

DOI: 10.18721/JEST.27308

УДК 620.179.14

*А.М. Поволоцкая, С.М. Задворкин,  
Е.А. Путилова, А.Н. Мушников*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,  
Екатеринбург, Россия

## **ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ПРИ УПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ПОСЛЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Приведены результаты изучения влияния циклического нагружения по схеме отнулевого растяжения с амплитудой, примерно соответствующей условному пределу текучести, и последующего статического упругого растяжения вдоль того же направления на поведение магнитных характеристик низколегированной конструкционной стали 08Г2Б. Измерения магнитных характеристик образцов проводили как в условиях замкнутой магнитной цепи, так и с применением накладных преобразователей вдоль и поперек направления приложения нагрузки. Показано, что предыстория в виде циклического нагружения сказывается на закономерностях изменения магнитных параметров материала при последующем упругом деформировании вследствие остаточных сжимающих напряжений, формируемых предварительным циклическим нагружением вдоль оси нагружения. Установлен диапазон приложенных растягивающих напряжений, в котором магнитные характеристики, измеренные на образцах, подвергнутых предварительному циклическому растяжению на различное количество циклов, изменяются однозначно, что дает принципиальную возможность использования данных параметров для разработки методов оценки напряжений в изделиях из стали 08Г2Б с учетом их предыстории.

**Ключевые слова:** циклическое нагружение, упругое растяжение, магнитострикция, коэрцитивная сила, приставной датчик.

**Ссылка при цитировании:**

Поволоцкая А.М., Задворкин С.М., Путилова Е.А., Мушников А.Н. Особенности поведения магнитных характеристик образцов из низколегированной конструкционной стали при упругом деформировании после предварительного циклического нагружения // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 3. С. 86–96. DOI: 10.18721/JEST.27308

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*A.M. Povolotskaya, S.M. Zadvorkin,  
E.A. Putilova, A.N. Mushnikov*

Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Ekaterinburg, Russia

## **PECULIARITIES OF MAGNETIC BEHAVIOR OF LOW-ALLOY STRUCTURAL STEEL SPECIMENS UNDER ELASTIC DEFORMATION AFTER PRELIMINARY CYCLIC LOADING**



The paper shows results of studying the effect of zero-to-tension cyclic loading with an amplitude approximately corresponding to the conventional yield strength, and subsequent static elastic tension along the same direction on the magnetic behavior of low-alloy structural 08G2B steel. Magnetic characteristics were measured both in a closed magnetic circuit and with the use of attached transducers along and across the direction of the applied loading. The cyclic prehistory affects the magnetic behavior of the material during its subsequent elastic deformation since preliminary cyclic loading induces various compressive residual stresses along the direction of the loading. The study reveals the range of applied tensile stresses in which the magnetic characteristics measured on the specimens cyclically pretensioned with different numbers of cycles vary unambiguously. Thus, these parameters have potential application in the development of methods for evaluating stresses in 08G2B steel products in view of their history.

**Keywords:** Cyclic loading, elastic tension, magnetostriction, coercive force, attached transducer.

**Citation:**

A.M. Povolotskaya, S.M. Zadvorkin, E.A. Putilova, A.N. Mushnikov, Peculiarities of magnetic behavior of low-alloy structural steel specimens under elastic deformation after preliminary cyclic loading, Materials Science. Power Engineering, 27 (03) (2021) 86–96, DOI: 10.18721/JEST.27308

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

**Введение.** Разработка методов контроля упругих деформаций, возникающих в процессе эксплуатации изделий из ферромагнитных конструкционных материалов, является актуальной задачей. В большинстве работ, посвященных решению данной задачи, не принимается во внимание предыстория материала, в то время как текущее состояние металлоконструкций, как правило, существенно отличается от заложенного в проектной документации и при выпуске с завода-производителя. В работах [1, 2] показано, что предварительная пластическая деформация статическим растяжением образцов из конструкционной стали значительно влияет на поведение их магнитных характеристик при последующем упругом деформировании. С учетом того, что в течение своего жизненного цикла изделия подвергаются чаще всего циклическим нагрузкам [3, 4], представляет интерес исследование, аналогичное проведенными в [1, 2], но в котором предварительное деформирование осуществляется циклическим нагружением.

В настоящей работе изучено влияние предварительного отнулевого циклического растяжения на различное количество циклов конструкционной стали 08Г2Б на поведение ряда ее магнитных характеристик в условиях последующего статического упругого одноосного растяжения.

### Материалы и методики исследований

Для исследований из низколегированной конструкционной стали 08Г2Б были вырезаны плоские образцы с головками вдоль направления прокатки. Рабочая часть образцов сечением  $6 \times 34,6$  мм имела длину 100 мм. После изготовления образцы отжигали в вакууме при температуре 700 °C в течение 3 часов для минимизации внутренних напряжений, наведенных при вырезке образцов.

Предварительные механические испытания, проведенные на универсальной испытательной машине Tinius Olsen Super L60 в соответствии с ГОСТ 1497-84, показали, что для исследуемого материала условный предел текучести  $\sigma_{0,2} = 280$  МПа, временное сопротивление разрыву  $\sigma_b = 535$  МПа, относительное остаточное удлинение после разрыва  $\delta = 30\%$ .

Циклические испытания образцов проводили на сервогидравлической установке Instron 8801 по схеме отнулевого растяжения с амплитудой 300 МПа, что немного выше значения  $\sigma_{0,2}$ , с частотой 3 Гц. В результате были получены образцы после 0, 30000, 50000, 100000 и 300000 циклов нагружения.



