А/см. Содержание ферромагнитных фаз в данных образцах примерно равно (содержание α -фазы в образце №3-1 — 13 %; содержание α' -фазы в образце М3 — 12,5 %).

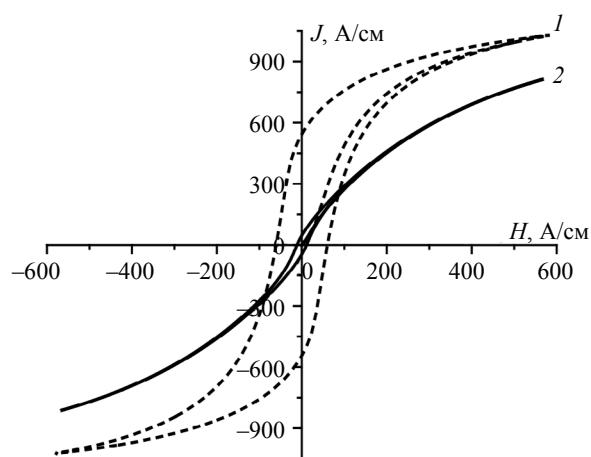


Рис. 4. Петли магнитного гистерезиса:
1 — образец М3; 2 — образец № 3-1.

График на рис. 4 показывает, что коэрцитивная сила и остаточная намагниченность образца аустенитно-ферритной стали в несколько раз меньше H_c и J_r образца аустенитно-мартенситной стали. Так, H_c и J_r образца № 3-1 составили 11,3 и 46,3 А/см, в то время как H_c и J_r образца М3 составили 60,4 и 506 А/см соответственно. Данная закономерность сохраняется для всех образцов. Это можно объяснить морфологией мартенсита деформации, который, в отличие от глобулярного феррита, представляет собой вытянутые игольчатые включения, что в значительной степени затрудняет перемагничивание такого материала. По результатам всех исследований максимальная коэрцитивная сила образца с ферритной фазой была измерена у образца № 1-1 (содержание α -фазы 1,36 %, $H_c = 14,3$ А/см) при построении петли гистерезиса в полях $-600—600$ А/см, в то время как у образца М1 с содержанием α' -фазы 2,5 % при построении петли в том же диапазоне магнитного поля H_c составила 86,8 А/см. Таким образом, высокие значения H_c и J_r хромоникелевой стали на основе аустенита свидетельствуют о наличии в ее структуре магнитотвердой фазы мартенсита деформации.

Коэрцитивная сила. Далее был исследован характер изменения H_c и J_r при росте содержания феррита или мартенсита деформации. С этой целью были построены зависимости $H_c(F_{\%})$ и $H_c(M_{\%})$ на рис. 5 — 7, а также $J_r(F_{\%})$ и $J_r(M_{\%})$ на рис. 8 — 10.

На рис. 5а приведены зависимости H_c всех образцов с α -фазой от процентного содержания в них феррита при построении петель магнитного гистерезиса в полях $-300—300$ А/см. Так как количество образцов аустенитно-ферритных сталей достаточно велико, то для более удобного представления полученных результатов здесь и далее целесообразным будет усреднять содержание ферритной фазы и исследуемого магнитного параметра в пределах одного набора образцов. На рис. 5б приведена зависимость $H_c(F_{\%})$, построенная по усредненным значениям H_c и $F_{\%}$.

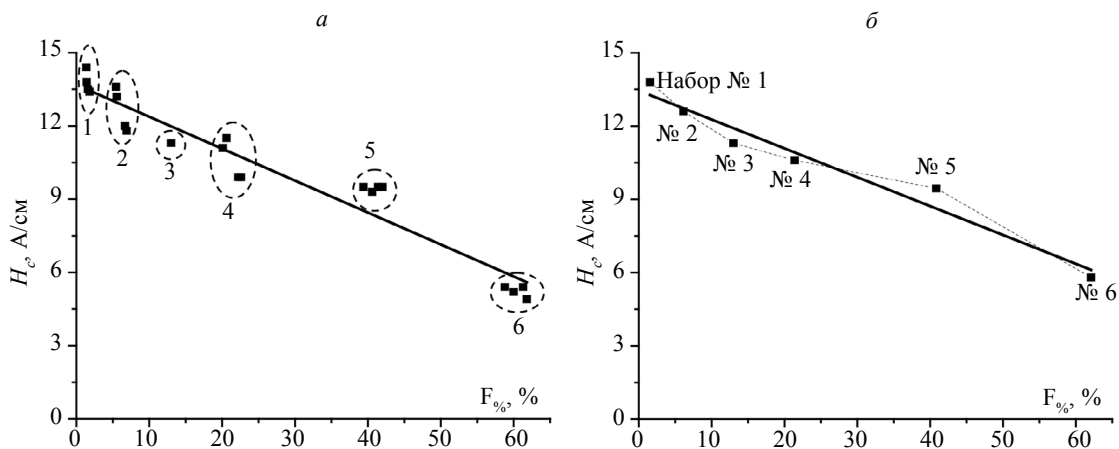


Рис. 5. Зависимости $H_c(F_{\%})$ для петель магнитного гистерезиса, построенных в полях $-300—300$ А/см: *а* — для всех образцов с ферритом; *б* — построенные по усредненным в пределах одного набора значениям H_c и $F_{\%}$.

