

ВЛИЯНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПО СХЕМЕ ДВУХОСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИКЕЛЯ

© 2023 г. А.Н. Мушников^{1,*}, А.М. Поволоцкая^{1,2,**}, С.М. Задворкин^{1,***}, Л.С. Горюлева^{1,****},
Е.А. Путилова^{1,*****}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, Россия 620049 Екатеринбург,
ул. Комсомольская, 34

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов
им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Россия 620108 Екатеринбург,
ул. Софьи Ковалевской, 18

E-mail: *mushnikov@imach.uran.ru; **anna.povolotskaya.68@mail.ru; ***zadvorkin@imach.uran.ru;
****sherlarisa@yandex.ru; *****tuevaevgenya@mail.ru

Поступила в редакцию 28.07.2023; после доработки 25.09.2023

Принята к публикации 26.09.2023

Исследования проведены на испытательном стенде на базе созданной в ИМАШ УрО РАН оригинальной двухосной испытательной машины, предназначенной для определения физических свойств материалов в процессе упругопластического деформирования независимо по двум осям. Конечноэлементное моделирование напряженно-деформированного состояния крестообразного никелевого образца показало, что в центральной части при симметричном двухосном растяжении эквивалентные напряжения по Мизесу распределены равномерно. Результаты микроструктурных исследований указывают на то, что при двухосном деформировании при комнатной температуре в материале прошла динамическая рекристаллизация. Приведены результаты изучения закономерностей изменения гистерезисных магнитных характеристик, магнитострикции, параметров магнитных шумов Баркгаузена и электромагнитных параметров никеля при двухосном симметричном растяжении. Установлена однозначная связь коэрцитивной силы с эквивалентными напряжениями в области пластической деформации. Показано, что такие магнитные параметры, как максимум дифференциальной магнитной проницаемости и максимальная магнитная проницаемость, а также амплитуда и частота вихревого сигнала, определенного на частоте 10 кГц, демонстрируют монотонный характер изменения с ростом эквивалентных напряжений как при упругой, так и при пластической деформации.

Ключевые слова: упругопластическая деформация, никель, двухосное симметричное растяжение, коэрцитивная сила, магнитострикция.

EFFECT OF ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION BY BIAxIAL TENSION ON THE MAGNETIC CHARACTERISTICS OF THE NICKEL

A.N. Mushnikov^{1,*}, A.M. Povolotskaya^{1,2,**}, S.M. Zadvorkin^{1,***}, L.S. Goruleva^{1,****},
E.A. Putilova^{1,*****}

¹Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia
²M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg,
Russia

E-mail: *mushnikov@imach.uran.ru; **anna.povolotskaya.68@mail.ru; ***zadvorkin@imach.uran.ru;
****sherlarisa@yandex.ru; *****tuevaevgenya@mail.ru

The studies were carried out in a test facility based on the original biaxial testing machine created at the IES UB RAS, designed to determine the physical properties of materials during elastic-plastic deformation independently along two axes. Finite element modeling of the stress-strain state of a cruciform nickel specimen has shown that, under symmetric biaxial tension, equivalent von Mises stresses are uniformly distributed in the central part. The results of microstructural studies indicate that dynamic recrystallization takes place in the material during biaxial deformation at room temperature. The results of studying the behavior of the hysteretic magnetic characteristics, magnetostriction, Barkhausen magnetic noise parameters, and electromagnetic parameters of nickel under biaxial symmetrical tension have been presented. A unique relationship between the coercive force and equivalent stresses in the region of plastic deformation has been revealed. It has been shown that such magnetic parameters as maximum magnetic permeability and the maximum in the field dependence of differential magnetic permeability, as well as the amplitude and frequency of the eddy current signal determined at a frequency of 10 kHz, vary monotonically with increasing equivalent stresses under both elastic and plastic deformations.

Keywords: elastic-plastic deformation, nickel, symmetric biaxial tension, coercive force, magnetostriction.

DOI: 10.31857/S0130308223110015, **EDN:** XASYDY

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач неразрушающего контроля является разработка надежных методов определения напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов. При этом активное применение находят магнитные виды контроля, основой для использования которых служат установленные взаимосвязи между магнитными свойствами ферромагнетиков и параметрами их напряженного состояния. Проблематике оценки напряженно-деформированного состояния объектов из ферромагнитных материалов с помощью неразрушающих магнитных методов контроля посвящено множество работ российских и зарубежных авторов, отметим только некоторые из них [1—13]. Однако практически во всех перечисленных выше литературных источниках исследования ограничиваются теоретическим и экспериментальным изучением закономерностей изменения магнитных свойств различных ферромагнитных материалов от параметров их напряженного состояния в условиях одноосного нагружения в упругой или пластической областях деформаций. В то же время на практике чаще всего встречаются металлические конструкции, работающие в условиях сложного нагружения, и для них, как правило, присущи двухосные и трехосные напряженные состояния. Вопросы же влияния сложного нагруженного состояния, например, двухосного нагружения, на магнитные свойства ферромагнитных материалов в литературе освещены недостаточно полно, можно привести лишь несколько работ [14—24]. Следует отметить, что в данных работах также рассмотрены испытательные машины, позволяющие реализовать в образцах плоское напряженное состояние.

В ИМАШ УрО РАН создана оригинальная экспериментальная установка для двухосного деформирования, с помощью которой, ввиду отсутствия ферромагнитных деталей в рабочей зоне, возможно проводить испытания по схемам двухосного растяжения и сжатия. Установка позволяет осуществлять измерения как магнитных характеристик ферромагнитных материалов, так и других физических свойств. Подробное описание разработанной установки дано в работе [25]. Кроме того, в [25] приведены полученные с использованием данной установки результаты тестового эксперимента по определению закономерностей изменения коэрцитивной силы конструкционной стали 12Г2С в процессе упругого двухосного симметричного деформирования.

Как известно, магнитострикция железа и сплавов на его основе, характеризующаяся константами разного знака (положительной λ_{100} и отрицательной λ_{111}), при изменении приложенных магнитного поля и напряжений меняет не только величину, но может изменить и свой знак (см., например, [26]). Соответственно меняется и знак магнитоупругого вклада во внутреннюю энергию материала [27]. Данные обстоятельства влияют на распределение магнитных моментов в этих материалах, а именно, меняются условия формирования магнитной текстуры, следствием чего является немонотонность зависимостей магнитных характеристик данных материалов от растягивающих напряжений в упругой области [28], представляющей наибольший интерес с точки зрения эксплуатационных нагрузок. Неоднозначные зависимости магнитных параметров от приложенной растягивающей нагрузки в упругой области усложняют процесс корректного анализа получаемых результатов даже в простом случае одноосного нагружения, решение же задачи в условиях двухосного деформирования представляется еще более затруднительным.

Отличительной особенностью никеля, по сравнению с железом, является постоянство знака его магнитострикции. Знак магнитострикции никеля отрицательный и не зависит ни от величины напряженности магнитного поля, ни от приложенных механических напряжений [27]. Этот факт обуславливает рассмотрение никеля в качестве модельного материала для исследования влияния параметров плоского напряженного состояния на магнитные свойства ферромагнетиков.

Экспериментальные результаты по изучению характера поведения магнитных и магнитострикционных характеристик никеля при действии одноосных напряжений представлены в работах [29—31]. Однако публикаций, содержащих сведения о магнитоупругом поведении никеля при двухосном симметричном растяжении, авторами обнаружено не было.