Затем предварительно циклически деформированные образцы подвергали упругому растяжению с одновременным измерением их магнитных характеристик как в замкнутой магнитной цепи, так и с использованием приставного магнитного устройства (ПМУ).

Измерения магнитных характеристик в замкнутой магнитной цепи осуществляли вдоль оси нагружения образцов с помощью гистерезисграфа Remagraph C-500. Напряженность внутреннего магнитного поля  $H$ , измеряемая с помощью С-образного магнитного потенциалметра, достигала 500 А/см. Из петель магнитного гистерезиса определяли коэрцитивную силу  $H_c$  и остаточную магнитную индукцию  $B_r$ . По основной кривой намагничивания определяли максимальную магнитную проницаемость  $\mu_{\max}$ .

При измерениях коэрцитивной силы вдоль и поперек оси нагружения  $H_{c\parallel}$  и  $H_{c\perp}$  в качестве ПМУ использовали П-образный приставной электромагнит с сечением полюсов 18×9 мм и расстоянием между полюсами 16 мм.

Используя цифровой анализатор шумов Баркгаузена Rollscan 300, измеряли среднеквадратичные значения напряжения магнитных шумов Баркгаузена за 10 циклов перемагничивания. Сечение полюсов ПМУ анализатора Rollscan 300 составляло 3,5×8,0 мм, расстояние между полюсами – 3 мм. Частота тока перемагничивания составляла 95 Гц. Измерение среднеквадратичных значений напряжения магнитных шумов Баркгаузена осуществляли, размещая ПМУ в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль и поперек направления приложенной нагрузки.

Измерение линейной магнитострикции  $\lambda$  образцов осуществляли с помощью разработанной в ИМАШ УрО РАН многоканальной прецизионной системы сбора данных (ССД) [5], реализующей аналого-цифровое преобразование интегрирующего типа с нелинейной шкалой и позволяющей измерять малые электрические величины с малыми погрешностями. Для преобразования магнитострикции в электрические сигналы применена стандартная мостовая схема Уинстона, выполненная на тензорезисторах типа КФ5П1-10-400-А-12. Измерительные тензорезисторы были наклеены посередине рабочей части образца, а термокомпенсационные – на медную пластины, которую располагали вблизи исследуемого образца. Питание моста осуществляли постоянным стабилизированным током. Электрическая величина в виде разности потенциалов с дифференциального выхода моста поступала в один из каналов ССД, имеющей недифференциальный вход, через согласующий усилитель. Все эти решения позволили получить разрешающую способность измерительной системы порядка десятых долей миллиОма. Для регистрации полевых зависимостей магнитострикции перемагничивание и измерение внутреннего поля осуществляли посредством комплекса Remagraph C-500, описанного выше.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны зависимости полученных в условиях замкнутой магнитной цепи магнитных характеристик образцов от приложенных напряжений  $\sigma$  при упругом статическом растяжении после их предварительного циклического нагружения на различное количество циклов  $n$ . Можно отметить, что при растяжении с ростом  $n$  характер изменения магнитных характеристик для образцов с различным исходным напряженно-деформированным состоянием сохраняется: с увеличением  $\sigma$  коэрцитивная сила  $H_c$ , остаточная индукция  $B_r$  и максимальная магнитная проницаемость  $\mu_{\max}$  изменяются с образованием экстремумов.

Как видно из рис. 1, с ростом количества циклов предварительного циклического нагружения образцов наблюдаемые экстремумы смещаются в область больших напряжений статического растяжения  $\sigma$  (это более заметно выражено на зависимостях  $B_r(\sigma)$  и  $\mu_{\max}(\sigma)$ ), то есть расширяется диапазон  $\sigma$ , в котором магнитные характеристики образцов изменяются монотонно. Сдвиг экстремумов на зависимостях  $H_c(\sigma)$ ,  $B_r(\sigma)$  и  $\mu_{\max}(\sigma)$  в сторону больших значений  $\sigma$  свидетельствует об усилении остаточных напряжений сжатия с ростом количества циклов предварительного циклического нагружения.