Штриховыми линиями и цифрами на графике *5а* выделены группы точек, относящиеся к соответствующим наборам образцов, сплошная линия на графиках — линейная аппроксимация.

На рис. 5 видно, что при увеличении содержания феррита в образцах снижается их коэрцитивная сила. При построении петель магнитного гистерезиса в полях $-450—450$ А/см и $-600—600$ А/см зависимости $H_c(F_{\%})$ имеют схожий вид. Это проиллюстрировано на рис. 6, где (по аналогии с рис. 5*б*) приведены средние значения H_c и процентного содержания образцов в пределах одного набора.

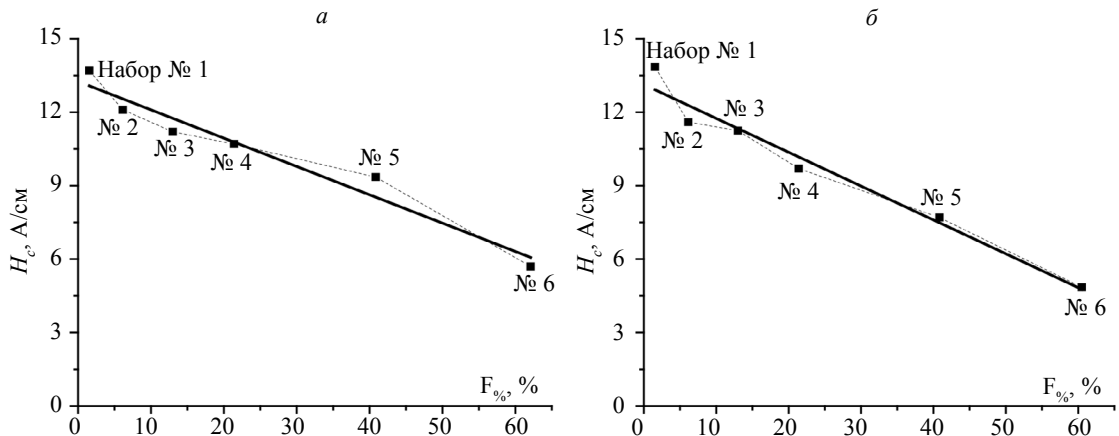


Рис. 6. Зависимости $H_c(F_{\%})$ при построении петель магнитного гистерезиса в полях: *а* — $-450—450$ А/см; *б* — $-600—600$ А/см.

Снижение коэрцитивной силы при росте содержания ферромагнитной фазы наблюдается и для образцов с мартенситом. На рис. 7 построены зависимости $H_c(M_{\%})$ для трех диапазонов H .

Наблюдаемое на рис. 5 — 7 уменьшение коэрцитивной силы объясняется тем, что при росте $F_{\%}$ или $M_{\%}$ ферромагнитные включения располагаются гораздо ближе друг другу, образуют целые области с меньшим размагничивающим фактором, что в значительной степени облегчает процессы перемагничивания.

Сравнение графиков на рис. 5*б* и 6 показывает, что увеличение диапазона поля, в котором производится перемагничивание образцов аустенитно-ферритных сталей, не приводит к росту коэрцитивной силы, то есть уже при перемагничивании в полях ± 300 А/см коэрцитивная сила α -фазы достигает своих предельных значений. В то же время H_c образцов с мартенситом заметно увеличивается с ростом диапазона перемагничивающего поля (рис. 7), особенно при малом содержании α' -фазы (образцы М1 и М2). Таким образом, используемые диапазоны перемагничивания оказываются недостаточными для определения предельного значения H_c мартенсита деформации.

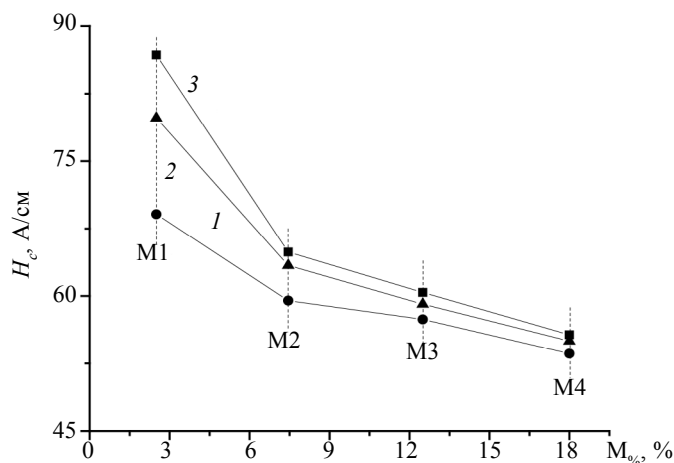


Рис. 7. Зависимости $H_c(M_{\%})$ образцов с мартенситом при построении петель магнитного гистерезиса в полях: 1 — $-300 \dots 300$ А/см; 2 — $-450 \dots 450$ А/см; 3 — $-600 \dots 600$ А/см.

Тем не менее, на рис. 7 видно, что характер зависимости $H_c(M_{\%})$ остается примерно одинаковым во всех диапазонах намагничивающего поля, что позволяет установить корреляцию между коэрцитивной силой и процентным содержанием мартенсита деформации даже при перемагничивании в малых полях.