В связи с этим, настоящая работа направлена на изучение влияния двухосного симметричного растяжения на изменение магнитных, электромагнитных и магнитострикционных характеристик никеля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования служил никель марки Н2 со следующим химическим составом, определенным на оптическом эмиссионном спектрометре SPECTROMAXx: С — 0,053 мас. %, Si — 0,026 мас. %, Mn — 0,009 мас. %, W — 0,101 мас. %, Ni — остальное. Для исследований из листо-

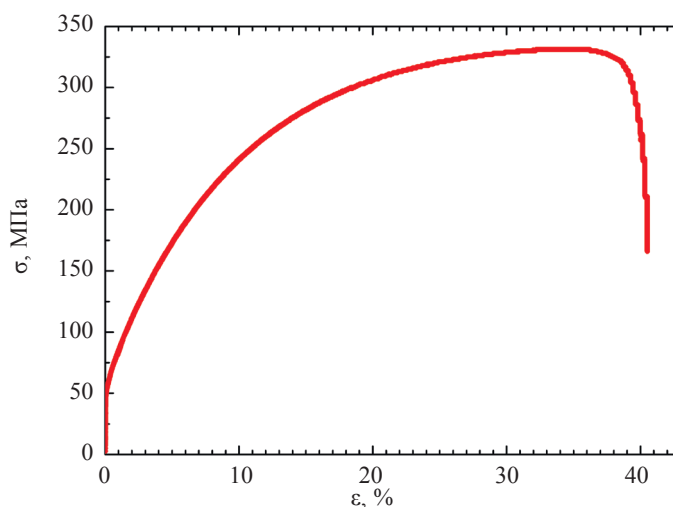


Рис. 1. Диаграмма «напряжение—деформация» никеля.

вого проката толщиной 6,15 мм был вырезан крестообразный образец. Для формирования рабочей зоны образца в центральной части креста были сделаны выборки круговой формы диаметром 40 мм и глубиной 1,15 мм с обеих сторон так, что толщина образца в центральной зоне составляла 3,85 мм. Образец отожгли в вакууме 2 ч при 750 °С с охлаждением в печи.

Для определения механических свойств материала был дополнительно изготовлен разрывной образец-свидетель, отожженный вместе с крестообразным образцом. На нем были проведены испытания в соответствии с ГОСТ 1497—84 на гидравлической испытательной машине Tinius Olsen Super L-60. Диаграмма деформирования представлена на рис. 1. Условный предел текучести исследованного материала равен 50 МПа, временное сопротивление — 330 МПа, относительное удлинение при разрыве — 40 %.

Основной цикл экспериментов с двухосным деформированием проводили на оригинальной двухосной испытательной машине [25]. В рабочей зоне испытательной машины отсутствуют элементы из ферромагнитных материалов, которые могли бы вносить искажения в результаты магнитных измерений.

Фотография испытуемого образца представлена на рис. 2. На образец был наклеен трафарет с целью обеспечения единообразного размещения намагничивающих и измерительных устройств в заранее определенных положениях.

Микроструктурные исследования проводили на образцах в исходном отожженном состоянии и после пластической деформации. Исследования проводили при помощи оптического микроскопа Neophot-21 и сканирующего микроскопа Tescan VEGA II XMU, оснащенного системой дифракционного (EBSD) анализа Advanced AZtecHKL. Подготовку образцов осуществляли посредством шлифовки на алмазных пастах разной дисперсности, последующей полировки на коллоидной кремниевой суспензии и окончательной полировки при помощи установки ионной полировки и травления Linda. Анализ EBSD-карт проводили с использованием программного обеспечения CHANNEL 5.

Рентгеноструктурные исследования осуществляли с помощью дифрактометра SHIMADZU XRD 7000 с использованием монохроматизированного K_{α} -излучения хромового анода на тех же образцах, что и микроструктурные исследования, т.е. образцах, соответствующих исходному состоянию и после снятия максимальной нагрузки. Макронапряжения определяли стандартизованным методом наклонной съемки (метод « $\sin^2\psi$ ») [32]. В ходе аттестации получено, что для исходного состояния образца характерны сжимающие макронапряжения, равные –120 МПа.

Для измерения петель магнитного гистерезиса и начальной кривой намагничивания, из которых в дальнейшем определяли коэрцитивную силу, максимальную относительную магнитную проницаемость и дифференциальную магнитную проницаемость, использовали П-образный электромагнит с измерительными катушками напряженности магнитного поля и магнитной индукции (ПМУ). Полюса электромагнита имели сечение 18×9 мм, межполюсное расстояние составляло 16 мм. Указанные габариты позволяли устанавливать ПМУ в круговой выборке образца и обе-

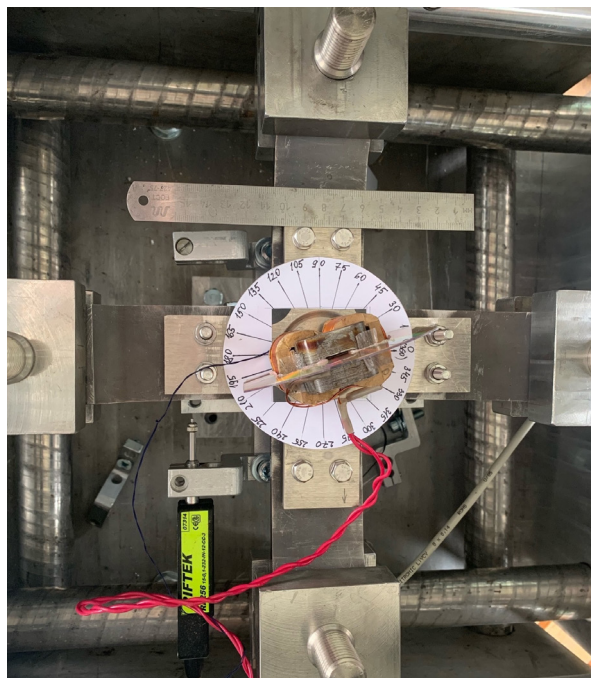


Рис. 2. Крестообразный образец с ПМУ в испытательной машине.

спечивали его промагничивание по всей толщине. Намагничивающая и измерительные катушки ПМУ были подключены к источнику стабилизированного постоянного тока и флюксметрам EF-5 магнитноизмерительного комплекса REMAGRAPH C-500. Частота изменения магнитного поля составляла 0,03 Гц. Нагружение проводили ступенчато (величины нагрузки и соответствующие им напряжения и деформации указаны в следующем разделе), при этом на каждом этапе нагружения гистерезисные магнитные свойства образца определяли, варьируя угол поворота ПМУ α от 0 до 360° с шагом 15°. Использовали следующую систему координат: углом α поворота ПМУ 0 и 180° соответствовало направление оси x , углом 90 и 270° — направление оси y . Оси x и y являлись осями приложения нагрузки. Принятая система координат и расположение ПМУ на образце схематично показаны на рис. 3.

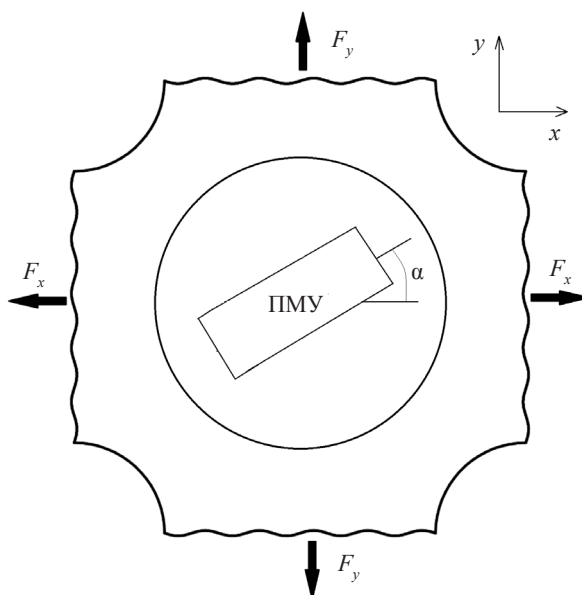


Рис. 3. Выбранная система координат и схема установки приставного магнитного устройства в рабочей зоне образца под углом α к оси x .