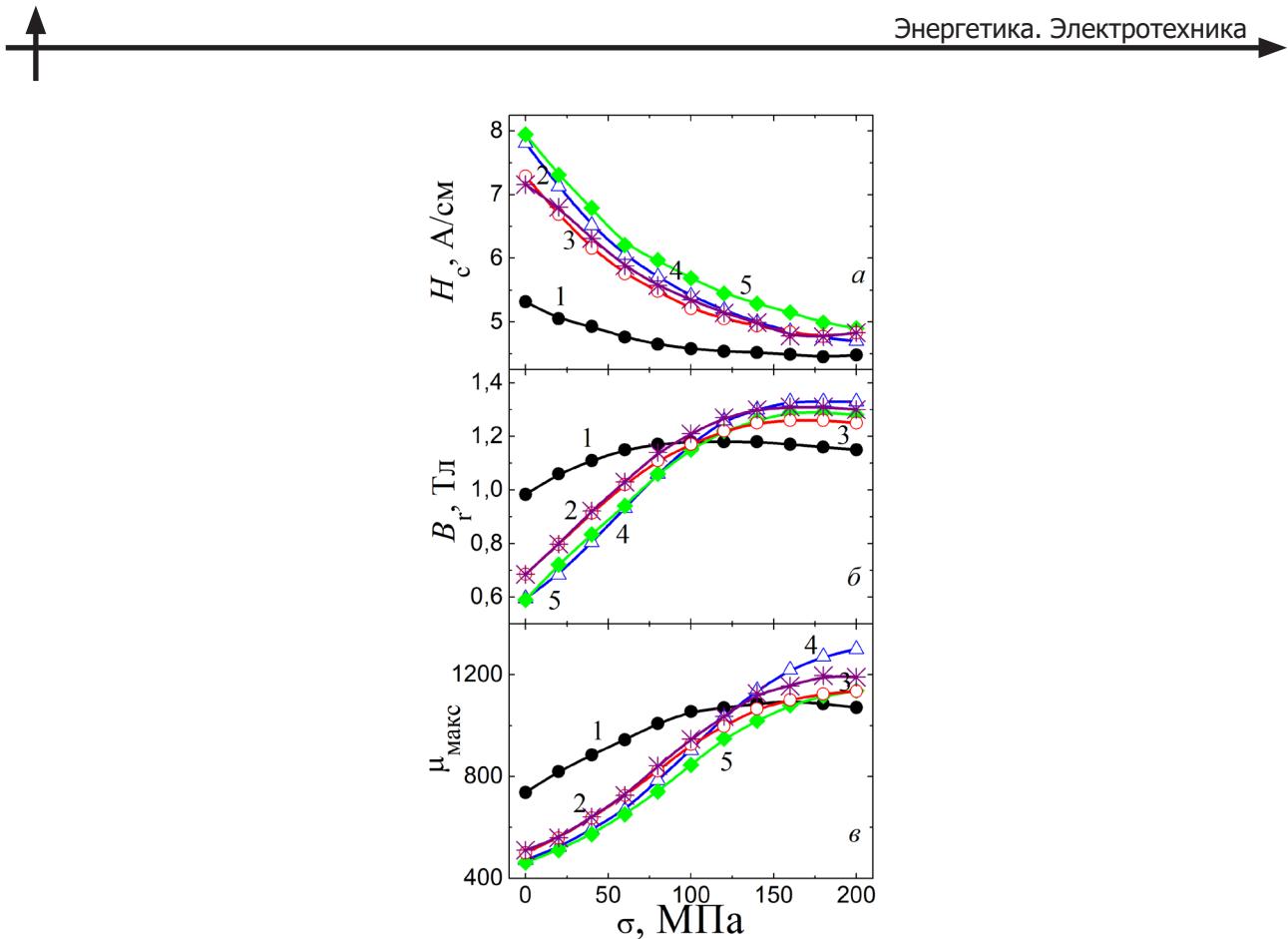


Рис. 1. Зависимости от приложенных растягивающих напряжений значений коэрцитивной силы (а), остаточной индукции (б) и максимальной магнитной проницаемости (в), измеренных в условиях замкнутой магнитной цепи на образцах, предварительно циклически деформированных на различное количество циклов: кривая 1 (•) –  $n = 0$ ; 2 (\*) – 30000; 3 (○) – 50000; 4 (Δ) – 100000; 5 (◆) – 300000 циклов

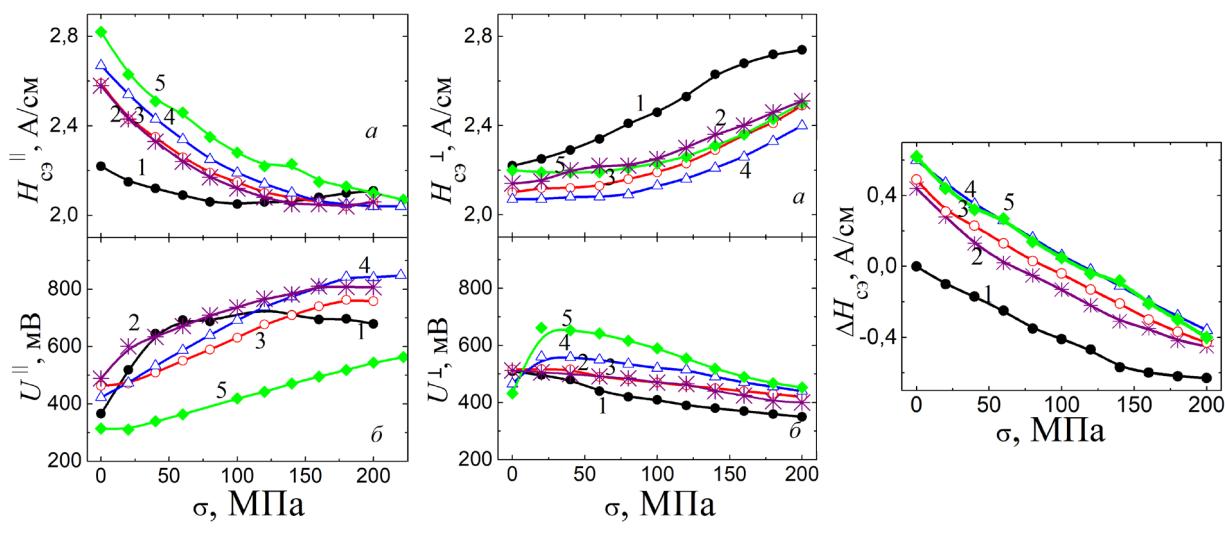
Fig. 1. Applied tensile stress dependences of coercive force (a), residual induction (b), and maximum magnetic permeability (c), all measured in a closed magnetic circuit on specimens cyclically pre-deformed with different numbers of cycles: curve 1 (•) –  $n = 0$ ; 2 (\*) – 30,000; 3 (○) – 50,000; 4 (Δ) – 100,000; 5 (◆) – 300,000 cycles

Сравнение приведенных на рис. 1 результатов с результатами работ [1, 2] показывает, что предыстория в виде предварительного циклического растяжения сказывается на закономерностях изменения магнитных параметров материала при его последующем упругом деформировании так же, как и предыстория в виде предварительной пластической деформации статическим растяжением. Это обусловлено остаточными напряжениями, вносимыми циклическим нагружением.

