

УДК 620.179.14:669.14

ВЫЯВЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ В АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 09X17H5Ю ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРОКАТКОЙ

М. Б. РИГМАНТ, А. В. КОЧНЕВ, Н. В. КАЗАНЦЕВА, Ю. В. КОРХ, М. К. КОРХ

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН
Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14:669.14

REVEALING OF MAGNETIC ANISOTROPY IN AUSTENITIC STEEL 09KH17N5YU AFTER DEFORMATION BY ROLLING

M. B. RIGMANT, A. V. KOCHNEV, N. V. KAZANTSEVA, YU. V. KORKH, M. K. KORKH

Аннотация. Проведены исследования структуры, фазового состава и магнитной анизотропии в деформированных прокаткой аустенитных образцах стали 09X17H5Ю при образовании в них мартенсита деформации. Показано, что метод магнитного неразрушающего контроля, использующий измерение магнитных полей от локально намагниченных участков, чувствителен к анизотропии магнитной проницаемости. Анизотропия магнитных свойств связана с появлением механической текстуры прокатки. Образование ферромагнитного мартенсита деформации в аустенитной стали 09X17H5Ю подтверждено методом магнитно-силовой микроскопии.

Ключевые слова: магнитные методы контроля, фазовый состав, аустенитная сталь, мартенсит деформации.

Abstract. The structure, phase composition, and magnetic anisotropy were studied in austenitic samples of 09Kh17N5Yu steel deformed by rolling during the formation of deformation martensite in them. It is shown that the method of magnetic non-destructive testing, which uses the measurement of magnetic fields from locally magnetized areas, is sensitive to the anisotropy of magnetic permeability. The anisotropy of the magnetic properties is associated with the appearance of a mechanical texture of rolling. The formation of ferromagnetic deformation martensite in austenitic steel 09Kh17N5Yu was confirmed by magnetic force microscopy.

Keywords: magnetic testing method, phase composition, austenitic steel, deformation martensite.

Введение. Широкое применение аустенитных сталей обусловлено их коррозионной стойкостью, жаропрочностью, пластичностью. Значительное влияние на технические свойства данных сталей оказывает фазовый состав металла. При эксплуатации изделий из аустенитных сталей под действием деформаций и температуры в структуре аустенитного материала возможно протекание мартенситного превращения. Появление ферромагнитной фазы мартенсита деформации в аустенитной стали может привести к охрупчиванию металла и резкому снижению коррозионных свойств, что обуславливает

необходимость выявления мартенсита деформации на ранних стадиях его зарождения для предотвращения разрушения конструкции.

Так как образование мартенсита деформации (α' -фазы) сопровождается изменением магнитных свойств металла, его наличие можно определять с помощью магнитных методов [1]. В этом направлении представляет большой интерес вопрос возникновения анизотропии магнитных свойств в аустенитных материалах. Наиболее распространенные методы магнитного контроля, использующие намагниченность насыщения, не позволяют проводить исследования анизотропии магнитных свойств ввиду одноосного намагничивания материала до состояния магнитного насыщения.

В [2] при изучении конструкционных сталей (Ст3, 09Г2С, 08Г2Б), подвергнутых прокатке и одноосному растяжению, была обнаружена связь между механической и магнитной анизотропией: изменение тангенциальной и нормальной составляющих полей рассеяния, а также коэрцитивной силы происходило в двух взаимно перпендикулярных направлениях по отношению к оси деформации. В [3] показано, что деформация холодной прокаткой оказывала влияние на магнитные характеристики аустенитной стали 08Х18Н10Т. Однако подробные структурные и текстурные исследования деформированных образцов из аустенитной стали в [3] не проводили.

Возникновение анизотропии магнитных свойств в аустенитных материалах, обусловленной процессом деформации (текстурой), может свидетельствовать о наличии фазовых переходов с формированием ферромагнитных фаз (мартенсита деформации).