Тензорезисторы марки BF-3АА номинальным сопротивлением 350 Ом для измерений магнитострикции λ_x и λ_y (соответственно вдоль осей x и y) наклеивали с противоположной, по отношению к ПМУ, стороне круговой выборки в центральной части образца. Намагничивание образца при измерении магнитострикции осуществляли с помощью ПМУ, которым измеряли магнитные характеристики в квазистатическом магнитном поле H . Тензорезисторы включали в мостовую схему Уинстона с термокомпенсацией. Измерения величин λ_x и λ_y осуществляли на каждом этапе нагружения образца и при каждом повороте ПМУ на угол α к оси x , который варьировали в диапазоне от 0 до 360° с шагом 15°. Сигнал рассогласования мостовой схемы регистрировали с помощью разработанного в ИМАШ УрО РАН измерителя слабых токов [33].

При помощи анализатора Rollscan 300 определяли параметры магнитных шумов Баркгаузена — среднеквадратичные значения напряжения RMS и число скачков Баркгаузена N в переменном магнитном поле. Сечение полюсов анализатора составляло 3,5×8,0 мм, межполюсное расстояние — 3 мм. Амплитуду напряжения питания ПМУ анализатора Rollscan 300 (5 В) и частоту тока перемагничивания (95 Гц) подбирали так, чтобы обеспечить получение максимального сигнала при перемагничивании. Глубина промагничивания на частоте 95 Гц составляла примерно 2 мм. Параметры магнитных шумов Баркгаузена также определяли на каждом шаге нагружения образца при повороте ПМУ против часовой стрелки от 0 до 360° с шагом 15° с усреднением по 10 измерениям.

Для исследований материала методом вихревых токов использовали вихретоковый дефектоскоп «Вектор» производства НПЦ «КРОПУС», оснащенный дифференциальным преобразователем ВТ-4.03. Параметры вихретокового сигнала (амплитуду A и фазовый угол φ) определяли как среднее арифметическое по пяти измерениям на частотах 10 и 50 кГц. При измерениях на данных частотах толщина анализируемого слоя составила 0,2 и 0,1 мм соответственно.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

С помощью программного пакета COMSOL Multiphysics было выполнено конечноэлементное моделирование напряженно-деформированного состояния крестообразного никелевого образца. Результаты моделирования при максимальной нагрузке приведены на рис. 4. Из рис. 4а следует, что в зоне круговой выборки в центральной части образца при симметричном двухосном растяжении эквивалентные напряжения по Мизесу [34] близки к максимальным значениям и распределены по выборке равномерно.

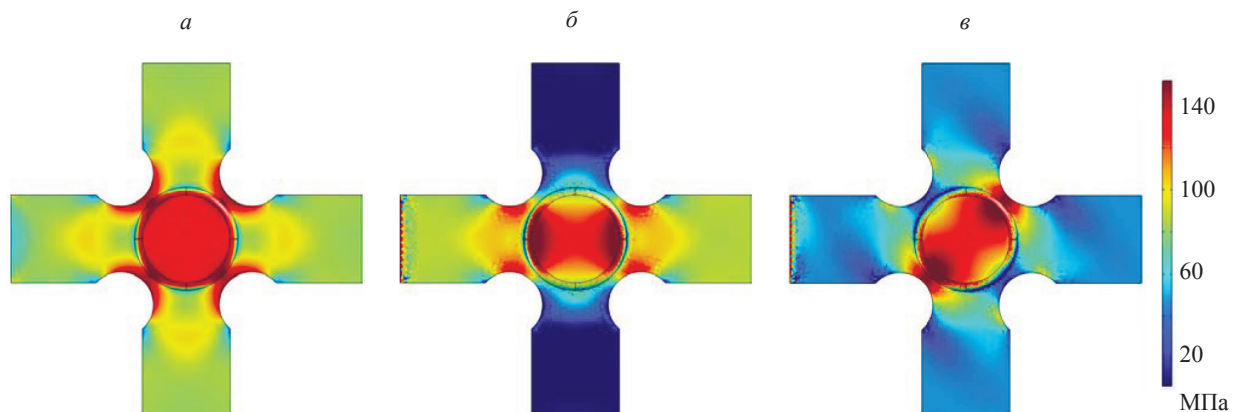


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу (а), нормальных напряжений вдоль оси x (б) и под углом 45° (в) при симметричном двухосном растяжении.

Деформационные зависимости магнитных характеристик неинвариантны — они связаны с направлением внешнего магнитного поля [35], поэтому имеет смысл рассматривать отдельные компоненты тензора напряжений, в особенности нормальные напряжения в направлении магнитных измерений. На рис. 4б показано распределение нормальных напряжений σ_x для горизонтального направления оси x . Распределение напряжений σ_x в случае поворота системы координат на 45° представлено на рис. 4в. В обоих случаях в центре круговой выборки значения нормальных напряжений близки к 120 МПа.

Таблица 1

Величины нагрузки и соответствующие ей эквивалентные напряжения и деформация на каждом шаге нагружения

№ шага нагружения	Нагрузка по каждой из осей, кН	Эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$, МПа	Деформация, %
1	0	0	0
2	2,4	16	0,02
3	4,8	32	0,04
4	7,4	50	0,06
5	9,4	64	0,10
6	11,8	80	0,80
7	13,9	94	1,37
8	15,7	106	1,75
9	17,5	120	2,32
10	0 (после снятия нагрузки 17,5 кН)	0	2,13 (остаточная деформация)

В табл. 1 представлены величина нагрузки на каждом шаге нагружения, а также соответствующие ей значения интенсивности напряжений и деформации. Шаги нагружения с 1-го по 4-й отвечают упругой области нагружения, с 5-го шага по 9-й — стадии пластической деформации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Исследование микроструктуры никеля в исходном и деформированном состоянии

На рис. 5 представлены полученные при помощи оптической микроскопии структуры исследуемых образцов никеля в исходном состоянии и после двухосного деформирования. Как в исходном состоянии, так и после деформации наблюдается разноразмерная структура с зернами полиэдрической формы. Из рис. 5а видно, что в исходном отожженном состоянии помимо большеугловых границ заметны другие элементы структуры. Эти элементы можно трактовать как фрагменты межзеренных границ в исследуемом металле, сформированные до проведения отжига. Из сравнения рис. 5а и 5б видно, что количество этих структурных элементов после деформации значительно уменьшается, что может свидетельствовать о протекании в материале динамической рекристаллизации даже при комнатной температуре [36, 37]. Как видно из рис. 5б, произошла миграция границ зерен, взаимодействие дефектов с этой границей, что привело к укрупнению зерен и формированию зерен с более совершенной формой. Границы зерен приобретают более низкоэнергетическую конфигурацию, что выражается в наличии большого количества тройных стыков границ зерен под углом 120° .

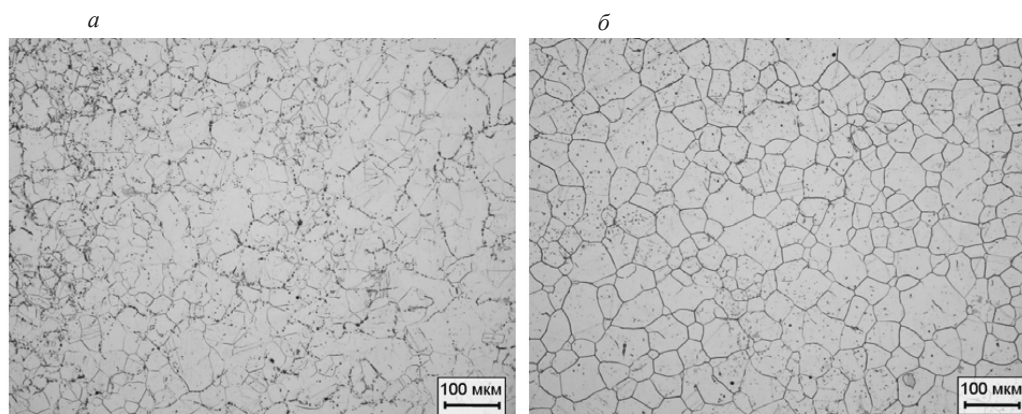


Рис. 5. Микроструктура исследуемых образцов никеля в исходном состоянии (а) и после двухосного деформирования (б).