На рис. 2 (I, II) представлены зависимости от приложенных растягивающих напряжений значений коэрцитивной силы при квазистатическом намагничивании ( $H_{c\parallel}$  и  $H_{c\perp}$ ) и среднеквадратичных значений напряжения магнитных шумов Баркгаузена ( $U\parallel$  и  $U\perp$ ), измеренных в переменном магнитном поле частотой 95 Гц, при расположении накладных преобразователей на исследуемых образцах соответственно вдоль и поперек направления приложения нагрузки.

Из сравнения рис. 1 и 2 можно видеть качественное подобие зависимостей  $H_c(\sigma)$  и  $H_{c\parallel}(\sigma)$ , измеренных на образцах в условиях замкнутой магнитной цепи и с помощью ПМУ в продольном направлении соответственно.

Характер зависимостей коэрцитивной силы  $H_{c\perp}$ , измеренной с помощью приставного датчика в поперечном направлении, от приложенных растягивающих напряжений изменяется с возрастанием количества циклов предварительного циклического нагружения: значения  $H_{c\perp}$  об-


 Рис. 2. Зависимости  $H_{\text{сз}}^{\parallel}(\sigma)$  (Ia),  $H_{\text{сз}}^{\perp}(\sigma)$  (IIa),  $U^{\parallel}(\sigma)$  (IIb),  $U^{\perp}(\sigma)$  (IIb) и  $\Delta H_{\text{сз}}(\sigma)$  (III).

Измерения проведены с помощью ПМУ на образцах, предварительно циклически деформированных на различное количество циклов: кривая 1 (•) –  $n = 0$ ; 2 (\*) – 30000; 3 (○) – 50000; 4 (Δ) – 100000; 5 (◆) – 300000 циклов. (I) – расположение датчика вдоль оси нагружения; (II) – поперек оси нагружения

Fig. 2. The dependences  $H_{\text{сз}}^{\parallel}(\sigma)$  (Ia),  $H_{\text{сз}}^{\perp}(\sigma)$  (IIa),  $U^{\parallel}(\sigma)$  (IIb),  $U^{\perp}(\sigma)$  (IIb), and  $\Delta H_{\text{сз}}(\sigma)$  (III). The measurements were made with the use of attached transducers on specimens cyclically pre-deformed with different numbers of cycles: curve 1 (•) –  $n = 0$ ; 2 (\*) – 30,000; 3 (○) – 50,000; 4 (Δ) – 100,000; 5 (◆) – 300,000 cycles

разцов в исходном состоянии ( $n = 0$ ) и после 30000 и 50000 циклов монотонно увеличиваются с ростом  $\sigma$  (кривые 1, 2 и 3 на рис. 2 II, a), в то время как зависимости  $H_{\text{сз}}^{\perp}(\sigma)$ , соответствующие образцам, циклически нагруженным на 100000 и 300000 циклов (кривые 4 и 5 на рис. 2 II, a), неоднозначны, с минимумом. Такие особенности поведения зависимостей  $H_{\text{сз}}^{\perp}(\sigma)$  обусловлены следующим. В результате проведенных нами усталостных испытаний в образцах в направлении растяжения формируются остаточные напряжения сжатия, а значит, в перпендикулярных направлениях – остаточные напряжения растяжения. При последующем растяжении такого образца в том направлении, в котором к образцу была приложена предварительная циклическая нагрузка, на него в поперечном направлении будут оказывать суммарное действие внешние сжимающие напряжения (в этом случае схема измерений соответствует измерениям магнитных характеристик в продольном направлении под действием сжимающей нагрузки) и остаточные растягивающие напряжения. Таким образом, на поведение магнитных характеристик будет оказывать действие суперпозиция приложенных и остаточных напряжений: в случае, когда уровень остаточных растягивающих напряжений относительно низкий, внешние сжимающие напряжения приводят к монотонному увеличению значений коэрцитивной силы, а в случае соизмеримости уровня остаточных напряжений с внешними приложенными – к образованию минимума, который формируется в момент компенсации внутренних напряжений внешними.

Среднеквадратичные значения напряжений шумов Баркгаузена имеют противоположный характер изменения с ростом растягивающих напряжений по сравнению с коэрцитивной силой.

Разность значений коэрцитивной силы, измеренных в продольном и поперечном направлениях,  $\Delta H_{\text{сз}}(\sigma)$ , где  $\Delta H_{\text{сз}} = H_{\text{сз}}^{\parallel} - H_{\text{сз}}^{\perp}$ , как видно из рис. 2 (III), с ростом растягивающих напряжений изменяется однозначно во всем интервале приложенных напряжений для всех образцов, циклически нагруженных на разное количество циклов. Вследствие отсутствия экстремумов на зависимостях  $\Delta H_{\text{сз}}(\sigma)$  использование данного параметра в качестве информативного при разработке



методик оценки действующих напряжений может быть более предпочтительным по сравнению с другими ранее рассмотренными характеристиками.

На рис. 3а приведены полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu_{\text{диф}}(H)$  для образца, подвергнутого предварительно на отнулевое циклическое растяжение на 100000 циклов, при различных значениях приложенных растягивающих напряжений. Определение  $\mu_{\text{диф}}$  проводили по данным измерений в замкнутой магнитной цепи. Для образца в недеформированном состоянии (до статического растяжения) на полевой зависимости дифференциальной магнитной проницаемости наблюдаются два максимума. Первый пик наблюдается в отрицательных полях, второй – в положительных полях, то есть в области полей от насыщения до остаточной индукции. На рис. 3а показаны только те участки  $\mu_{\text{диф}}(H)$ , на которых формируются пики.