Зависимости $H_c(F_{\%})$ и $H_c(M_{\%})$ на рис. 5 — 7 показывают, что коэрцитивная сила коррелирует с содержанием феррита или мартенсита деформации в хромоникелевых сталях. Однако диапазон изменения H_c образцов аустенитно-ферритных сталей (рис. 5, 6) представляется недостаточным для достоверного определения содержания феррита. В случае же образцов, содержащих мартенсит деформации, зависимости на рис. 7 убывают немонотонно, кроме того для получения достоверных данных о содержании α' -фазы по зависимостям $H_c(M_{\%})$ необходимо либо строго контролировать амплитуду перемагничивающего поля при их построении, либо использовать магнитные поля гораздо большей напряженности (около 1000—1500 А/см) для получения предельных значений H_c .

Таким образом, можно сделать вывод, что H_c применима лишь для приблизительной оценки содержания α - или α' -фазы, однако, как было показано выше, ее величина может служить индикатором наличия или отсутствия мартенсита деформации в структуре хромоникелевой стали.

Остаточная намагниченность. На рис. 8 — 10 приведены зависимости остаточной намагниченности от процентного содержания феррита (см. рис. 8, 9) и мартенсита деформации (см. рис. 10). График на рис. 8 включает значения J_r всех образцов аустенитно-ферритных сталей при построении петель магнитного гистерезиса в диапазоне $-300 \dots 300$ А/см.

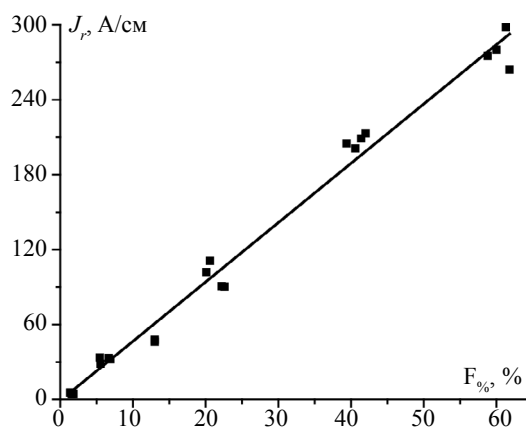


Рис. 8. Зависимости $J_r(F_{\%})$ всех образцов аустенитно-ферритных сталей; J_r определялась по петлям магнитного гистерезиса, построенным в диапазоне $-300 \dots 300$ А/см.

На рис. 9 приведены зависимости $J_r(F_{\%})$, построенные по усредненным значениям J_r и $F_{\%}$, где J_r определялась в трех диапазонах перемагничивания.

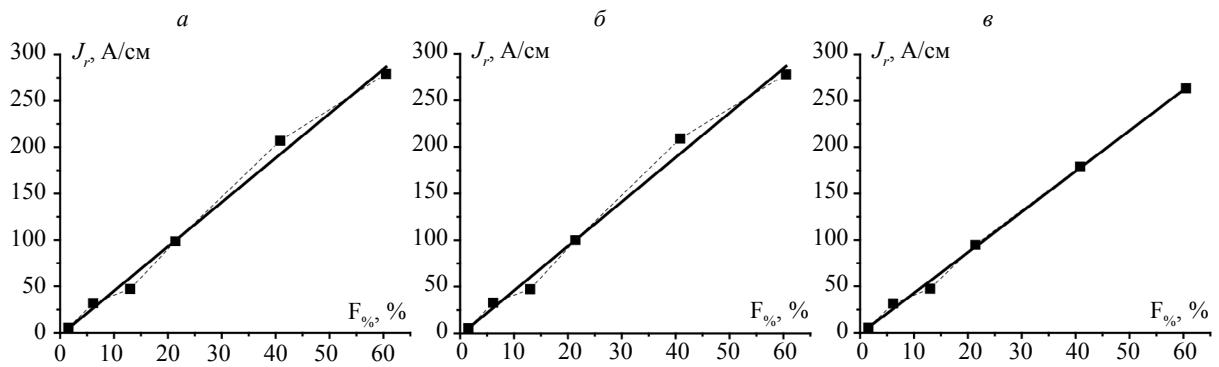


Рис. 9. Зависимости $J_r(F_{\%})$ по усредненным в пределах одного набора значениям J_r и $F_{\%}$; J_r определялась по петлям магнитного гистерезиса, построенным в диапазонах: а — $-300—300$ А/см; б — $-450—450$ А/см; в — $-600—600$ А/см.

На рис. 9 видно, что приведенные здесь зависимости имеют схожий вид, то есть уже при перемагничивании в полях $-300—300$ А/см остаточная намагниченность образцов аустенитно-ферритных сталей достигает максимальных значений, близких к предельным. При этом остаточная намагниченность и содержание феррита хорошо коррелируют друг с другом: J_r возрастает с увеличением содержания феррита, эта зависимость близка к линейной.

На рис. 10 приведены зависимости $J_r(M_{\%})$ образцов, содержащих мартенсит деформации для трех диапазонов перемагничивания.