Анализ обратных полюсных фигур никеля в исходном состоянии (рис. 6а) показывает, что параллельно плоскости образца ориентированы преимущественно плоскости $\{112\}$, вдоль оси y — оси $\langle 111 \rangle$, вдоль оси x — оси $\langle 110 \rangle$ и $\langle 302 \rangle$. Таким образом, для исследованного материала в отожженном состоянии характерна текстура типа $\{112\}\langle 111 \rangle$, что соответствует одному из типов текстуры прокатки ГЦК-металла [38]. Это также свидетельствует о неполноте прошедшей рекристаллизации в процессе отжига.

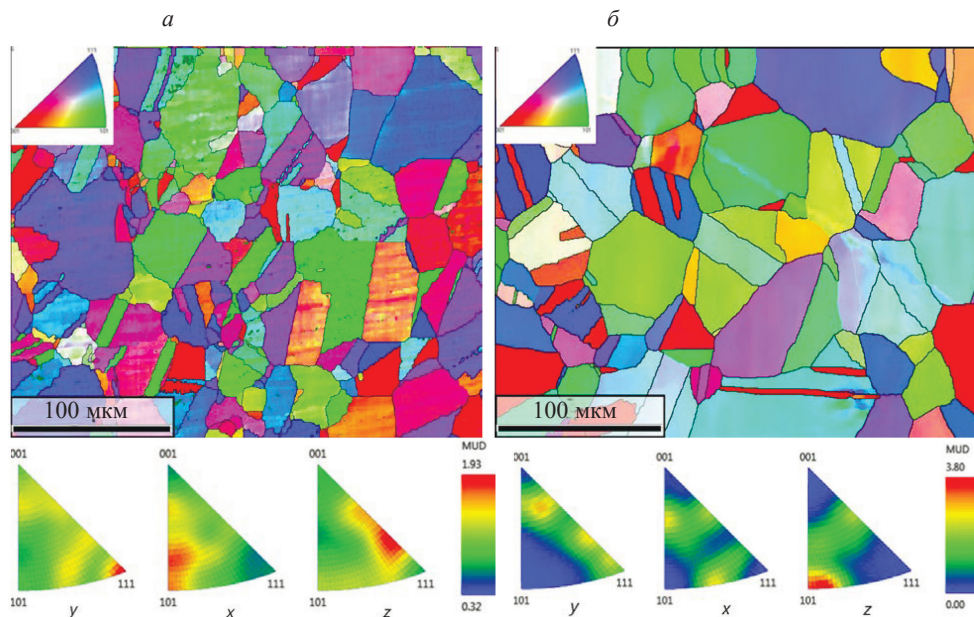


Рис. 6. EBSD-карты разориентировок и обратные полюсные фигуры для образцов никеля в исходном состоянии (а) и после двухосного симметричного растяжения (б).

После пластической деформации текстурное состояние образца изменилось (рис. 6б): параллельно плоскости образца ориентированы преимущественно плоскости $\{110\}$, вдоль оси x — оси $\langle 212 \rangle$ и $\langle 102 \rangle$, вдоль оси y — оси $\langle 112 \rangle$, $\langle 335 \rangle$ и $\langle 216 \rangle$. Смена типа текстуры может быть признаком динамической рекристаллизации.

По результатам рентгеноструктурного анализа было установлено, что макронапряжения сжатия, характеризующие среднее значение остаточных напряжений, после двухосного пластического деформирования увеличиваются по модулю примерно в 2 раза, причем вдоль обеих осей растяжения.

2. Влияние симметричного двухосного растяжения на магнитные и магнитострикционные характеристики при перемагничивании в постоянном поле

На рис. 7 в качестве примера представлены фрагменты предельных петель магнитного гистерезиса никелевого образца, измеренные в направлении $\alpha = 0$ в исходном состоянии и при упругопластическом двухосном симметричном растяжении. Можно отметить, что во всем интервале исследованных напряжений с ростом нагрузки форма петли магнитного гистерезиса становится более пологой, причем наиболее существенные изменения в форме петель магнитного гистерезиса происходят в упругой области, в пластической области с ростом приложенных напряжений форма петель изменяется слабо.

На рис. 8 и 9 представлены полярные диаграммы значений коэрцитивной силы H_c и максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{макс}}$, полученных на каждом шаге упругопластического двухосного симметричного растяжения, а также после снятия деформирующей нагрузки, при различных углах поворота ПМУ α .

В исходном состоянии и на начальном этапе нагружения, соответствующем упругой области деформации, наблюдается анизотропия коэрцитивной силы (кривые 1—4 на рис. 8а). Ее значения максимальны при $\alpha = 45^\circ$ вследствие особенности распределения остаточных напряжений в исход-

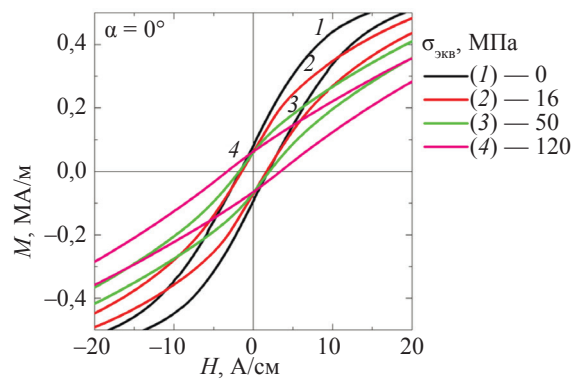


Рис. 7. Фрагменты петель магнитного гистерезиса никелевого образца при упругопластическом двухосном симметричном растяжении.

ном состоянии. Известно [30], что оси легкого намагничивания никеля соответствуют направлениям типа $\langle 111 \rangle$. Из рис. 6а видно, что в исходном состоянии преимущественная кристаллографическая ориентировка $\langle 111 \rangle$ как раз характерна для оси растяжения y . Вдоль оси x преимущественной кристаллографической ориентировкой является направление $\langle 101 \rangle$, намагничивание в направлении которого происходит труднее. При упругой деформации происходит уменьшение величины коэрцитивной силы во всех направлениях, средняя ее величина по сравнению с исходным состоянием снижается примерно на 8 %.

На этапе пластической деформации коэрцитивная сила монотонно возрастает вследствие роста плотности дефектов. Ее величина относительно исходного состояния увеличивается примерно в 1,9 раза. Кроме того, по мере роста нагрузки анизотропия коэрцитивной силы, характерная для области упругой деформации, практически исчезает. Таким образом, поведение коэрцитивной силы соответствует равномерному распределению эквивалентных напряжений в зоне измерений коэрцитивной силы. Необходимо еще раз отметить, что двухосное пластическое растяжение приводит к изменению текстурного состояния исследованного материала, причем вдоль координатных осей x и y отсутствуют преимущественные ориентации осей легкого намагничивания $\langle 111 \rangle$, осей трудного намагничивания $\langle 100 \rangle$ и «промежуточных» осей $\langle 110 \rangle$ (см. рис. 6б).