Формирование двух пиков на зависимостях  $\mu_{\text{диф}}(H)$  у циклически деформированных образцов связано с особенностями перераспределения обратимых и необратимых процессов перемагничивания и разделением вкладов в процессы перемагничивания 90- и 180-градусных доменных границ. Аналогичное формирование двух максимумов на зависимостях дифференциальной магнитной проницаемости было отмечено в работах [6–9] для образцов, деформированных путем статического одноосного растяжения.

С увеличением статических растягивающих напряжений высота пика  $\mu_{\text{диф макс}}$  в отрицательных полях на полевой зависимости для образца, предварительно циклически деформированного на 100000 циклов, увеличивается, а его расположение  $H_{\mu_{\text{диф макс}}}$  смещается в сторону более слабых полей. В то же время, пик на кривых  $\mu_{\text{диф}}(H)$ , расположенный в положительных полях, с ростом приложенных напряжений становится менее выраженным, локализация его также смещается в сторону слабых полей и при значениях 80–100 МПа пик совсем пропадает.

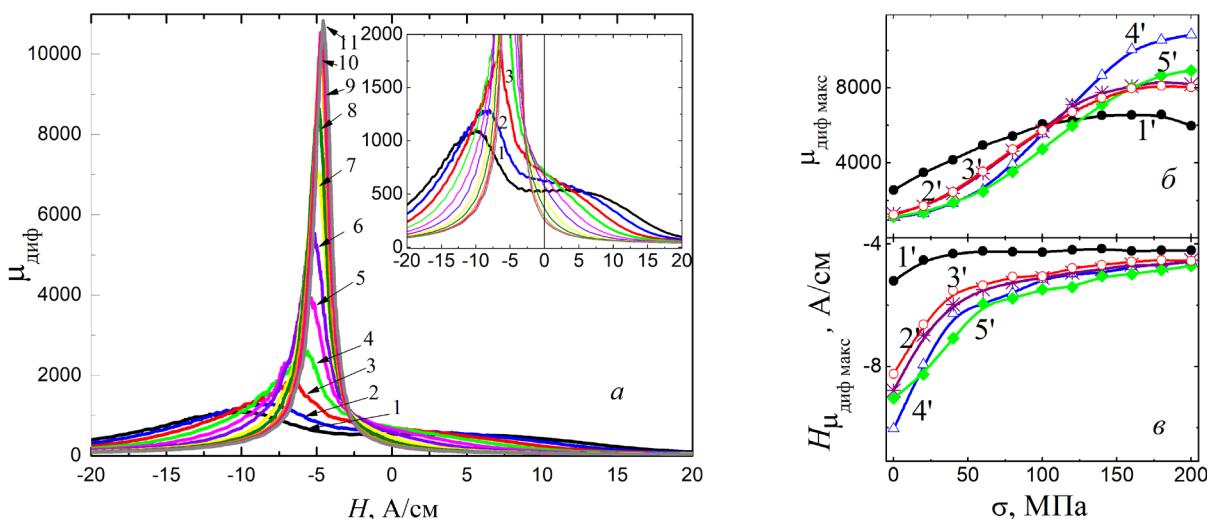


Рис. 3. (а) – зависимости  $\mu_{\text{диф}}(H)$  для образца, предварительно циклически деформированного на 100000 циклов, при различных величинах растягивающих напряжений  $\sigma$ : кривая 1 –  $\sigma = 0$ ; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100; 7 – 120; 8 – 140; 9 – 160; 10 – 180; 11 – 200 МПа; (б) – зависимости  $\mu_{\text{диф макс}}(\sigma)$  для образцов, циклически деформированных на различное количество циклов; (в) –  $H_{\mu_{\text{диф макс}}}(\sigma)$ . Кривая 1' (•) –  $n = 0$ ; 2' (\*) – 30000; 3' (○) – 50000; 4' (Δ) – 100000; 5' (◆) – 300000 циклов

Fig. 3. (a) – the dependences  $\mu_d(H)$  for a specimen cycled with 100,000 cycles, at different values of applied tensile stresses  $\sigma$ : curve 1 –  $\sigma = 0$ , 2 – 20, 3 – 40, 4 – 60, 5 – 80, 6 – 100, 7 – 120, 8 – 140, 9 – 160, 10 – 180, and 11 – 200 MPa; (b) – the dependences  $\mu_{\text{диф макс}}(\sigma)$  for specimens cycled with different numbers of cycles; (c) –  $H_{\mu_{\text{диф макс}}}(\sigma)$ : curve 1' (•) –  $n = 0$ ; 2' (\*) – 30,000; 3' (○) – 50,000; 4' (Δ) – 100,000; 5' (◆) – 300,000 cycles