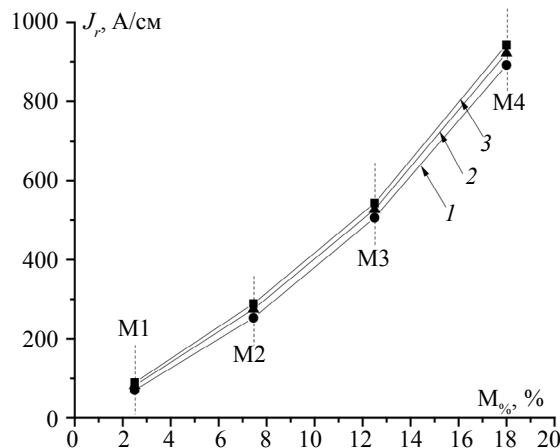


Рис. 10. Зависимости $J_r(M_{\%})$ образцов с мартенситом; J_r определена в диапазонах перемагничивания: 1 — $-300—300$ А/см; 2 — $-450—450$ А/см; 3 — $-600—600$ А/см.

График на рис. 10 показывает, что зависимости $J_r(M_{\%})$ так же носят линейный характер. Следует отметить, что если в области малых значений $M_{\%}$ (образцы М1 и М2) зависимости 1, 2, 3 расположены достаточно близко друг к другу, то при увеличении $M_{\%}$ наблюдается «расхождение» зависимостей на графике, которое, по всей видимости, будет только увеличиваться с ростом $M_{\%}$. Таким образом, для аустенитно-мартенситной стали при содержании мартенсита деформации менее 10 % значения J_r будут близки друг другу при разных амплитудах перемагничивающего поля. При содержании мартенсита более 10 % значения остаточной намагниченности будут напрямую связаны с амплитудой перемагничивания.

Следовательно, остаточная намагниченность хорошо коррелирует с содержанием ферритной фазы во всем измеряемом диапазоне $F_{\%}$ независимо от величины перемагничивающего поля, однако диапазон перемагничивания необходимо учитывать при контроле содержания мартенсита деформации.

Максимальная намагниченность. На рис. 11 и 12 приведены зависимости намагниченности от процентного содержания в образцах с α -фазой — $J_{\max}(F_{\%})$ при намагничивании образцов в полях 250, 400, 550 А/см.

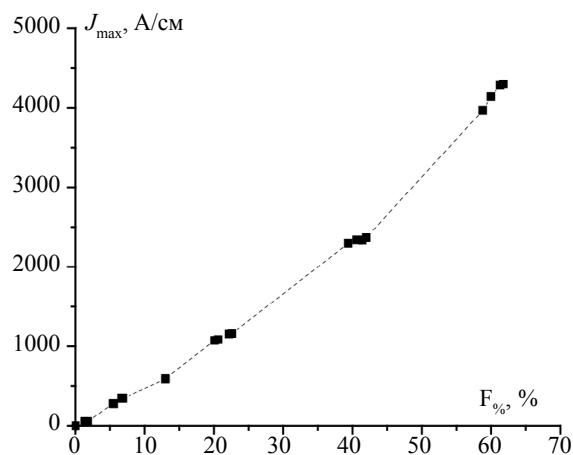


Рис. 11. Зависимость $J_{\max}(F_{\%})$ для всех образцов с α -фазой; J_{\max} определялась в поле 250 А/см.

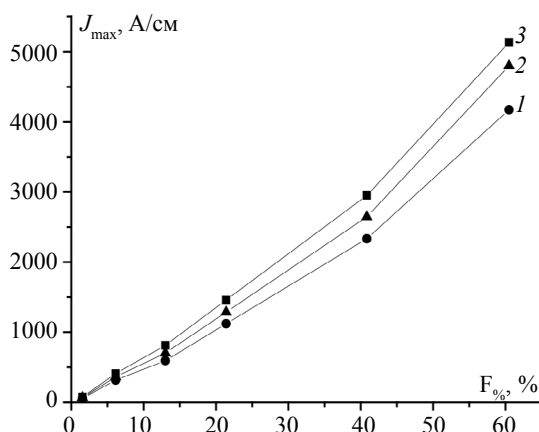


Рис. 12. Зависимости $J_{\max}(F_{\%})$, построенные по усредненным значениям J_{\max} и $F_{\%}$ в пределах одного набора; J_{\max} определялась в полях:

1 — 250 А/см; 2 — 400 А/см; 3 — 550 А/см.

На рис. 11 и 12 видно, что намагниченность (определяемая при одной и той же напряженности магнитного поля) практически линейно зависит от содержания феррита. Аналогичная картина наблюдается и для образцов с α' -фазой (рис. 13).

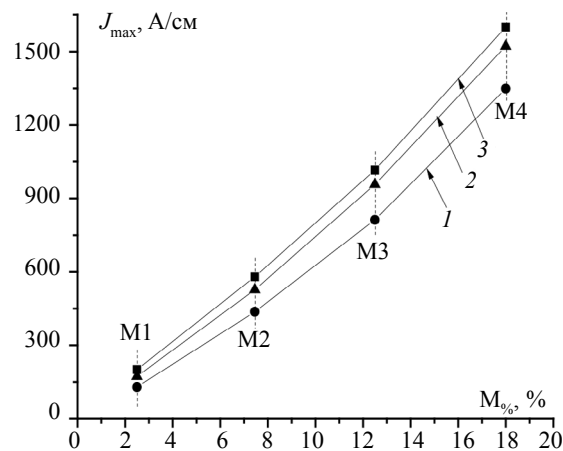


Рис. 13. Зависимости $J_{\max}(M_{\%})$ образцов с α' -фазой; J_{\max} определялась в полях:

1 — 250 А/см; 2 — 400 А/см; 3 — 550 А/см.