В работе представлены результаты исследований по выявлению анизотропии магнитных свойств, а также ее связи с образованием мартенсита деформации в аустенитной хромоникелевой стали 09Х17Н5Ю методами магнитного неразрушающего контроля и структурного анализа.

Материалы и методы исследований. В качестве материалов для исследований взято три образца прямоугольного сечения из аустенитной стали 09Х17Н5Ю, не содержащей феррит, которые подвергли прокатке при комнатной температуре. Размеры образцов представлены в табл. 1. Деформация рассчитана по изменению толщины образца после прокатки.

Табл. 1. Поперечное сечение исследуемых образцов

Номер образца	Деформация, %	Поперечное сечение, мм
Исходный	0	10,75 × 4,35
1	16	10,90 × 3,65
2	31	11,35 × 3,00
3	55	12,0 × 1,95

Относительная магнитная проницаемость μ была измерена прибором «ФерроКОМПАС» вдоль и поперек направления прокатки. Погрешность измерения прибора согласно сертификату калибровки составляет $\pm 0,003$ (Сертификат калибровки № 002220-285-261 от 24 декабря 2018 г.,

ФГУП «УНИИМ»). Измерение коэрцитивной силы проводилось на экспериментальной установке для исследования магнитоупругого эффекта магнитометрического типа, описанной в [4].

Анализ структуры осуществляли на растровом микроскопе ZEISS CrossBeam AURIGA. Для определения ориентировки отдельных зерен и анализа локальной текстуры использовали приставку EBSD HKL Inca с системой анализа Oxford Instruments Chennal 5. Шаг сканирования – 0,1 мкм. Погрешность определения ориентации кристаллической решетки – не более $\pm 1^\circ$ (в среднем $\pm 0,6^\circ$). Изображения атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии были получены на сканирующем зондовом микроскопе Solver Next.

Результаты и обсуждение. На рис. 1 представлены изображения и ориентационные карты исследуемых образцов, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа. На выделенном участке на рис. 1, *a* видно, что внутри зерен аустенита после прокатки возникает пластинчатая структура, которая может быть связана с ОЦК мартенситом деформации. С увеличением степени деформации (рис. 1, *a, в, д*) происходит сужение зерен и вытягивание их по направлению прокатки (ширина зерен меняется от 30 мкм в образце 1 до 20 мкм в образце 2). Количество зерен с внутренней пластинчатой структурой увеличивается. При этом видно, что пластины образуются в зернах, ориентированных вдоль направления прокатки.

В образце 3 ширина зерна составляет около 10 мкм, причем внутренняя структура зерна фактически не различима (см. рис. 1, *д*).

Дополнительные исследования показали возникновение в образцах многокомпонентной текстуры, включающей ГЦК-текстуру прокатки $\{110\}\langle 111 \rangle$ и текстуру Госсса $\{110\}\langle 001 \rangle$, характерную для деформированных ОЦК-решёток [5].

Результаты магнитно-силовой микроскопии. С помощью магнитно-силовой микроскопии подтверждено образование мартенсита деформации. Изображения получены в бесконтактном режиме с использованием двухпроходной техники, позволяющей визуализировать неоднородность магнитной силы, действующей на зонд со стороны образца. В этом случае исключается влияние рельефа поверхности образцов на результаты магнито-силового сканирования.

На рис. 2 показаны магнитно-силовые изображения деформированных образцов. В исходном состоянии образцы были парамагнитны. В структуре деформированных образцов присутствуют темные крупные зерна парамагнитного аустенита, которые однородны по интенсивности. При этом ферромагнитный мартенсит деформации на магнитно-силовом изображении выглядит, как светлые игольчатые параллельные вытянутые магнитные структуры внутри аустенита. Количество и плотность магнитных структур увеличивается с увеличением деформации (см. рис. 2).