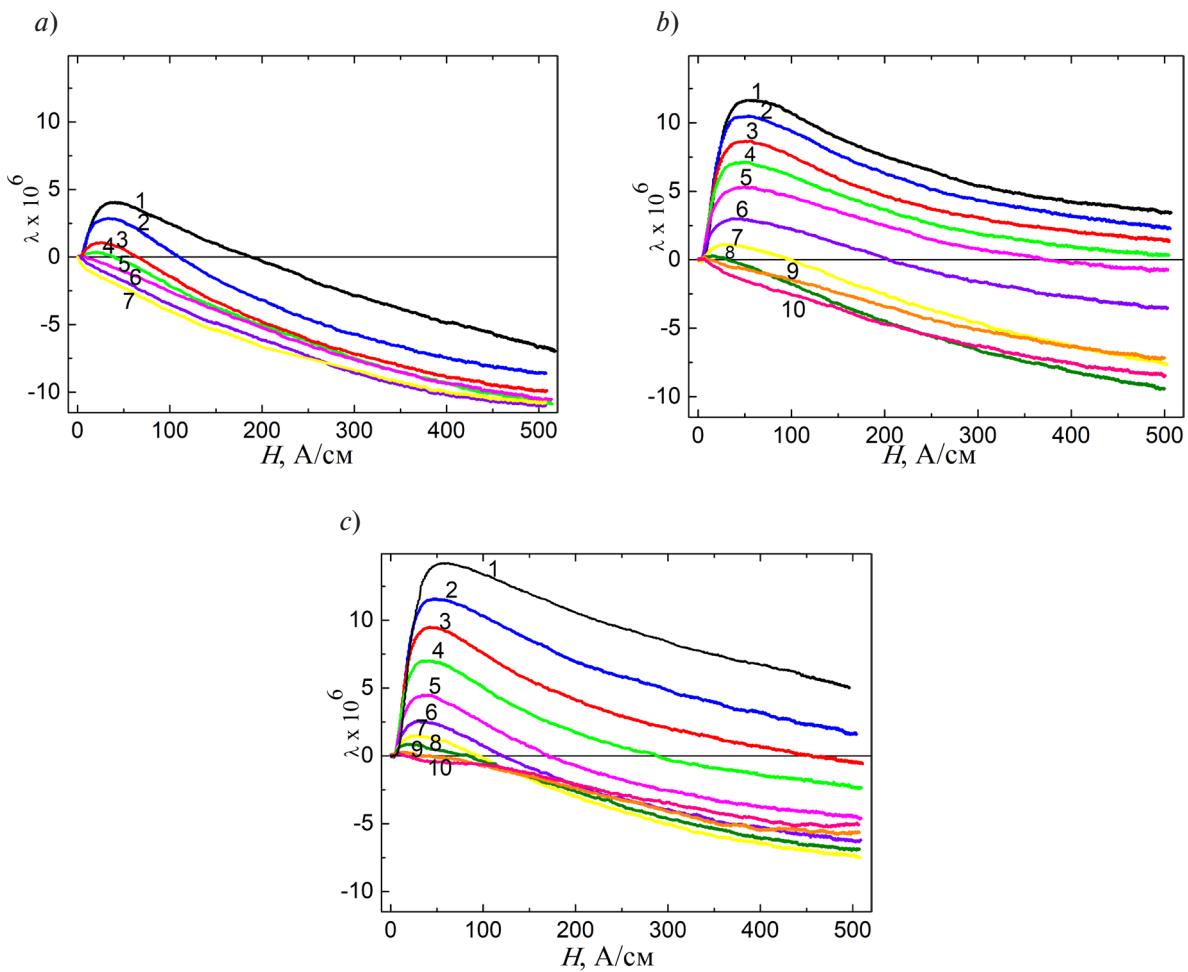


Рис. 4. Полевые зависимости продольной магнитострикции при различных значениях растягивающих напряжений для образцов, предварительно испытанных на отнулевое циклическое растяжение с различным количеством циклов. *а* – 0; *б* – 30000; *в* – 100000 циклов. Кривая 1 –  $\sigma = 0$ ; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100; 7 – 120; 8 – 140; 9 – 160; 10 – 180 МПа

Fig. 4. The field dependences of longitudinal magnetostriction at different values of tensile stresses for the specimens preliminarily tested for zero-to-tension cyclic loading with different numbers of cycles: *a* – 0, *b* – 30,000, and *c* – 100,000 cycles; curve 1 –  $\sigma = 0$ ; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100; 7 – 120; 8 – 140; 9 – 160; 10 – 180 MPa

На рис. 3 (*б*, *в*) представлены зависимости величины максимума дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu_{\text{диф}} \text{ макс}$  и поля максимума дифференциальной магнитной проницаемости  $H_{\text{диф}} \text{ макс}$  от приложенных напряжений для образцов, предварительно циклически нагруженных на различное количество циклов. Как видно из рисунка, в диапазоне растягивающих напряжений от 0 до 100 МПа для всех исследованных образцов значения  $\mu_{\text{диф}} \text{ макс}$  и  $H_{\text{диф}} \text{ макс}$  изменяются монотонно.

На рис. 4 (*а*, *б* и *в*) приведены полевые зависимости продольной магнитострикции  $\lambda$  при растягивающей нагрузке различной величины для образцов из стали 08Г2Б, испытанных на отнулевое циклическое растяжение с количеством циклов 0, 30000 и 100000 циклов, соответственно. Как было отмечено в [10–12], чем выше уровень приложенных сжимающих напряжений в стали (соответственно, деформация сжатия), тем больше площадь положительного участка полевой зависимости магнитострикции и величина ее максимума. Сравнивая кривые 1 на рис. 4 (*а*, *б* и *в*), соответствующие состоянию образцов до деформирования статическим растяжением, можно видеть увеличение положительного участка с ростом количества циклов предварительного циклическо-



го нагружения. Это подтверждает вывод о возрастании уровня остаточных напряжений сжатия, наведенных предварительным циклическим нагружением, с увеличением количества циклов.

