05

Влияние текстуры стали, формируемой внешними механическими напряжениями, на магнитострикцию смещения и вращения

© Р.А. Соколов, С.М. Кулак, К.Р. Муратов

Тюменский индустриальный университет,
Тюмень, Россия
e-mail: falcon.rs@mail.ru

Поступило в Редакцию 24 марта 2026 г.
В окончательной редакции 3 августа 2026 г.
Принято к публикации 16 августа 2026 г.

Рассмотрено влияние одноосного упругого нагружения на характер полевой зависимости продольной магнитострикции низкоуглеродистой конструкционной стали. Изучено изменение формы кривых магнитострикции при растяжении и сжатии в пределах упругой области. Показано, что при растягивающих напряжениях происходит уменьшение положительной составляющей магнитострикции и смещение величины магнитострикции в область отрицательных значений, тогда как при сжатии полевая зависимость полностью смещается в область положительных значений. На основе анализа кривых выполнено разделение суммарной магнитострикции на компоненты, обусловленные смещением доменных границ и вращением векторов намагниченности. Установлено, что изменение соотношения указанных механизмов определяет трансформацию магнитной текстуры материала под действием механических напряжений. Показано, что вклад процессов смещения доменных границ обладает более высокой чувствительностью к уровню напряжения в упругой области деформаций по сравнению с вкладом вращательных процессов. Полученные результаты уточняют физическую природу магнитоупругих эффектов в конструкционных сталях и могут быть использованы при разработке методов неразрушающей оценки напряженного состояния металлических элементов.

Ключевые слова: константы магнитострикции, упругая деформация, внешнее напряжение, механическое сжатие, механическое растяжение, магнитоупругая энергия, доменная структура.

DOI: 10.61011/JTF.2027.01.64180.78-26

Структура, химический и фазовый составы стали определяют величину константы магнитострикции (λ). Величину магнитострикции стали можно разделить на две составляющие, одна из которых положительна ($\lambda > 0$ исли λ_{100}) и пропорциональна удлинению в направлении [100], вторая отрицательна ($\lambda < 0$ или λ_{111}), связанная с деформацией в направлении [111]. Компонента ($\lambda > 0$) зависит от пространственного распределения магнитных фаз в материале, т.е. формируемой магнитной текстуры. Ее величина даже для одной марки стали может варьироваться в широких пределах [1–4].

Напряжения в упругой области деформаций σ, действующие на материал, влияют на магнитоупругую чувствительность коэрцитивной силы ($\Delta H_c/\Delta\sigma$) и остаточной намагниченности ($\Delta M_r/\Delta\sigma$) стали [5–7], а также приводят к изменению величины его магнитострикции [8–12]. Кроме того, необратимые изменения, вызванные пластической деформацией [5,13] и усталостными деградациями [5,13–16], также сказываются на величине магнитострикции.

Величина магнитострикции ($\lambda > 0$, $\lambda < 0$) определяет магнитоупругую энергию и энергию кристаллографической анизотропии $W_a \sim 3/2\lambda_{111}\sigma$ стали, а, следовательно, обусловливает характер магнитоупругих явлений, приводящих к изменению магнитных параметров материала при упругих деформациях [6]:

$$W_{me} = -3/2 \cdot \lambda_s \sigma \cos^2 \varphi,$$

где $\lambda_s = 2/5\lambda_{100} + 3/5\lambda_{111}$ — магнитострикция участка насыщения полевой зависимости.

Знак магнитострикции влияет на внутренние напряжения в материале, возникающие при намагничивании. Например, для Ni с отрицательной магнитострикцией намагничивание во внешнем магнитном поле приводит к возникновению внутренних напряжений сжатия. Растяжение же уменьшает его намагниченность.

Сложная природа взаимосвязи магнитострикции и магнитных параметров ферромагнитных материалов, учитываемых в их магнитном структурном анализе, а также ее высокая чувствительность к напряжениям в упругой области деформации, требуют всестороннего изучения этого явления на сталях разных классов, структур, фазового и напряженного состояний. Существующие методики измерения магнитострикции сталей являются прецизионными, чувствительными и трудоемкими, поэтому ее исследования актуальны.