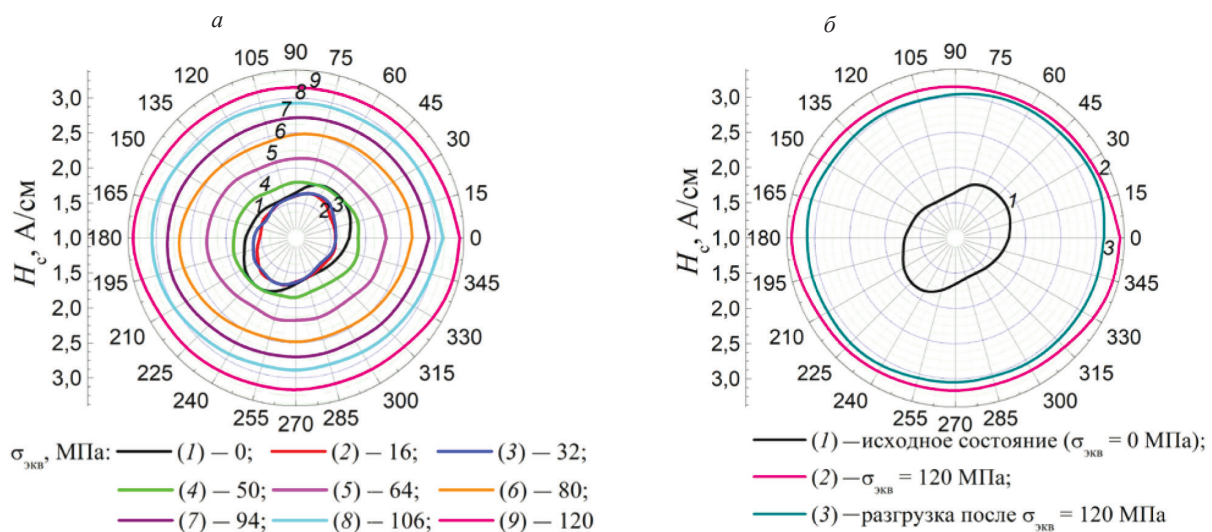


Рис. 8. Полярные диаграммы значений коэрцитивной силы образца при упругопластическом двухосном симметричном растяжении: при различных величинах эквивалентных напряжений (а); в исходном состоянии, при максимальной растягивающей нагрузке и после снятия нагрузки (б).

Как видно из рис. 8б, коэрцитивная сила пластически деформированного образца после снятия нагрузки лишь незначительно снижается по сравнению с H_c при максимальной нагрузке. Это обусловлено существенным, по сравнению с исходным состоянием, увеличением уровня остаточных напряжений в образце после пластической деформации и равномерным их распределением в центральной зоне образца.

В отличие от коэрцитивной силы, величины максимальной относительной магнитной проницаемости $\mu_{\text{макс}}$ демонстрируют однозначную зависимость от приложенных напряжений во всем диапазоне их изменения (рис. 9а). Средняя величина этой характеристики при максимальной исследованной степени пластической деформации относительно ненагруженного состояния уменьшается более, чем в два раза. Можно предположить, что на $\mu_{\text{макс}}$ значительное влияние оказывают величины нормальных и касательных напряжений, их распределение в зоне определения магнитных характеристик и в гораздо меньшей степени сказываются инвариантные характеристики напряженного состояния. Величина максимальной магнитной проницаемости образца после снятия нагрузки по сравнению с аналогичной величиной при максимальной нагрузке немного уменьшается (см. рис. 9б).

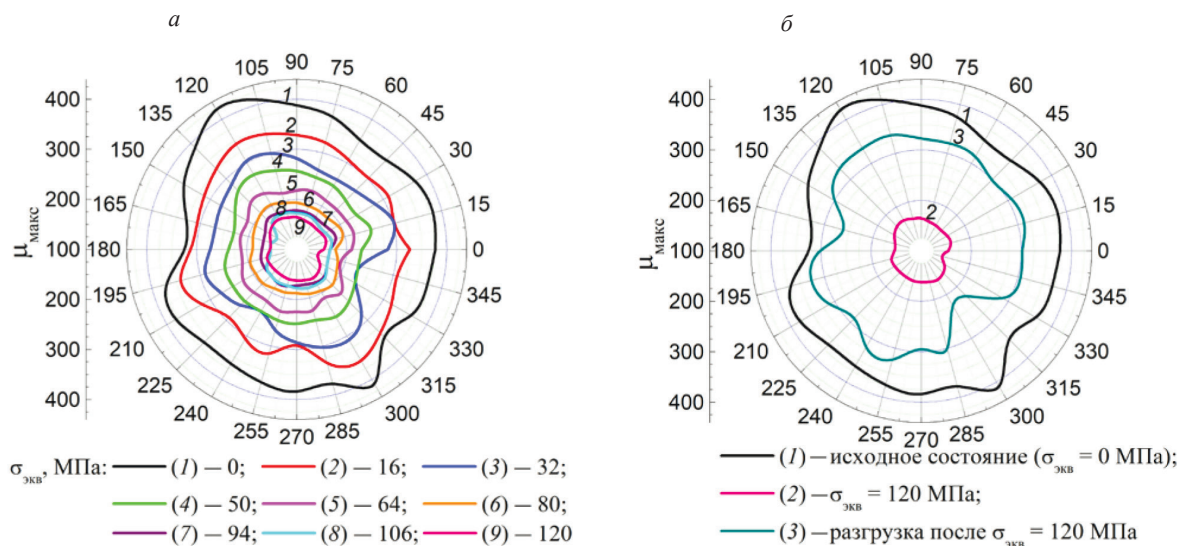


Рис. 9. Полярные диаграммы значений максимальной магнитной проницаемости образца при упругопластическом двухосном симметричном растяжении: при различных величинах эквивалентных напряжений (а); в исходном состоянии, при максимальной растягивающей нагрузке и после снятия нагрузки (б).

Анализ изменений полевых зависимостей дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ (рис. 10а), полученных при двухосном симметричном растяжении материала и ориентации магнитного поля вдоль оси x (т.е. $\alpha = 0^\circ$), показал, что как в упругой, так и в пластической областях деформаций по мере увеличения нагрузки максимум дифференциальной магнитной проницаемости, формируемый в отрицательных полях, уменьшается по величине. При этом в упругой области расположение данного максимума наблюдается в меньших по абсолютной величине магнитных полях, а в области пластической деформации расположение максимума смещается в сторону больших значений напряженности магнитного поля. Монотонное изменение высоты пиков $\mu_{\text{диф макс}}$ с ростом эквивалентных напряжений более наглядно показано на рис. 10б. Кроме того, как видно из рис. 10а, на кривых $\mu_{\text{диф}}(H)$, соответствующих стадии пластической деформации (кривые 5–9), в положительных полях начинает формироваться второй пик, который с ростом степени пластической деформации становится более выраженным.

Исследования полевых зависимостей магнитострикции крестообразного никелевого образца под действием упругопластического двухосного симметричного деформирования в направлениях осей нагружения (λ_x и λ_y) проводили при различных углах α (от 0 до 360° с шагом 15°) и при различных величинах эквивалентных напряжений. В качестве примера на рис. 11 представлены экспериментальные кривые λ_x и λ_y , полученные при $\alpha = 90^\circ$.