Характер поведения полевых зависимостей магнитострикции меняется даже при незначительном увеличении приложенных растягивающих напряжений, что связано с перестройкой доменной структуры ферромагнетика вследствие магнитоупругого эффекта. Во-первых, уменьшается максимальная величина магнитострикции. Во-вторых, под действием напряжений происходит уменьшение значений магнитных полей, при которых магнитострикция меняет свой знак с положительного на отрицательный. В-третьих, при определенной величине напряжений положительный участок полевой зависимости магнитострикции совсем исчезает и магнитострикция, начиная с нулевого значения магнитного поля, принимает только отрицательные значения. Для образца, не подвергнутого циклическому нагружению, это происходит уже при нагрузке 100 МПа, для образца, предварительно циклически нагруженного на 30000 циклов — в диапазоне растягивающих напряжениях от 160 до 180 МПа, для 100000 циклов — выше 180 МПа.

Изменение характера полевой зависимости продольной магнитострикции под действием упругого одноосного нагружения определяет особенности поведения магнитных характеристик под действием тех же нагрузок [13–15]. В диапазоне напряжений, где произошли смена знака магнитострикции и, соответственно, изменение типа магнитной текстуры, на зависимостях магнитных параметров, измеренных вдоль направления нагрузки, от растягивающих напряжений формируются экстремумы. Соответствие положений минимумов продольной коэрцитивной силы значениям напряжений, при которых продольная магнитострикция становилась отрицательной, было отмечено в работах [11, 13, 16].

### Заключение

На примере стали 08Г2Б показано, что предыстория в виде предварительного циклического нагружения по схеме отнулевого растяжения с амплитудой, соответствующей условному пределу текучести, сказывается на последующих закономерностях изменения магнитных параметров материала при его упругом деформировании. Данное обстоятельство следует учитывать при разработке магнитных методик оценки параметров напряженно-деформированного состояния элементов стальных конструкций. Поведение всех исследованных магнитных характеристик, в том числе магнитострикции, при статическом растяжении свидетельствует об усилении напряжений сжатия, обусловленных предварительным циклическим нагружением, в направлении действия циклической нагрузки.

Исследования магнитострикции образцов из стали 08Г2Б, подвергнутых предварительному отнулевому циклическому растяжению, показали, что последующее деформирование статическим растяжением на определенном этапе приводит к исчезновению положительного участка на полевых зависимостях магнитострикции, при всех значениях магнитного поля магнитострикция принимает отрицательные значения. Диапазоны растягивающих напряжений, в которых происходит смена знака магнитострикции, а, значит, и типа магнитной текстуры, примерно соответствуют диапазонам напряжений, в которых формируются экстремумы на зависимостях от растягивающей нагрузки магнитных характеристик, измеренных в продольном направлении.

Установлено, что такие магнитные характеристики, как продольная коэрцитивная сила, максимальная магнитная проницаемость, остаточная индукция, а также величина максимума дифференциальной магнитной проницаемости образцов из стали 08Г2Б, подвергнутых циклическому нагружению на разное количество циклов, при последующем статическом растяжении изменяются однозначно в диапазоне напряжений от 0 МПа до 100 МПа, а поперечная коэрцитивная сила демонстрирует монотонное возрастание в диапазоне от 100 МПа до 200 МПа. При этом разность значений коэрцитивной силы, измеренных в продольном и поперечном направлениях, монотонно уменьшается во всем интервале приложенных напряжений 0...200 МПа. Полученные



зависимости магнитных характеристик исследованной стали от напряжений статического растяжения при различном количестве циклов предварительного циклического нагружения могут быть использованы при разработке методик оценки параметров напряженно-деформированного состояния изделий из стали 08Г2Б.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-48-660035\_р\_а. При выполнении работы было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Горкунов Э.С., Субачев Ю.В., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М. Влияние предварительной пластической деформации на поведение магнитных характеристик высокопрочной трубной стали контролируемой прокатки при упругом одноосном растяжении (сжатии) // Дефектоскопия. – 2015. – № 9. – С. 49–60.
- [2] Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М., Путилова Е.А. Сравнительный анализ поведения магнитных характеристик пластически деформированного металла различных зон сварной трубы при упругой деформации // Дефектоскопия. – 2017. – № 9. – С. 26–34.
- [3] Suresh S. Fatigue of Materials, second ed., Cambridge University Press, New York, 2004.
- [4] Murakami Y., Miller K.J. What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process // Int. J. Fatigue. – 2005. – Vol. 27. – No. 8. – Pp. 991–1005.
- [5] Lukin N.A., Rubin L.S. Use of Nonlinear Functional Analog to Digital Conversion in Precision Measurements of Small Electrical Quantities // Gyroscopy and Navigation. – 2015. – Vol. 6. – No. 2. – P. 149–155.
- [6] Makar J.M., Tanner B.K. The effect of plastic deformation and residual stress on the permeability and magnetostriction of steels // J. Magn. Magn. Mater. – 2000. – Vol. 222. – No. 3. – P. 291–304.
- [7] Pal'a J., Stupakov O., Bydzovsky J., Tomas I., Novak V. Magnetic behaviour of low-carbon steel in parallel and perpendicular directions to tensile deformation // J. Magn. Magn. Mater. – 2007. – Vol. 310. – P. 57–62.
- [8] Кулеев В.Г., Царькова Т.П., Сажина Е.Ю., Дорошек А.С. О влиянии пластической деформации малоуглеродистых ферромагнитных сталей на изменение формы их петель гистерезиса и зависимостей дифференциальной проницаемости от поля // Дефектоскопия. – 2015. – № 12. – С. 32–45.
- [9] Огнева М.С., Ничипурук А.П., Сташков А.Н. Локальное определение поля наведенной магнитной анизотропии и уровня остаточных механических напряжений в деформированных растяжением объектах из малоуглеродистых сталей // Дефектоскопия. – 2016. – № 11. – С. 3–9.
- [10] Anderson P.I., Moses A.J., Stanbury H.J. Assessment of the stress sensitivity of magnetostriction in grain-oriented silicon steel // IEEE Trans. Magn. – 2007. – Vol. 43. – P. 3467–3476.
- [11] Горкунов Э.С., Субачев Ю.В., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М. Влияние упругой одноосной деформации среднеуглеродистой стали на ее магнитострикцию в продольном и поперечном направлениях // Дефектоскопия. – 2013. – № 10. – С. 40–52.
- [12] Wun-Fogle M., Restorff J.B., Cuseo J.M., Garshelis I.J., Bitar S. Magnetostriction and Magnetization of Common High Strength Steels // IEEE Trans. Magn. – 2009. – Vol. 45. – No. 10. – P. 4112–4115.
- [13] Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Соловьев К.Е., Задворкин С.М. Влияние магнитоупругого эффекта на гистерезисные свойства среднеуглеродистой стали при одноосном нагружении // Дефектоскопия. – 2010. – № 9. – С. 17–25.
- [14] 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.
- [15] 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 // J. Magn. Magn. Mater. – 2016. – Vol. 417. – P. 42–48.