Магнитострикционный эффект в сталях исследуют и в том числе при изучении в них явлений магнитоупругости, необходимых при разработке и создании новых методов и способов неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) стальных конструкций. Однако результаты оценки энергетического состояния низкоуглеродистых сталей на основе результатов полевых измерений магнитострикции не совсем точны. Это связано с тем, что регистрируемая

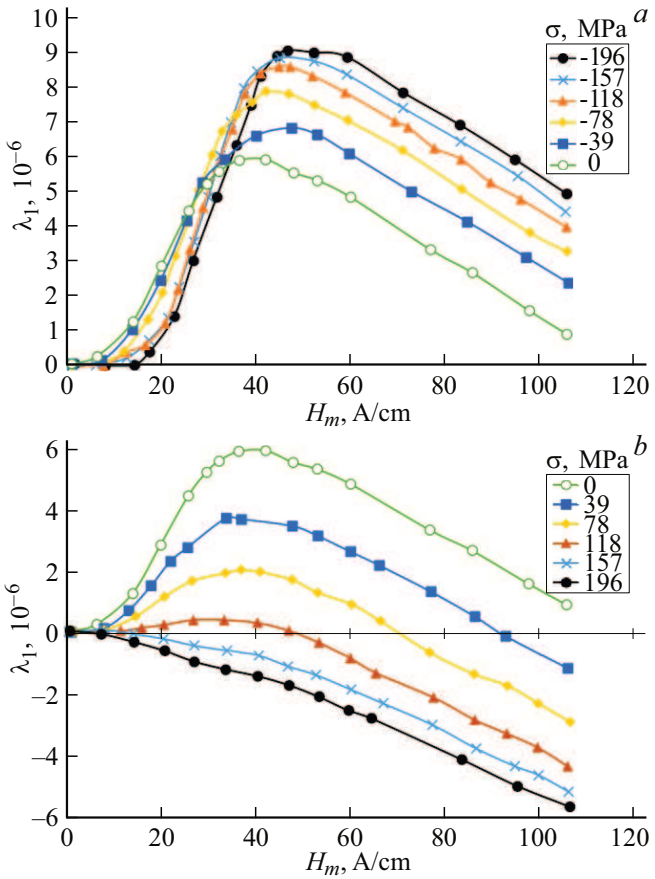


Рис. 1. Полевая зависимость магнитострикции стали Ст3сп, испытывающей напряжения сжатия (a) и растяжения (b) различной величины (0, 39(■); 78(♦); 117(▲); 157(—); 196(●) MPa).

величина магнитострикции или ее полевая зависимость по своей сути представляет собой разницу между двумя конкурирующими между собой компонентами магнитострикции: $\lambda > 0$ и $\lambda < 0$ [4,5,17]. Если при определенном значении внешнего магнитного поля обе компоненты магнитострикции будут равны по абсолютной величине, то на экспериментальной зависимости $\lambda = f(H)$ их результирующая величина окажется равной нулю. Это можно наблюдать на экспериментальных кривых (рис. 1, b), из которых видно, что величина магнитострикции пересекает нулевое значение, которое соответствует равенству абсолютных величин положительной и отрицательной компонент магнитострикции. Величина магнитоупругой энергии $W_{me} \sim \lambda_s$ не обязательно должна быть равна нулю.

Теоретическое разделение магнитострикции на две компоненты представлено в работе [4]. В [5] для получения магнитострикции смещения и магнитострикции вращения профессором Новиковым В.Ф. был предложен графический подход. Этот метод позволяет более точно определить магнитоупругие свойства материала и объяснить наблюдаемые магнитоупругие явления. В работе [17] для подобного разделения использовалась аппроксимирующая функция Ланжевена. Важно понимать, что величина магнитострикции и вид ее полевой зависимости могут изменяться в зависимости от условий эксперимента и характеристик материала. Поэтому для точного объяснения магнитоупругих явлений необходимо учитывать все факторы, влияющие на эти параметры, например, напряженное состояние ферромагнитной стали. Поскольку в сталях магнитострикционные явления обратны магнитоупругому эффекту, то необходимо изучение влияния всех механизмов перестройки их доменной структуры (смещение, вращение) при намагничивании на форму и количественные характеристики экспериментальной кривой магнитострикции и гистерезиса.

Таким образом, разделение магнитострикции на составляющие позволяет более глубоко изучить механизмы магнитоупругости и использовать полученные знания для разработки новых материалов и устройств для контроля НДС стальных конструкций.