Таким образом, согласно полученным данным, намагниченность хорошо коррелирует с содержанием ферромагнитных составляющих в аустенитно-ферритных и аустенитно-мартенситных сталях. Однако необходимо строго контролировать величину намагничивающего поля в случаях, когда J_{\max} определяется по частным петлям магнитного гистерезиса, при построении зависимостей $J_{\max}(F_{\%})$ и $J_{\max}(M_{\%})$ с целью определения содержания феррита или мартенсита деформации.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАВИСИМОСТЕЙ $\chi_{\text{dif}}(H)$

В работе, помимо частных петель магнитного гистерезиса, также используются зависимости $\chi_{\text{dif}}(H)$, параметры которых (площадь под кривой $\chi_{\text{dif}}(H)$ и ее максимум) позволяют установить содержание феррита или мартенсита деформации в исследуемых образцах хромоникелевых сталей. Площадь под кривой $\chi_{\text{dif}}(H)$ можно измерить в процессе перемагничивания с помощью дифференциальных катушек и малогабаритных средств измерения. Также следует отметить, что площадь под кривой $\chi_{\text{dif}}(H)$ — это интегральная характеристика $\chi_{\text{dif}}(H)$, пропорциональная J_{\max} .

На рис. 14 приведены зависимости дифференциальной магнитной восприимчивости от магнитного поля для образцов № 3-1 (содержание феррита 13 %) и М3 (содержание мартенсита деформации 12,5 %), построенные в диапазоне -550 — 550 А/см.

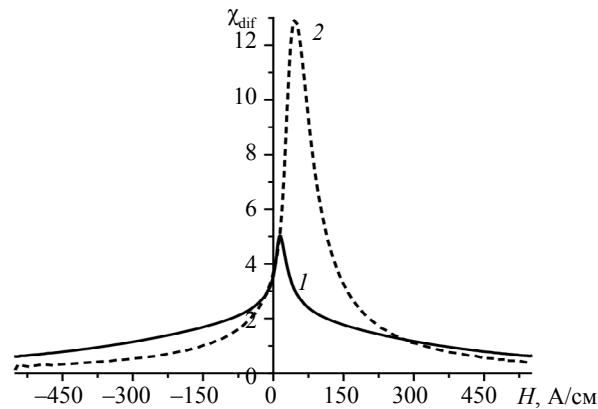


Рис. 14. Зависимости $\chi_{\text{dif}}(H)$:
1 — образец № 3-1; 2 — образец М3.

На рис. 14 прежде всего обращает на себя внимание поведение максимумов зависимостей $\chi_{\text{dif}}(H)$: максимальное значение χ_{dif} образца с α' -фазой превышает максимальное значение χ_{dif} образца с α -фазой почти в 3,5 раза при практически одинаковом содержании ферромагнитных фаз в образцах; максимум $\chi_{\text{dif}}(H)$ образца М3 заметно смещен в сторону больших полей по сравнению с максимумом $\chi_{\text{dif}}(H)$ образца № 3-1.

Данные наблюдения позволяют сделать вывод, что положение максимума $\chi_{\text{dif}}(H)$ может служить надежным индикатором наличия магнитотвердой фазы мартенсита деформации в структуре хромоникелевой стали на основе аустенита.

Площади под кривой $\chi_{\text{dif}}(H)$. На рис. 15 приведена зависимость площадей под кривыми $\chi_{\text{dif}}(H)$ от процентного содержания α -фазы — $S_{\chi_{\text{dif}}}(F_{\%})$ для всех исследуемых образцов аустенитно-ферритных сталей. $S_{\chi_{\text{dif}}}$ определялась для кривых $\chi_{\text{dif}}(H)$, построенных в диапазоне -250 — 250 А/см.

На рис. 16 приведены зависимости $S_{\chi_{\text{dif}}}(F_{\%})$, построенные по усредненным значениям $S_{\chi_{\text{dif}}}$ и $F_{\%}$. $S_{\chi_{\text{dif}}}$ определялась по кривым $\chi_{\text{dif}}(H)$, построенным в трех диапазонах магнитного поля H .

На рис. 17 приведены зависимости $S_{\chi_{\text{dif}}}(M_{\%})$ для образцов с мартенситом. $S_{\chi_{\text{dif}}}$ определялась по кривым $\chi_{\text{dif}}(H)$, построенным в трех диапазонах магнитного поля H .

Графики на рис. 15 — 17 показывают возрастание всех приведенных на них зависимостей $S_{\chi_{\text{dif}}}(F_{\%})$ и $S_{\chi_{\text{dif}}}(M_{\%})$ при увеличении $F_{\%}$ и $M_{\%}$. Кроме того, наблюдается смещение зависимостей вверх при увеличении диапазона поля H , в котором строится кривая $\chi_{\text{dif}}(H)$ (т.к. площадь под ней при этом растет). Следует также отметить, что площадь под зависимостью $\chi_{\text{dif}}(H)$ имеет физический смысл намагниченности и прямо пропорциональна ее максимальному значению для данного диапазона магнитного поля, поэтому на практике выбор параметра контроля (намагниченности или площади под кривой $\chi_{\text{dif}}(H)$) определяется наличием соответствующих средств измерений.