Похожая магнитная доменная структура мартенсита деформации получена с помощью магнитно-силового микроскопа в [6], где показано различие магнитной доменной структуры феррита и образующегося при деформации ОЦК мартенсита в низкоуглеродистых сталях.

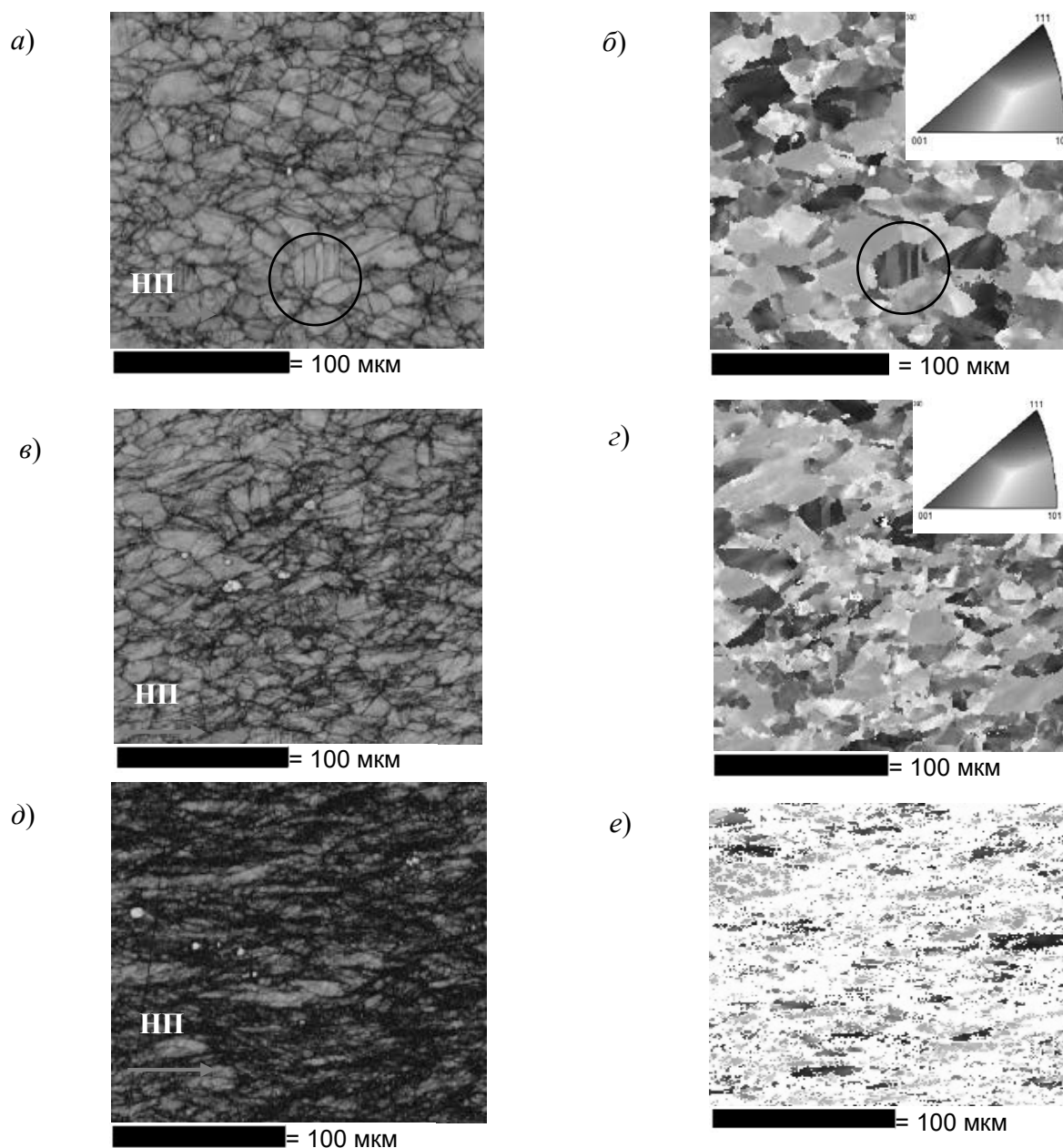


Рис. 1. Изображения сканирующей электронной микроскопии и ориентационные карты, полученные в EBSD-режиме для образца 1 (*а*, *б*), образца 2 (*в*, *г*), образца 3 (*д*, *е*), НП – направление прокатки