Магнитоупругий эффект обусловлен тем, что упругие деформации создают специфическую доменную структуру (магнитную текстуру), которая влияет на процессы намагничивания и перемагничивания в ферромагнитных материалах [7,9,11,15,17,18]. Этот эффект возникает из-за перестройки доменной структуры под действием механических напряжений и определяет характер изменения магнитострикции. Поэтому для изучения поведения доменной структуры стали при силовом воздействии необходимо исследовать связь гистерезисных свойств материала с его магнитострикционными характеристиками и НДС [19].

Целью настоящей работы было определение влияния растягивающих и сжимающих напряжений на положительную и отрицательную компоненты магнитострикции конструкционной стали Ст3сп.

Сталь Ст3сп относится к углеродистым конструкционным сталям общего назначения. Содержание углерода 0.14 %–0.22 %, предел текучести не менее 245 MPa.

В настоящей работе проведены исследования полевых зависимостей продольной магнитострикции стали Ст3сп при действии сжимающих и растягивающих напряжений, полученных авторами [20] (рис. 1). Полевая зависимость продольной магнитострикции имеет начальный положительный участок, обусловленный удлинением в направлении [100] при движении 90° доменных границ, и отрицательные значения в больших полях, связанные с отрицательной магнитострикцией в направлении [111], увеличивающейся (по модулю) за счет процессов вращения.

Без внешней нагрузки стали Ст3сп при увеличении внешнего магнитного поля до $H_m \sim 42$ A/cm полевая зависимость $\lambda_{\exp} = f(H)$ стремится к положительному экстремуму, равному $\lambda_m \sim 6 \cdot 10^{-6}$, а при следующем трехкратном увеличении H_m пересекает ось абсцисс и затем заходит в отрицательную полуплоскость, насыщаясь до значения λ_s во внешнем магнитном поле $H \gg H_m$. (рис. 2).

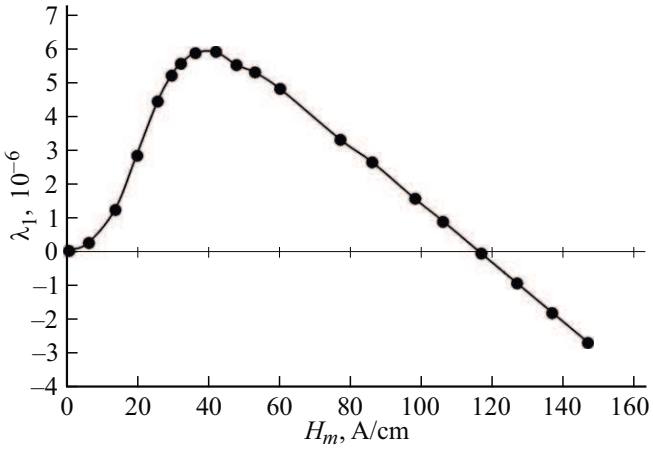


Рис. 2. Полевая зависимость магнитострикции λ стали Ст3сп при отсутствии внешних нагрузок.

Механическое растяжение стали Ст3сп до $\sigma = 157$ MPa сопровождается убылью λ_m до нуля и ростом по абсолютной величине λ_s до $-4.5 \cdot 10^{-6}$. Величина внешнего поля H_m, соответствующая λ_m, также уменьшается в 1.4 раза по сравнению с ненагруженным состоянием до 30 A/cm. Дальнейшее увеличение σ до 200 MPa вызывает только рост λ с противоположным знаком.

Деформация стали Ст3сп осевым растяжением приводит к трансформации доменной текстуры от состояния, близкого к „легкой оси“, к состоянию, близкому к „легкой плоскости“, когда преобладают 180-градусные доменные границы, и процессы вращения магнитных моментов, и определяющее значение имеет отрицательная компонента магнитострикции.

При деформации стали растяжением [21] ее магнитное состояние соответствует сонаправленности спонтанной намагниченности доменов с осью нагружения. Поэтому, как видно из рис. 1, экспериментальная кривая $\lambda_{\text{exp}} = f(H)$ стали Ст3сп при большем растяжении пересекает ось абсцисс ближе к ее началу.

На начальном этапе растяжения формируется „легкая ось“, когда вектора спонтанной намагниченности доменов стремятся к одной из осей легкого намагничивания, с наименьшей проекцией на ось растяжения. Материал с такой текстурой легче намагничивается и перемагничивается вдоль оси нагружения. Дальнейшее растяжение стали Ст3сп приводит к смене знака магнитострикции на отрицательный, что характерно процессам образования текстуры „легкая плоскость“, когда векторам спонтанной намагниченности энергетически легче ориентироваться в плоскости, перпендикулярной оси растяжения, и по отношению к направлению внешнего магнитного поля, что препятствует процессу намагничивания [19].