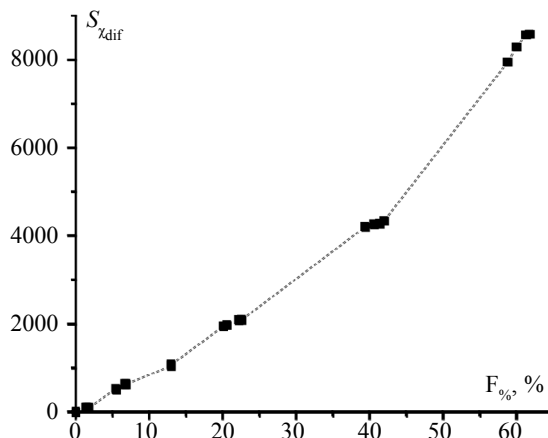


Рис. 15. Зависимость площадей под кривыми $\chi_{dif}(H)$ от процентного содержания феррита в образцах аустенитно-ферритных сталей; кривые $\chi_{dif}(H)$ построены в полях $-250—250$ А/см.

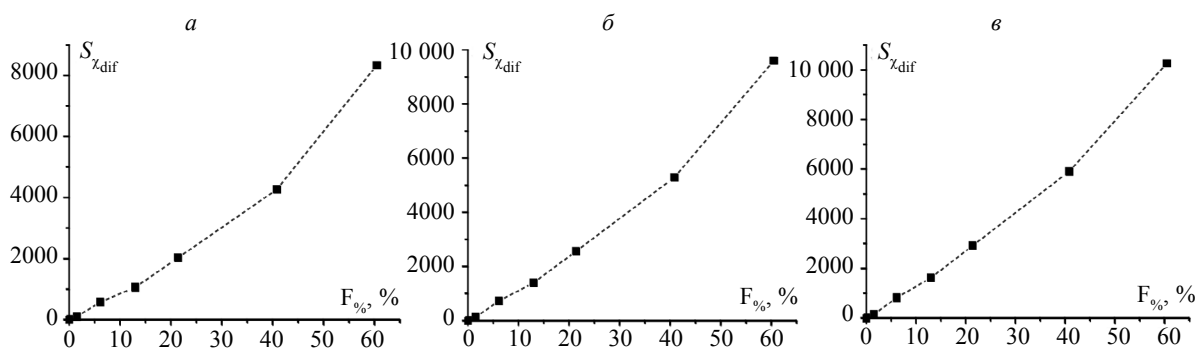


Рис. 16. Зависимости $S_{\chi_{dif}}(F_{\%})$, построенные по усредненным значениям $S_{\chi_{dif}}$ и $F_{\%}$; кривые $\chi_{dif}(H)$ строились в полях: а — $-250—250$ А/см; б — $-400—400$ А/см; в — $-550—550$ А/см.

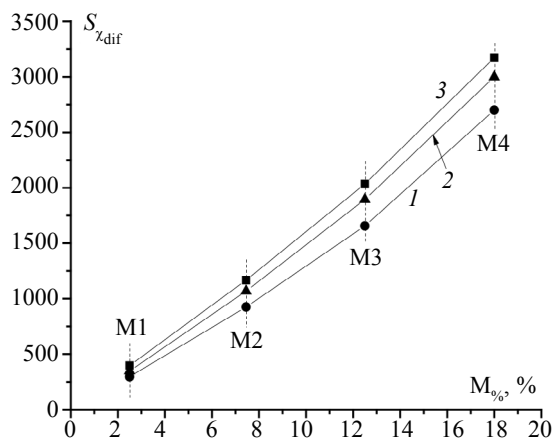


Рис. 17. Зависимости $S_{\chi_{dif}}(M_{\%})$ образцов, содержащих мартенсит; кривые $\chi_{dif}(H)$ строились в полях: 1 — $-250—250$ А/см; 2 — $-400—400$ А/см; 3 — $-550—550$ А/см.

Построение кривых $\chi_{dif}(H)$ и расчет площадей под ними в основном могут быть востребованы при контроле содержания каждой из двух ферромагнитных фаз — феррита и мартенсита деформации в трехфазных сталях (аустенит—феррит—мартенсит), т.к. по величине намагниченности в трехфазных сталях можно судить только о суммарном количестве ферромагнитных включений. Для определения количества фазы феррита и фазы мартенсита в трехфазных сталях авторами в [12, 13] была предложена экспериментально-расчетная методика на основе анализа зависимостей $\chi_{dif}(H)$.

Максимальная дифференциальная восприимчивость. Максимальная дифференциальная восприимчивость — $\chi_{D_{\max}}$ определялась по зависимостям $\chi_{\text{dif}}(H)$. Зависимость $\chi_{D_{\max}}(F\%)$ для всех образцов аустенитно-ферритных сталей приведена на рис. 18.

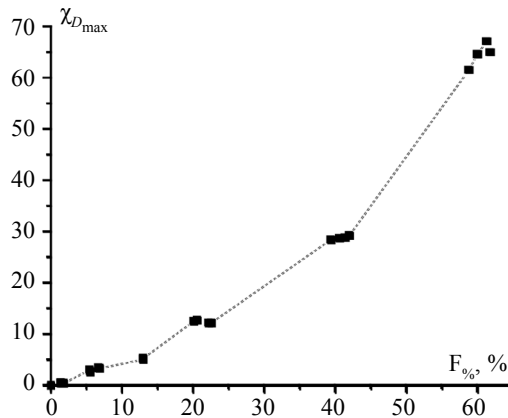


Рис. 18. Зависимость $\chi_{D_{\max}}(F\%)$ всех образцов аустенитно-ферритных сталей; $\chi_{D_{\max}}$ определялась по кривым $\chi_{\text{dif}}(H)$, построенным в полях $-250—250$ А/см.