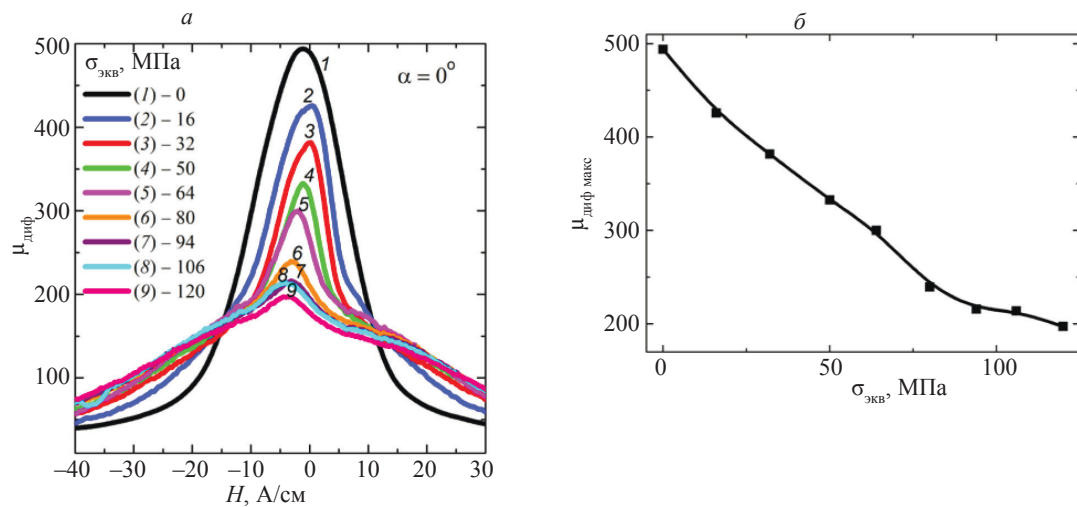


Рис. 10. Полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ при различных величинах эквивалентных напряжений (а); зависимость максимумов дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф макс}}$ от величины эквивалентных напряжений (б). Угол α равен 0° .

Полевые зависимости магнитострикции на рис. 11 имеют вид, характерный для материалов с отрицательной магнитострикцией: во всем диапазоне изменения напряженности магнитного поля значения λ_x и λ_y отрицательны и увеличиваются по модулю по мере увеличения H . В области слабых магнитных полей, где в основном преобладают процессы смещения доменных границ, представленные на рис. 11 кривые 2—9, соответствующие измерениям магнитострикции образца под действием растягивающей нагрузки, более пологие в сравнении с кривыми 1, соответствующими измерениям магнитострикции образца в исходном ненагруженном состоянии.

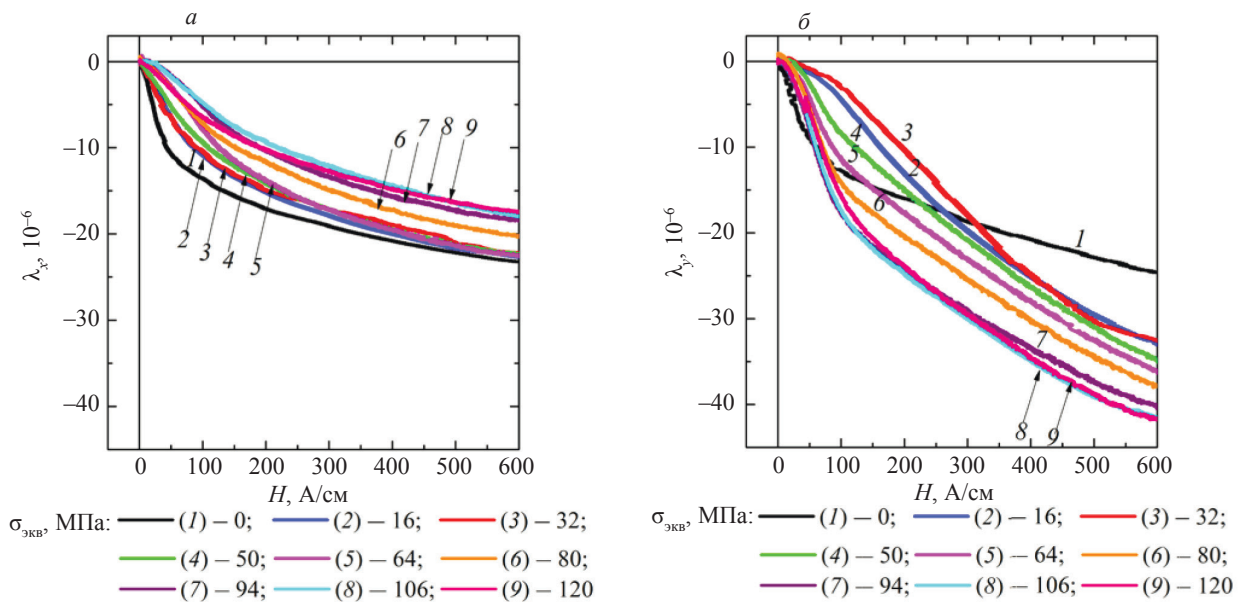


Рис. 11. Полевые зависимости магнитострикций λ_x (а) и λ_y (б) при различных величинах эквивалентных напряжений. Угол α равен 90° .

В максимально приложенном поле, как можно видеть из рис. 11, с ростом нагрузки, абсолютные значения λ_x уменьшаются, а абсолютные значения λ_y возрастают. Поведение λ_x в рассматриваемом нами примере (ориентация намагничивающего поля — вдоль оси y) характерно для продольной

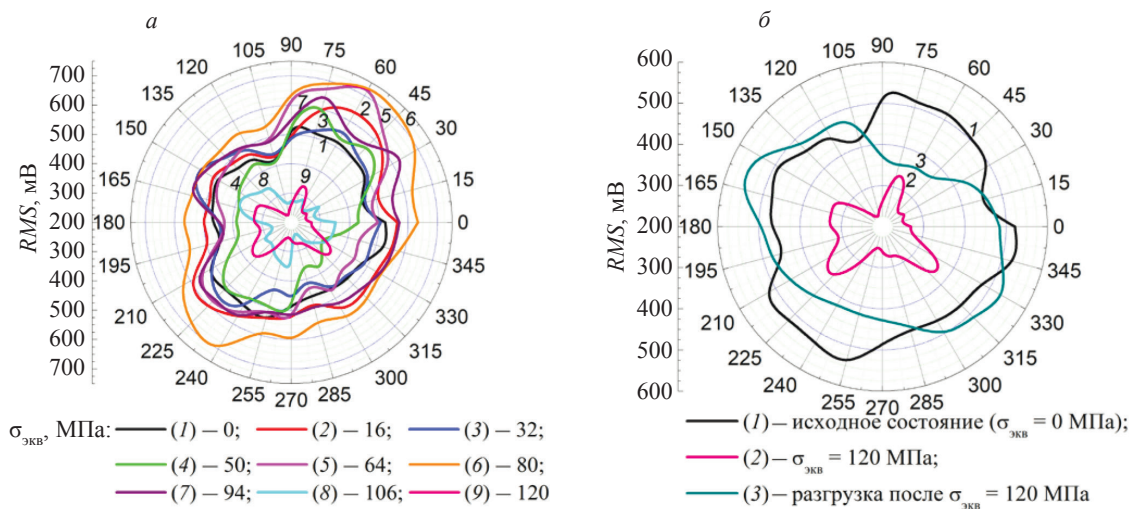


Рис. 12. Полярные диаграммы среднеквадратичных значений напряжения магнитных шумов Баркгаузена образца при упругопластическом двухосном симметричном растяжении: при различных величинах эквивалентных напряжений (а); в исходном состоянии, при максимальной растягивающей нагрузке и после снятия нагрузки (б).

магнитострикции никеля при одноосном сжатии, действующем в том же, продольном направлении, а поведение λ_y соответствует поведению продольной магнитострикции никеля при одноосном растяжении в продольном направлении.