При сжатии стали до уровня 200 MPa отмечается увеличение значений λ_m и λ_s в положительной области до показателей $8.7 \cdot 10^{-6}$ и $5 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Закономерный рост компонент λ_m и λ_s магнитострикции при указанной смене знака напряжений объясняется преобладанием процессов смещения над процессами вращения.

Экспериментальная кривая магнитострикции при сжатии образца носит совершенно иной характер. При любом значении напряженности магнитного поля λ будет положительной. С ростом уровня сжимающих напряжений увеличивается площадь положительного участка полевой зависимости магнитострикции и возрастает величина ее максимума.

Рост максимального значения магнитострикции и площади положительного участка кривой $\lambda(H)$ при сжатии свидетельствует о перестройке доменной структуры под действием приложенных сжимающих напряжений, при которой домены с намагниченностью, перпендикулярной оси нагружения, увеличиваются в объеме за счет уменьшения доменов с параллельной ориентацией. Это приводит к возрастанию положительной компоненты магнитострикции.

В отличие от этапа растяжения образцов, при сжатии стали Ст3сп максимум λ_m установлен при вариативном изменении внешнего поля H_m в более узком диапазоне 42–45 A/cm. Очевидно, что количественные показатели описанных изменений магнитострикции для сталей разного химического и фазового составов, структуры, условий термообработки и т. д. при их механическом нагружении будут иметь разные значения. Немонотонный характер изменения коэрцитивной силы H_c, остаточной индукции B_r, проницаемости μ сталей Ст3, стали 45, технического железа от уровня напряжений растяжения и сжатия, установленный в работах [9,10,18], свидетельствует и о зависимости от них магнитоупругой чувствительности основных магнитных параметров НДС к упругим напряжениям. Поэтому в рамках разработки магнитных методов контроля напряженно-деформированного состояния стальных конструкций вызывает интерес изучение вклада каждой из составляющих магнитострикции в величину магнитоупругой чувствительности магнитных параметров стали к упругим напряжениям.

Дифференциация механизмов изменения намагниченности материала позволяет разделить экспериментальную зависимость $\lambda_{\text{exp}} = f(H)$ на отрицательную λ_{111} и положительную λ_{100} компоненты, связанные с разными механизмами перестройки доменной структуры стали во внешнем магнитном поле.

Из работ [1,2] известна формула для определения магнитострикции насыщения изотропного поликристаллического железа λ_s (1).

$$\lambda_s = \left(\frac{2}{5} \cdot \lambda_{100} + \frac{3}{5} \cdot \lambda_{111}\right), \qquad (1)$$

где λ_{100}, λ_{111} — константы магнитострикции в кристаллографических направлениях [100] и [111].

Так как для железа величина λ_{111} имеет отрицательное значение, то величина λ_s представляет собой разность величин двух компонент (рис. 3).

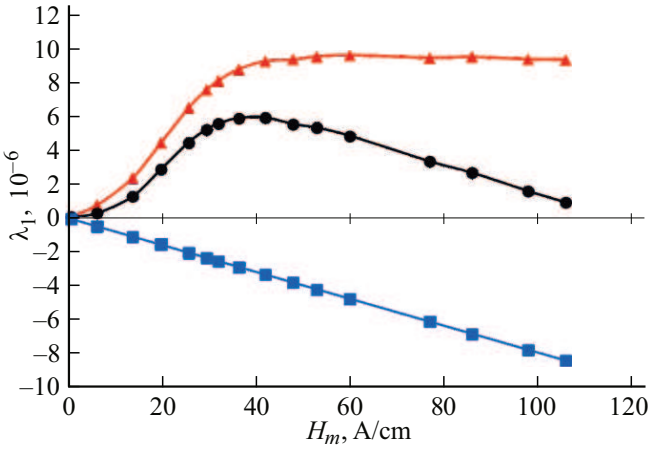


Рис. 3. Разложение полевой зависимости магнитострикции $\lambda(H)$ (●) стали Ст3сп на компоненты λ_{100} (▲) и λ_{111} (■) в механически ненагруженном состоянии.