На рис. 19 приведены зависимости $\chi_{D_{\max}}(F\%)$, построенные по усредненным значениям $\chi_{D_{\max}}$ и $F\%$. Максимальное значение дифференциальной магнитной восприимчивости определялось по кривым $\chi_{\text{dif}}(H)$, которые строились в трех диапазонах H : $-250—250$ А/см; $-400—400$ А/см; $-550—550$ А/см.

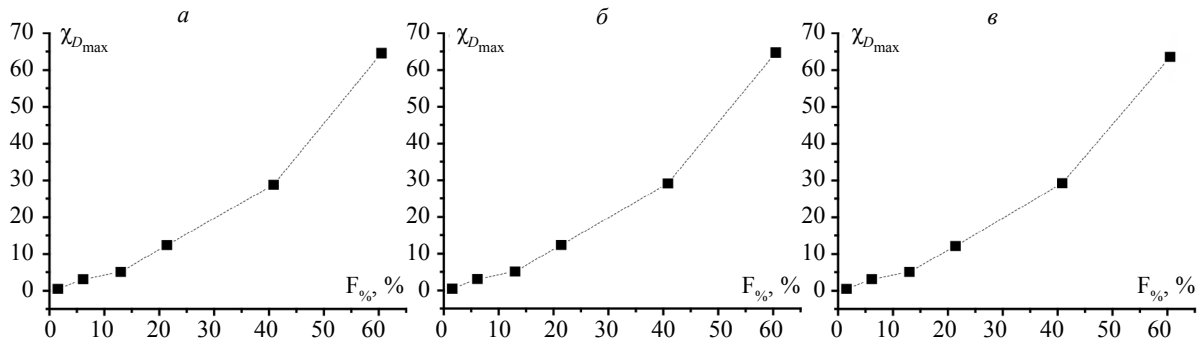


Рис. 19. Зависимости $\chi_{D_{\max}}(F\%)$, построенные по усредненным значениям $\chi_{D_{\max}}$ и $F\%$; $\chi_{D_{\max}}$ определялась по кривым $\chi_{\text{dif}}(H)$ в полях: a — $-250—250$ А/см; b — $-400—400$ А/см; v — $-550—550$ А/см.

На рис. 20 приведены зависимости $\chi_{D_{\max}}(M\%)$ образцов с мартенситом. Величина $\chi_{D_{\max}}$ образцов с мартенситом также определялась по кривым $\chi_{\text{dif}}(H)$, которые строились в трех диапазонах H : $-250—250$ А/см; $-400—400$ А/см; $-550—550$ А/см.

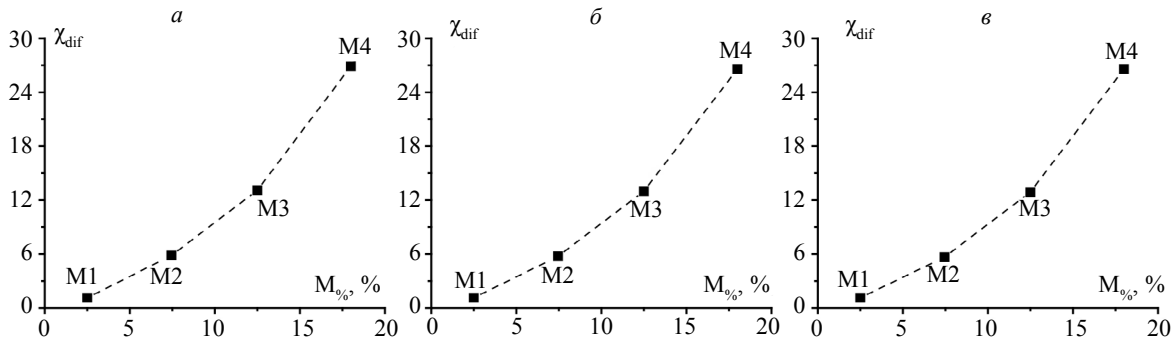


Рис. 20. Зависимости $\chi_{D_{\max}}(M\%)$ образцов с мартенситом; $\chi_{D_{\max}}$ определялась по кривым $\chi_{\text{dif}}(H)$, построенным в полях: a — $-250—250$ А/см; b — $-400—400$ А/см; v — $-550—550$ А/см.

Графики на рис. 18 — 20 показывают возрастание $\chi_{D_{\max}}$ при увеличении содержания как феррита, так и мартенсита деформации. При этом основным результатом исследований является то, что зависимости $\chi_{D_{\max}}$ ($F_{\%}$) для образцов, содержащих феррит, на рис. 19 практически идентичны друг другу, то есть величина максимума кривой дифференциальной магнитной восприимчивости образца остается постоянной независимо от диапазона магнитного поля, в котором строится эта кривая. Аналогичная картина наблюдается и на рис. 20, где значения $\chi_{D_{\max}}$ для образцов, содержащих мартенсит деформации, также совпадают друг с другом независимо от диапазона поля, в котором строилась кривая $\chi_{\text{dif}}(H)$. Таким образом, как для феррита, так и для мартенсита деформации, величина максимума дифференциальной восприимчивости однозначно связана с содержанием этих фаз в двухфазных сталях.