3. Влияние симметричного двухосного растяжения на магнитные и электромагнитные характеристики при перемагничивании в переменном поле

Полярные диаграммы среднеквадратичных значений напряжений магнитных шумов Баркгаузена RMS и значений числа скачков Баркгаузена N в никелевом образце, полученные в условиях симметричного двухосного растяжения, а также после пластической деформации, приведены на рис. 12 и 13. Как видно из рис. 12 и 13, параметр RMS с ростом эквивалентных напряжений демонстрирует противоположный по сравнению с коэрцитивной силой характер изменения, в то время как параметр N при увеличении нагрузки качественно ведет себя так же, как и коэрцитивная сила: в упругой области деформаций значения N убывают, при переходе в область пластической деформации — увеличиваются. Исходная текстура в значительной степени отражается на параметре N : диаграммы имеют не округлую, а крестообразную форму под углом 45° .

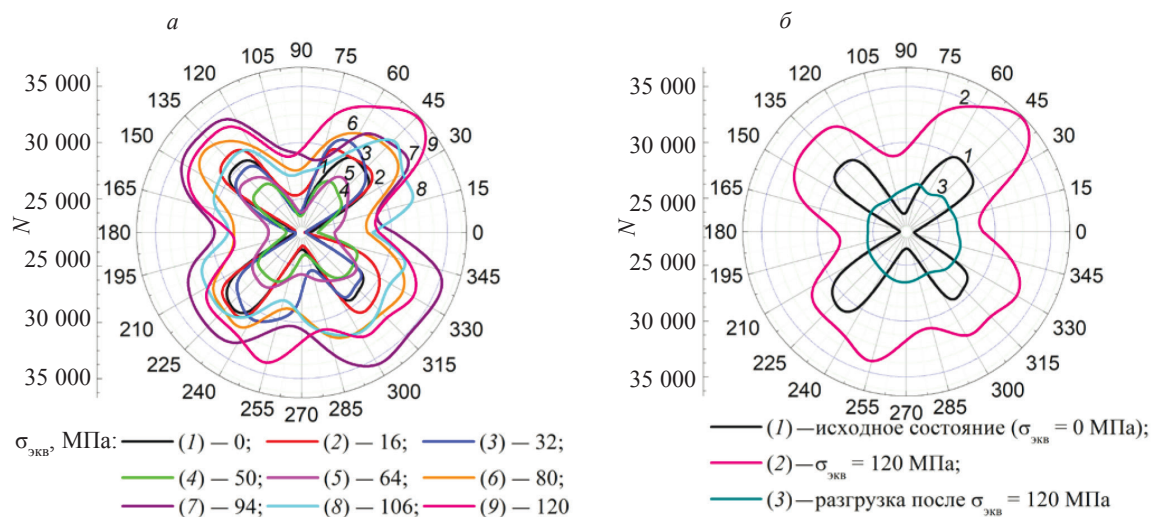


Рис. 13. Полярные диаграммы числа скачков Баркгаузена образца при упругопластическом двухосном симметричном растяжении: при различных величинах эквивалентных напряжений (а); в исходном состоянии, при максимальной растягивающей нагрузке и после снятия нагрузки (б).

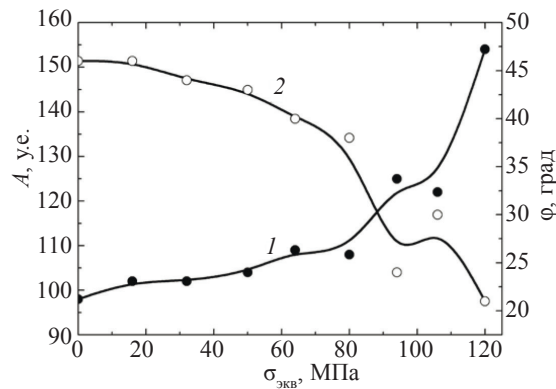


Рис. 14. Зависимости амплитуды (кривая 1) и фазового угла (кривая 2) вихретокового сигнала никелевого образца от приложенных напряжений на частоте возбуждения электромагнитного поля 10 кГц.

Анализ закономерностей изменения показаний вихретокового прибора в условиях симметричного двухосного растяжения никелевого образца показал следующее. Значимые изменения амплитуды вихретокового сигнала A и величины фазового угла ϕ с увеличением нагрузки происходили при измерениях на частоте 10 кГц, при более высокой частоте перемагничивания 50 кГц амплитуда вихретокового сигнала и фазовый угол с ростом нагрузки практически не реагировали на ее изменение при деформировании. Результаты измерений на частоте 10 кГц приведены на рис. 14. Как видно из рисунка, амплитуда вихретокового сигнала A во всем интервале исследованных деформаций монотонно возрастает почти в 1,6 раза, а фазовый угол ϕ монотонно уменьшается более чем в 2 раза. При этом как для фазового угла ϕ , так и для амплитуды вихретокового сигнала A наибольшая интенсивность изменения с ростом эквивалентных напряжений начинается от 80 МПа. Наблюдаемые однозначные изменения амплитуды и фазового угла вихретокового сигнала от степени деформации на частоте 10 кГц обуславливают применимость вихретоковой диагностики деформированного состояния никеля в условиях симметричного двухосного растяжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено конечноэлементное моделирование напряженно-деформированного состояния никеля при двухосном симметричном растяжении. Установлено, что для плоского крестообразного образца, в центральной части которого толщина уменьшена и на которой предполагается монтаж устройств для измерения физических свойств, при симметричном двухосном растяжении эквивалентные напряжения по Мизесу распределены равномерно.

Микроструктурные исследования показали, что в результате пластического двухосного растяжения внутризеренная структура никеля становится более совершенной, размер зерен увеличивается, что можно объяснить протеканием в материале динамической рекристаллизации. В исходном отожженном состоянии для исследованного материала характерна текстура типа $\{112\}\langle 111 \rangle$, что соответствует одному из типов текстуры прокатки ГЦК-металлов, а после пластического деформирования двухосным растяжением — комбинированная текстура $\{110\}\langle 112 \rangle + \{110\}\langle 335 \rangle + \{110\}\langle 216 \rangle$. Такая смена типа текстуры также может являться признаком прошедшей при деформировании динамической рекристаллизации.