Авторами работы [5] экспериментальная кривая $\lambda_{\text{exp}} = f(H)$ представлена суперпозицией двух функций: магнитострикция смещения (далее — λ_{disp}), обусловленная смещением 90-градусных доменных границ, описывающая положительный рост объема доменов стали с магнитными моментами наиболее благоприятно ориентированными к оси легкого намагничивания [100] , и магнитострикция вращения (далее — λ_{rot}), учитывающая разворот магнитных моментов доменов от направления [100] к направлению внешнего магнитного поля и имеющая отрицательное значение:

$$\lambda_{\text{exp}}(H) = \lambda_{disp}(\lambda_{100}) + \lambda_{\text{rot}}(\lambda_{111}), \qquad (2)$$

где λ_{disp} и λ_{rot} — положительная и отрицательная слагаемые магнитострикции, пропорциональные соответственно λ_{100} и λ_{111}.

Изменяющиеся объемы областей спонтанной намагниченности стали в условиях внешнего нагружения влияют на константы магнитострикции λ_{100} и определяют величину коэрцитивной силы, остаточной намагниченности и магнитоупругого эффекта.

Перестройка доменной структуры из состояния с преимущественной ориентацией доменов вдоль оси нагружения (продольная) в состояние с преимущественной ориентацией доменов перпендикулярно оси нагружения (поперечная) в процессе нагружения, происходящая из-за смещения 90-градусных соседств, приводит к изменению величины λ_{disp}. При этом поворот (вращение) векторов спонтанной намагниченности от направления легких осей $\langle 100 \rangle$ до направления в плоскости, перпендикулярной оси нагружения и внешнего магнитного поля влияет на величину λ_{rot}. Как отмечено в [17], намагничивание низкоуглеродистых сталей в магнитных полях $H > H_c$ приводит к насыщению смещения междоменных границ. Поэтому основные изменения результирующей величины λ_{exp} будут происходить только из-за изменения величины λ_{disp}.

На рис. 4 представлены зависимости λ_{disp} (рис. 4, *a*, *b*) и λ_{rot} (рис. 4, *c*, *d*) стали Ст3сп от напряжений ее сжатия ($\sigma < 0$) и растяжения ($\sigma > 0$) соответственно. Рассмотрим отдельно участки, связанные с процессом сжатия и растяжения.

Из рис. 4 видно, что для диапазона напряжений от -200 до 200 MPa наибольшие изменения претерпевает $\lambda_{disp}(H)$. При сжатии стали до $\sigma \sim 200$ MPa происходит увеличение этой составляющей в 1.4 раза, а при растяжении того же уровня σ происходит ее уменьшение почти в 6.5 раз. Для λ_{rot} наблюдаются схожие закономерные изменения, но в гораздо меньшем диапазоне (см. таблицу). В диапазоне нагрузок от -196 до 196 MPa λ_{rot} уменьшается в 1.2 раза, а λ_{disp} в 9.2 раза.

Так как в процессе растяжения или сжатия формируется ориентированная магнитная текстура, связанная, в том числе и с текстурой материала, назовем данный параметр „текстурной чувствительностью“ магнитострикции λ/σ (Pa^{-1}).

Текстурная чувствительность магнитострикции λ_{rot} при изменении типа нагружения от сжатия к растяжению увеличивается в 4.7 раза, а для λ_{disp} в 2.2 раза.

Характер наблюдаемых закономерностей изменения компонент λ_{disp} и λ_{rot} магнитострикции, а также их „текстурной чувствительности“ определяется взаимосвязью магнитоупругих и магнитострикционных свойств ферромагнитных сталей.

В исходном состоянии стали намагниченность доменов естественным образом может ориентироваться параллельно или антипараллельно осям легкого намагничивания ([100], [010] или [001]). Минимум свободной энергии магнитной кристаллографической анизотропии достигается, когда намагниченность направлена вдоль осей легкого намагничивания. При равномерном распределении намагниченности доменов по легким осям объем всех фаз одинаков (ферромагнетик размагничен). При деформации ферромагнетика в нем возникают механические напряжения σ, которые обусловливают магнитоупругую энергию W_{me}, пропорциональную им [2]:

$$W_{me} = -\frac{3}{2}\lambda_s \sigma \cos^2 \varphi,$$

где λ_s — величина магнитострикции насыщения; σ — механические напряжения в стали; φ —- угол между спонтанной намагниченностью доменов ферромагнетика (направлением намагниченности) и линией прикладываемых нагрузок.

Когда к материалу прикладывают растягивающие механические напряжения σ, размер некоторых магнитных доменов увеличивается, а размер других уменьшается. В результате формируется магнитная текстура с преимущественным направлением магнитных моментов доменов вдоль оси создаваемых напряжений, чтобы достичь минимума энергии W_{me}.