Магнитные измерения. В табл. 2 представлены результаты магнитных измерений. Отсутствие ферромагнитных фаз в исходном состоянии было подтверждено как измерениями на установке сильных магнитных полей, так и значением относительной магнитной проницаемости (1,003). Коэрцитивная сила деформированных образцов составляла более 100 А/см, что значительно выше значений, характерных для магнитомягкой фазы феррита (15...16 А/см [7]), а это свидетельствует о фазовом превращении с образованием ферромагнитного мартенсита деформации.

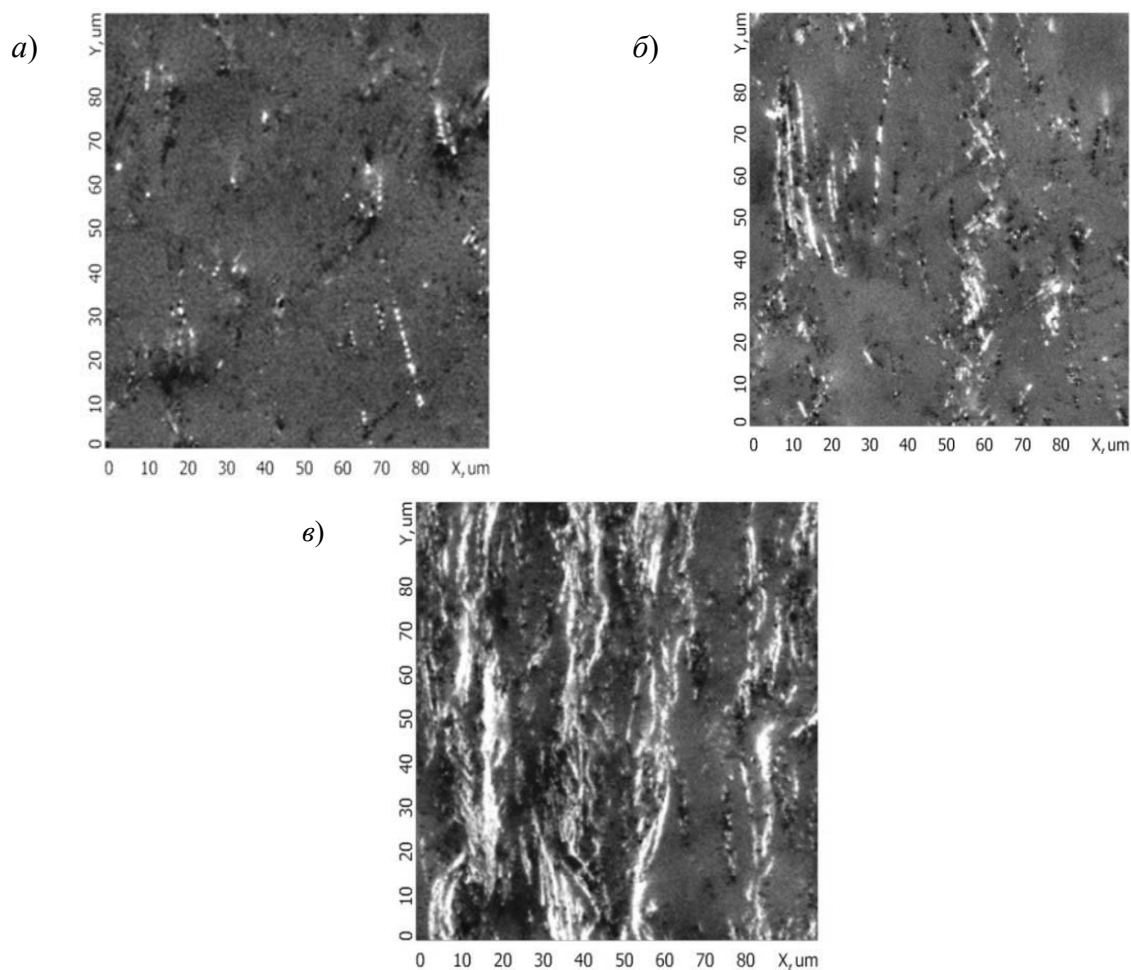


Рис. 2. Магнитно-силовые изображения мартенсита в деформированных образцах: *a* – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 3

Табл. 2. Результаты магнитных измерений исследуемых образцов после деформации прокаткой

Номер образца	Деформация, %	Намагниченность насыщения, кА/м	Содержание мартенсита, %	Относительная магнитная проницаемость μ	
				Перпендикулярно направлению прокатки	По направлению прокатки
1	16	15	1,5	$1,036 \pm 0,003$	$1,045 \pm 0,003$
2	31	42	4	$1,267 \pm 0,003$	$1,283 \pm 0,003$
3	55	88	8	$1,485 \pm 0,003$	$1,530 \pm 0,003$

Различие в значениях относительной магнитной проницаемости наблюдается в зависимости от положения (ориентации) датчика прибора при измерении (см. табл. 2). Это различие существенно превышает погрешность прибора «ФерроКОМПАС», что позволяет говорить о проявлении анизотропии величины μ в образцах аустенитной стали после процедуры прокатки.

Выводы.

1. Выявлена связь между текстурой, изменением фазового состава и магнитной анизотропией в аустенитной стали 09X17H5Ю после деформации прокаткой при комнатной температуре. Причиной возникновения магнитной анизотропии в аустенитной стали с отсутствием феррита в исходном состоянии является формирование мартенсита деформации в благоприятно ориентированных к фазовому переходу ГЦК – ОЦК зернах.