При контроле фазового состава хромоникелевых сталей по магнитным свойствам однозначность величины $\chi_{D_{\max}}$ является ее основным преимуществом по сравнению с рассмотренными выше магнитными параметрами. В связи с однозначной связью $\chi_{D_{\max}}$ с фазовым составом независимо от амплитуды перемагничивания образца, интерес представляет практическая разработка средства неразрушающего контроля фазового состава двухфазных сталей, использующего $\chi_{D_{\max}}$ в качестве информативного параметра.

ВЫВОДЫ

1. На основании большого цикла исследований магнитных свойств сталей содержащих феррит или мартенсит деформации, при перемагничивании этих образцов при разной амплитуде магнитного поля, установлены корреляционные связи фазового состава и исследуемых магнитных параметров, таких как: коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, максимальная намагниченность, площадь под зависимостью $\chi_{\text{dif}}(H)$, максимум зависимости $\chi_{\text{dif}}(H)$.

2. Показано, что все исследуемые параметры в большей или меньшей степени 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 (в полях от 300 А/см).

3. Установлено, что величина максимума дифференциальной магнитной восприимчивости однозначно связана с содержанием фазовых составляющих независимо от амплитуды перемагничивающего поля в полях от 300 А/см. В связи с чем данный магнитный параметр может служить достоверной характеристикой магнитного контроля фазового состава аустенитно-ферритных и аустенитно-мартенситных сталей.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Меринов П.Е., Кареева М.А., Григорьев Б.П.* Метод магнитного насыщения для аттестации стандартных образцов содержания ферритной фазы в сталях аустенитно-ферритного класса // Труды ЦНИИТМАШ. 1989. № 215. С. 72—76.
2. ГОСТ 26364—90. Ферритометры для сталей аустенитного класса. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1991. 8 с.
3. ГОСТ 8.518—84. Государственная система единства измерений. Ферритометры для сталей аустенитного класса. Методика поверки. М.: Изд-во стандартов, 1985. 11 с.
4. ГОСТ 22838—77. Сплавы жаропрочные. Методы контроля и оценки макроструктуры. М.: Изд-во стандартов, 1979. 27 с.
5. ГОСТ 11878—66. Сталь аустенитная. Методы измерения содержания ферритной фазы в прутках. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2011. 6 с.
6. 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.
7. *Ригмант М.Б., Ничипурук А.П., Худяков Б.А., Пономарев В.С., Терещенко Н.А., Корх М.К.* Приборы для магнитного фазового анализа изделий из аустенитных коррозионно-стойких сталей // Дефектоскопия. 2005. № 11. С. 3—14.
8. *Merinov P., Entin S., Beketov B., Runov A.* The magnetic testing of the ferrite content of austenitic stainless steel weld metal // NDT International. 1978. V. 11. No. 1. P. 9—14.
9. *Меринов П.Е., А.Г. Мазена.* Определение мартенсита деформации в сталях аустенитного класса магнитным методом // Заводская лаборатория. 1997. № 3. С. 47—49.

10. *Меринов П.Е., Энтин С.Д., Бекетов Б.И., Рунов А.Е.* Метод количественного определения содержания феррита в сварных швах хромоникелевых сталей // Сварочное производство. 1977. № 3. С. 9—13.
11. Международная инженерная энциклопедия. Неразрушающие методы контроля. Спецификатор различий в национальных стандартах различных стран / Под ред. проф. В.Я. Кершенбаума. М.: Центр «Наука и техника», 1995. Т. 3. С. 68—128.
12. *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.
13. *Корх М.К., Ригмант М.Б., Давыдов Д.И., Шишкин Д.А., Ничипурук А.П., Корх Ю.В.* Определение фазового состава трехфазных хромоникелевых сталей по магнитным свойствам // Дефектоскопия. 2015. № 12. С. 20—31.
14. *Gorkunov E.S., Emelyanov I.G., Zadvorkin S.M., Mitropolskaya S.Yu.* A model of the stress state of a two-layer steel product under uniaxial tension // *Metally*. 2007. No. 1. P. 78—82.
15. *Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Povolotskaya A.M., Goruleva L.S., Veretennikova I.A., Kamantsev I.S.* The Application of Magnetic Structural Phase Analysis for the Diagnostics of the State of a 08X18H10T Steel–C 3 Steel Composite Material and Its Components That Were Subjected to Plastic Deformation // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2012. V. 48. No. 6. P. 346—356.
16. *Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Putilova E.A.* Magnetic estimation of stresses applied to a two-layer steel C(T)3-steel 08X18H10T composite material during elastoplastic deformation by uniaxial tension // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2012. V. 48. No. 8. P. 495—504.
17. *Макаров А.В., Горкунов Э.С., Скорьнина П.А., Коган Л.Х., Юровских А.С., Осинцева А.Л.* Вихре-токовый контроль фазового состава и твердости метастабильной аустенитной стали после различных режимов наноструктурирующей фрикционной обработки // Дефектоскопия. 2016. № 11. С. 15—26.