Если на сталь оказывается сжимающее воздействие $\sigma < 0$ вдоль оси последующего намагничивания, магнитные моменты P_m его доменов стремятся изменить

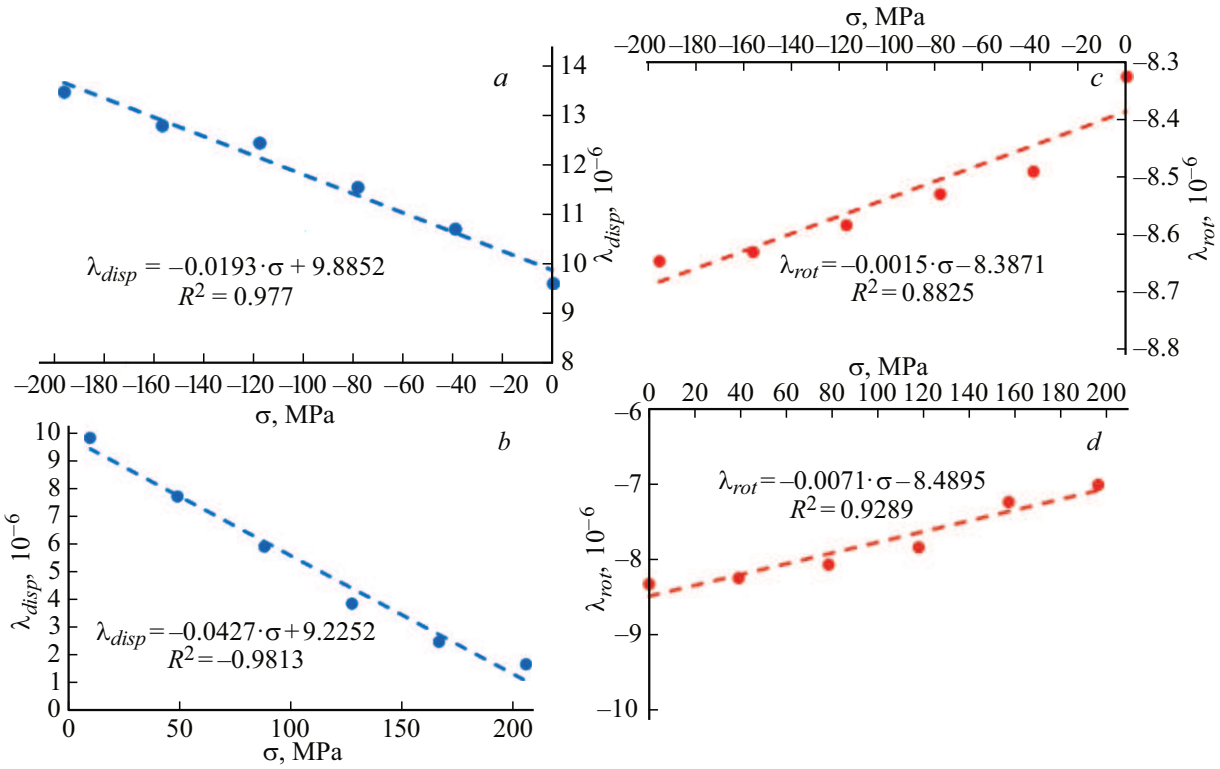


Рис. 4. Зависимость составляющих магнитострикции λ_{disp} (a, b) и λ_{rot} (c, d) стали Ст3сп от напряжений растяжения $(\sigma > 0)$ и сжатия $(\sigma < 0)$.

Относительное изменение компонент магнитострикции $\lambda_{disp}(H) \sim \lambda_{100}$ и $\lambda_{rot}(H) \sim \lambda_{111}$ при механическом сжатии и растяжении стали Ст3сп и ее текстурная чувствительность λ/σ

λ	λ_{196}/λ_0	λ_0/λ_{196}	$\lambda_{196}/\lambda_{196}$	Текстурная чувствительность магнитострикции λ/σ, Pa^{-1}	
				Растяжение	Сжатие
λ_{rot}	1.04	1.19	1.23	0.0071	0.0015
λ_{disp}	1.40	6.55	9.18	0.0427	0.0193

свое прежнее пространственное положение максимум на $\varphi = 90°$. В таком случае магнитоупругая энергия достигает минимума своей величины.