2. Показано, что метод локального анализа магнитных полей прибором «ФерроКОМПАС» в деформированных прокаткой аустенитных образцах при образовании в них мартенсита деформации чувствителен к проявлению анизотропии магнитных свойств. Появление анизотропии относительной магнитной проницаемости может быть использовано для обнаружения мест зарождения и развития дефектов, вызванных образованием мартенсита деформации.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корреляционная зависимость различных методов контроля содержания ферритной фазы при сварке (наплавке) аустенитных сталей / П. Е. Меринов [и др.] // Сварочное производство. – 1984. – № 9. – С. 34–36.

2. Влияние типа кристаллографической текстуры на анизотропию параметров магнитных полей рассеяния стального листового проката / Э. С. Горкунов [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 54–64.

3. 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 / E. S. Gorkunov [et al.] // Russian Journal of NDT. – 2012. – Vol. 48, № 6. – P. 343–356.

4. К проблеме контроля магнитного состояния ферромагнитных сталей при воздействии на них магнитных полей и упругих напряжений в зарелевской области / В. Г. Кулеев [и др.] // Дефектоскопия. – 1985. – № 10. – С. 32–42.

5. Выявление магнитной анизотропии в аустенитной хромоникелевой стали после прокатки / М. Б. Ригмант [и др.] // Дефектоскопия. – 2021. – № 12. – С. 56–62.

6. Методы выявления мартенсита деформации в аустенитно-ферритных сталях / М. Б. Ригмант [и др.] // Дефектоскопия. – 2015. – № 11. – С. 28–42.

7. **Вонсовский, С. В.** Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферромагнетиков / С. В. Вонсовский. – Москва: Наука, 1971. – 1032 с.

E-mail: rigmant@imp.uran.ru.