Установлена однозначная корреляционная связь коэрцитивной силы с эквивалентными напряжениями в области пластической деформации. В то же время для таких измеренных параметров, как максимальная магнитная проницаемость, максимум дифференциальной магнитной проницаемости, а также амплитуда и фазовый угол вихретокового сигнала, определенного на частоте 10 кГц, монотонные зависимости от эквивалентных напряжений наблюдаются как при упругой, так и при пластической деформации, но только при любом фиксированном азимутальном угле полярной диаграммы.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России по темам № АААА-А18-118020790148-1 и «Диагностика» № 122021000030-1. При выполнении работы было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chen H.-E., Xie S., Chen Z., Takagi T., Uchimoto T., Yoshihara K.* Quantitative nondestructive evaluation of plastic deformation in carbon steel based on electromagnetic methods // *Materials Transactions*. 2014. V. 55. Is. 12. P. 1806—1815.
2. *Roskosz M., Fryczowski K.* Magnetic methods of characterization of active stresses in steel elements // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. V. 499. Art. no. 166272.
3. *Perevertov O.* Influence of the applied elastic tensile and compressive stress on the hysteresis curves of Fe-3%Si non-oriented steel // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. V. 428. P. 223—228. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.12.040
4. *Костин В.Н., Василенко О.Н., Филатенков Д.Ю., Чекасова Ю.А., Сербин Е.Д.* Магнитные и магнитоакустические параметры контроля напряженно-деформированного состояния углеродистых сталей, подвергнутых холодной пластической деформации и отжигу // *Дефектоскопия*. 2015. № 10. С. 33—41.
5. *Leuning N., Steentjes S., Schulte M., Bleck W., Hameyer K.* Effect of elastic and plastic tensile mechanical loading on the magnetic properties of NGO electrical steel // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2016. V. 417. P. 42—48. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.05.049
6. *Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Куликов В.А.* Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов // *Дефектоскопия*. 2016. № 7. С. 12—20.
7. *Gur C.H.* Review of residual stress measurement by magnetic Barkhausen noise technique // *Materials Performance and Characterization*. 2018. V. 7. No. 4. P. 504—525.
8. *Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М., Путилова Е.А., Мушников А.Н., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х.* Особенности поведения магнитных и акустических характеристик горячекатаной стали 08Г2Б при циклическом нагружении // *Дефектоскопия*. 2019. Т. 55. № 11. С. 21—31.
9. *Gorkunov E.S., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Mushnikov A.N.* The Effect of Cyclic Preloading on the Magnetic Behavior of the Hot-Rolled 08G2B Steel Under Elastic Uniaxial Tension // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2021. V. 32. No. 6. P. 276—294. DOI: 10.1080/09349847.2021.2002487
10. *Povolotskaya A.M., Mushnikov A.N.* Features of Behavior of Magnetic Properties during Elastic Deformation of 20GN Hull Steel in Various Initial Stress—Strain States // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2022. V. 58. No. 11. P. 1000—1010. [*Поволоцкая А.М., Мушников А.Н.* Особенности поведения магнитных характеристик при упругом деформировании корпусной стали 20ГН с различным исходным напряженно-деформированным состоянием // *Дефектоскопия*. 2022. № 11. С. 32—42. DOI: 10.31857/S0130308222110045]
11. *Горкунов Э.С., Мушников А.Н.* Магнитные методы оценки упругих напряжений в ферромагнитных сталях (обзор) // *Контроль. Диагностика*. 2020. № 12. С. 4—23.
12. *Агинеи Р.В., Исламов Р.Р., Мамедова Э.А.* Определение напряженно-деформированного состояния участка трубопровода под давлением по результатам измерения коэрцитивной силы // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2019. Т. 9. № 3. С. 284—294.
13. *Бердник М.М., Бердник А.Г.* Перспективы применения коэрцитиметрии для оценки параметров напряженно-деформированного состояния конструкций // *Технология машиностроения*. 2019. № 1. С. 37—43.
14. *Pearson J., Squire P.T., Maylin M.G., Gore J.G.* Biaxial stress effects on the magnetic properties of pure Iron // *IEEE Transactions on magnetics*. 2000. V. 36. Is. 5. P. 3251—3253.
15. *Новиков В.Ф., Захаров В.А., Ульянов А.И., Сорокина С.В., Кудряшов М.Е.* Влияние двухосной упругой деформации на коэрцитивную силу и локальную остаточную намагниченность конструкционных сталей // *Дефектоскопия*. 2010. № 7. С. 59—68.
16. *Захаров В.А., Ульянов А.И., Горкунов Э.С.* Коэрцитивная сила ферромагнитных сталей при двухосном симметричном растяжении материала // *Дефектоскопия*. 2011. № 6. С. 3—15.
17. *Langman R.A.* Magnetic properties of mild steel under conditions of biaxial stress // *IEEE Transactions on Magnetism*. 1990. V. 26. Is. 4. P. 1246—1251.
18. *Li Yongjian, Song Shiping, Dou Yu, Chen Tao.* Influence of tensile stress on the magnetic properties of ultra-thin grain-oriented electrical steel // *AIP Advances*. 2023. V. 13. Art. no. 025223. DOI: 10.1063/9.0000468
19. *Pearson J., Squire P.T., Maylin M.G., Gore J.G.* Biaxial stress effects on the magnetic properties of pure Iron // *IEEE Transactions on magnetics*. 2000. V. 36. Is. 5. P. 3251—3253.
20. *Vengrinovich Valeriy, Vintov Dmitriy, Prudnikov Andrew, Podugolnikov Pavel, Ryabtsev Vladimir.* Magnetic Barkhausen Effect in Steel under Biaxial Strain/Stress: Influence on Stress Measurement // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2019. V. 38. Art. no. 52. DOI: 10.1007/s10921-019-0576-7
21. *Hubert O., Maazaz Z., Taurines J., Crepinge R., van den Berg F., Celada-Casero C.* Influence of biaxial stress on magnetostriction — Experiments and modeling // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2023. V. 568. Art. no. 170389. DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.170389
22. *Kai Y., Enokizono M.* Effect of arbitrary shear stress on vector magnetic properties of non-oriented electrical steel sheets // *IEEE Transactions on magnetics*. 2017. V. 53. Is. 11. P. 2002304.

23. *Feng Shulu, Ai Zhijiu, Liu Jian, He Jiayi, Li Yukun, Peng Qifeng, Li Chengkun*. Study on Coercivity-Stress Relationship of X80 Steel under Biaxial Stress // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022. V. 2022. Art. no. 2510505. DOI: 10.1155/2022/2510505
24. *Aydin U., Rasilo P., Martin F., Belahcen A., Daniel L., Arkkio A.* Modeling of multi-axial stress dependent iron losses in electrical steel sheets // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. V. 504. Art. no. 166612.
25. *Mushnikov A.N., Zadvorkin S.M., Perunov E.N., Vyskrebencev S.V., Izmajlov R.F., Vichuzhanin D.I., Soboleva N.N., Igumnov A.S.* Experimental Facility for Studying the Physical Properties of Materials in a Plane Stress State [Electronic resource] // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2022. Is. 4. P. 50—60. DOI: 10.17804/2410-9908.2022.4.050-060
26. *Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Mushnikov A.N., Povolotskaya A.M.* Studying magnetoelastic effects in ferromagnetic structural materials / In: *Proc. of X International conference «Navy and shipbuilding nowadays NSN'2019»*, July 11—12, 2019, St. Petersburg, Russia. St. Petersburg—Moscow: Publ. of Krylov State Research Centre, 2019. P. 26—35.
27. *Белов К.П.* Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках / Изд. 2-е. М.: Гос-техиздат, 1957. 279 с.
28. *Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Смирнов С.В., Митропольская С.Ю., Вичужанин Д.И.* Взаимосвязь между параметрами напряженно-деформированного состояния и магнитными характеристиками углеродистых сталей // *ФММ*. 2007. Т. 103. № 3. С. 322—327.
29. *Бозорт Р.* Ферромагнетизм. М.: ИИЛ, 1956. 784 с.
30. *Вонсовский С.В., Шур Я.С.* Ферромагнетизм. М.—Л.: ОГИЗ, 1948. 816 с.
31. *Горкунов Э.С., Субачев Ю.В., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М.* Влияние упругой деформации на гистерезисные свойства двуслойного ферромагнетика, составленного из компонентов, обладающих магнитострикцией разных знаков // *Дефектоскопия*. 2014. № 8. С. 42—56.
32. ГОСТ Р 54093—2010. Колеса железнодорожного подвижного состава. Методы определения остаточных напряжений.
33. *Lukin N.A., Rubin L.S.* A Precision Low-Frequency Analog-to-Digital Converter for Advanced Systems of Technical Diagnostics and Nondestructive Testing // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2020. Is. 5. P. 6—16. DOI: 10.17804/2410-9908.2020.5.006-016
34. *Mises R.V.* *Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand* // *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*. 1913. P. 582—592.
35. *Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Мушников А.Н., Смирнов С.В., Якушенко Е.И.* Влияние механических напряжений на магнитные характеристики трубной стали // *Прикладная механика и техническая физика*. 2014. Т. 55. № 3 (325). С. 181—191.
36. *Глезер А.М., Метлов Л.С.* Физика мегапластической (интенсивной) деформации твердых тел // *ФТТ*. 2010. Т. 52. № 6. С. 1090—1097.
37. *Козлов Э.В., Глезер А.М., Конева Н.А., Попова Н.А., Курзина И.А.* Основы пластической деформации наноструктурных материалов / Под ред. А.М. Глезера. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. 304 с.
38. *Бородкина М.М., Спектор Э.Н.* Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов. Москва: Металлургия, 1981. 271 с.