Для стали константа магнитострикции $\lambda_{100} > 0$ и при напряжениях растяжения $(\sigma > 0)$ энергетически выгодной будет параллельная ориентация ее намагниченности и напряжений, при сжатии — ортогональная. Это означает, что 90-градусному домену при растяжении выгодно трансформироваться в 180-градусный домен.

Последующее намагничивание растянутого образца вдоль оси растяжения вызывает уменьшение магнитострикции в положительной области. Это происходит из-за уменьшения объема доменов с 90-градусным соседством. При напряжениях растяжения стали Ст3сп равных 120 MPa (рис. 1), при которых объем доменов с 90-градусным соседством достигает минимума, смещения 180-градусных доменных границ не будут определяющими в магнитострикционных явлениях в стали. Положительная магнитострикция $\lambda_{disp}(\lambda_{100})$ уменьшается. Дальнейшее растяжение стали приведет к росту отрицательной магнитострикции $\lambda_{\text{rot}}(\lambda_{111})$, когда начинаются процессы вращения векторов спонтанной намагниченности.

В малых полях, когда процесс намагничивания образца обусловлен смещением междоменных границ, намагниченность доменов преимущественно имеет направление, совпадающее с легкой осью, и вклад отрицательной константы λ_{111} минимальный, т.е. в целом образец испытывает растягивающие деформации $(\lambda > 0)$ вдоль оси намагничивания. В больших полях, когда ресурс смещения междоменных границ практически исчерпан, вектор намагниченности доменов преимущественно отклонен от направлений легкого намагничивания. В этом случае вклад константы λ_{111} (в рамках модели связы-

вают преимущественно с вкладом процессов вращения векторов намагниченности) становится существенным, а вклад константы λ_{100} ослабевает т. е. наблюдаются сжимающие деформации образца.

В случае $\lambda_{100} > 0$ домен с параллельной ориентацией относительно оси растяжения ($\sigma > 0$) находится в более выгодном положении ($W_{me} < 0$) по сравнению с его 90-градусным соседом ($W_{me} < 0$). Принимая во внимание механизм движения междоменных границ, параллельный оси нагружения домен будет увеличиваться в объеме за счет убыли объема ортогонального домена. В случае сжимающих напряжений в железе ($\sigma < 0$) возникает обратная ситуация — домены с намагниченностью, параллельной оси нагружения уменьшаются; домены с намагниченностью, перпендикулярной оси нагружения, растут.

Наблюдаемый эффект подтверждается результатами, полученными авторами [4], которые установили, что с ростом растяжения железа до 300 MPa положительная магнитострикция λ_{disp} убывает по экспоненциальному закону.

Изменения положительной λ_{disp} и отрицательной λ_{rot} магнитострикции определяют размер и форму петли магнитного гистерезиса [9,10,18].

При действии внешних нагрузок на материал, находящийся в магнитном поле, изменение формы петли магнитного гистерезиса в области, в которой происходят процессы смещения и вращения векторов намагниченности обусловлено наличием магнитоупругого эффекта или механострикции. Этот эффект обусловлен искажением кристаллической структуры под действием нагрузок, в результате чего одна из трех осей легкого намагничивания железа может стать более выгодной (или наоборот, менее) по сравнению с двумя другими, что приводит к изменению намагниченности магнетика. Данный процесс является обратимым.

Заключение

1. Установлено, что при одноосном растяжении конструкционной стали Ст3сп до напряжений порядка 120 MPa полевая зависимость продольной магнитострикции имеет как положительную, так и отрицательную области. Площадь под кривой магнитострикции в области положительных значений и величина внешнего магнитного поля, соответствующая максимальному положительному значению λ_{exp}, убывают по мере роста напряжений, что связано со снижением вклада процессов смещения 90-градусных доменных границ в магнитострикционные явления и уменьшением положительной компоненты магнитострикции.

2. Показано, что при напряжениях растяжения, превышающих 120 MPa, величина магнитострикции становится преимущественно отрицательной, что связано с изменением магнитной текстуры стали от состояния, близкого к „легкой оси“, к состоянию, близкому к „легкой плоскости“ и доминированием процессов вращения векторов спонтанной намагниченности.

3. Установлено, что при сжимающих напряжениях до 200 MPa полевая зависимость магнитострикции стали Ст3сп полностью располагается в области положительных значений, при этом возрастают как максимальное значение магнитострикции, так и площадь положительного участка кривой $\lambda(H)$. Данный эффект обусловлен преобладанием процессов смещения междоменных границ и формированием магнитной текстуры, благоприятной для намагничивания вдоль оси нагружения.

4. Выполнено разделение экспериментальных кривых магнитострикции на положительную компоненту, связанную со смещением доменных границ, и отрицательную компоненту, обусловленную вращением магнитных моментов доменов. Показано, что изменение суммарной магнитострикции при упругом нагружении определяется не только величиной этих компонент, но и их относительным вкладом, зависящим от характера напряженного состояния.

5. Установлено, что чувствительность магнитострикции смещения к упругим напряжениям более чем в два раза превышает аналогичную чувствительность магнитострикции вращения. Введенный параметр „текстурная чувствительность магнитострикции“ количественно характеризует влияние механических напряжений на формирование магнитной текстуры и может быть использован для оценки вклада различных механизмов намагничивания.

6. Выделение компонент магнитострикции стали и оценка их „текстурной чувствительности“ позволит более точно определять магнитоупругую чувствительность коэрцитивной силы и остаточной намагниченности сталей к напряжениям в упругой области деформаций, повышая эффективность магнитоупругих методов контроля напряженно-деформированного состояния стальных конструкций.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Н.С. Акулов. *Ферромагнетизм* (Государственное изд-во технико-теоретической лит-ры, М.–Л., 1939)
[2] С.В. Вонсовский, Я.С. Шур. *Ферромагнетизм* (ГИТТЛ, М.–Л., 1948)
[3] Р. Бозорт. *Ферромагнетизм* (ГИТТЛ, М., 1956)
[4] M. Takagi. Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ., **28**, P. 85 (1939).
[5] В.Ф. Новиков, М.С. Бахарев. *Магнитная диагностика механических напряжений в ферромагнетиках* (Вектор Бук, Тюмень, 2001)
[6] Р.В. Загидулин, Т.Р. Загидулин, К.О. Осипов. Заводская лаборатория. Диагностика материалов, **84** (7), 55 (2018).

[7] А.Н. Мушников. *Влияние объемного напряженного состояния на магнитные характеристики конструкционных сталей* (Дисс. канд. техн. наук, Екатеринбург, 2021)
[8] Г.И. Деордиев, Т.Х. Бикташев. Дефектоскопия, 3, 82 (1977).
[9] Э.С. Горкунов, Ю.В. Субачев, А.М. Поволоцкая, С.М. Задворкин. Дефектоскопия, 10, 40 (2013).
[10] Э.С. Горкунов, А.М. Поволоцкая, К.Е. Соловьев, С.М. Задворкин. Дефектоскопия, 9, 17 (2010).
[11] Э.С. Горкунов, А.Н. Мушников. Контроль. Диагностика, 12, 4 (2020).
[12] Е.Д. Сербин, В.Н. Костин. Дефектоскопия, 5, 31 (2019).
[13] В.Ф. Новиков, Н.К. Кострюкова, В.В. Нассонов, Б.В. Федоров, О.И. Рыбникова. Дефектоскопия, 7, 105 (1995).
[14] В.Ф. Новиков, В.Ф. Тихонов. Проблемы прочности, 5, 13 (1981).
[15] Э.С. Горкунов, А.М. Поволоцкая, С.М. Задворкин, Е.А. Путилова, А.Н. Мушников, Е.Г. Базулин, А.Х. Вопилкин. Дефектоскопия, 11, 21 (2019).
[16] В.Ф. Новиков, Т.А. Яценко, М.С. Бахарев. Известия вузов. Нефть и газ, 4, 96 (1998).
[17] V.F. Novikov, K.R. Muratov, S.M. Kulak, A.S. Parakhin, R.A. Sokolov. Diagnostics, Resource Mechan. Mater. Structures, 5, 6 (2021).
DOI: 10.17804/2410-9908.2021.5.006-014
[18] В.Н. Костин, Т.П. Царькова, А.П. Ничипурук, В.Е. Лоскутов, В.В. Лопатин, К.В. Костин. Дефектоскопия, 11, 54 (2009).
[19] А.М. Поволоцкая, А.Н. Мушников. Дефектоскопия, 11, 32 (2022).
[20] Г.И. Деордиев, Т.Х. Бикташев. Дефектоскопия, 3, 83 (1977).
[21] Ф.Е. Дунаев. *Процессы перемагничивания ферромагнетиков*: учебн. пособие (УрГУ, Свердловск, 1979)