- [16] Костин В.Н., Царькова Т.П., Ничипурук А.П., Лоскутов В.Е., Лопатин В.В., Костин К.В. Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. – 2009. – № 11. – С. 54–67.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПОВОЛОЦКАЯ Анна Моисеевна** – старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, канд. техн. наук.

E-mail: anna.povolotskaya.68@mail.ru

**ЗАДВОРКИН Сергей Михайлович** – ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, канд. физ.-мат. наук.

E-mail: zadvorkin@imach.uran.ru

**ПУТИЛОВА Евгения Александровна** – старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, канд. техн. наук.

E-mail: tuevaevgenya@mail.ru

**МУШНИКОВ Александр Николаевич** – младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, без степени.

E-mail: mushnikov@imach.uran.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 05.08.2021

### REFERENCES

- [1] E.S. Gorkunov, Yu.V. Subachev, A.M. Povolotskaya, S.M. Zadvorkin, Vliyanie predvaritelnoy plasticheskoy deformatsii na povedeniye magnitnykh kharakteristik vysokoprochnoy trubnoy stali kontroliruyemoy prokatki pri uprugom odnoosnom rastyazhenii (szzhatii) // Defektoskopiya. – 2015. – № 9. – S. 49–60.
- [2] E.S. Gorkunov, A.M. Povolotskaya, S.M. Zadvorkin, Ye.A. Putilova, Sravnitelnyy analiz povedeniya magnitnykh kharakteristik plasticheskogo deformirovannogo metalla razlichnykh zon svarnoy truby pri uprugoy deformatsii // Defektoskopiya. – 2017. – № 9. – S. 26–34.
- [3] S. Suresh, Fatigue of Materials, second ed., Cambridge University Press, New York, 2004.
- [4] Y. Murakami, K.J. Miller, What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process // Int. J. Fatigue. – 2005. – Vol. 27. – No. 8. – P. 991–1005.
- [5] N.A. Lukin, L.S. Rubin, Use of Nonlinear Functional Analog to Digital Conversion in Precision Measurements of Small Electrical Quantities // Gyroscopy and Navigation. – 2015. – Vol. 6. – No. 2. – P. 149–155.
- [6] J.M. Makar, B.K. Tanner, The effect of plastic deformation and residual stress on the permeability and magnetostriction of steels // J. Magn. Magn. Mater. – 2000. – Vol. 222. – No. 3. – P. 291–304.
- [7] J. Pal'a, O. Stupakov, J. Bydzovsky, I. Tomas, V. Novak, Magnetic behaviour of low-carbon steel in parallel and perpendicular directions to tensile deformation // J. Magn. Magn. Mater. – 2007. – Vol. 310. – P. 57–62.
- [8] V.G. Kuleyev, T.P. Tsarkova, Ye.Yu. Sazhina, A.S. Doroshek, O vliyanii plasticheskoy deformatsii malougloderistykh ferromagnitnykh stalei na izmeneniye formy ikh petel gisterezisa i zavisimostey differentialsialnoy pronitsayemosti ot polya // Defektoskopiya. – 2015. – № 12. – S. 32–45.

- [9] **M.S. Ogneva, A.P. Nichipuruk, A.N. Stashkov**, Lokalnoye opredeleniye polya navedennoy magnitnoy anizotropii i urovnya ostatochnykh mekhanicheskikh napryazheniy v deformirovannykh rastyazheniyem obyektakh iz malouglерodistykh staley // Defektoskopiya. – 2016. – № 11. – S. 3–9.
- [10] **P.I. Anderson, A.J. Moses, H.J. Stanbury**, Assessment of the stress sensitivity of magnetostriction in grain-oriented silicon steel // IEEE Trans. Magn. – 2007. – Vol. 43. – P. 3467–3476.
- [11] **E.S. Gorkunov, Yu.V. Subachev, A.M. Povolotskaya, S.M. Zadvorkin**, Vliyaniye uprugoy odnoosnoy deformatsii sredneuglerodistoy stali na yeye magnitostriktsiyu v prodolnom i poperechnom napravleniyakh // Defektoskopiya. – 2013. – № 10. – S. 40–52.
- [12] **M. Wun-Fogle, J.B. Restorff, J.M. Cuseo, I.J. Garshelis, S. Bitar**, Magnetostriiction and Magnetization of Common High Strength Steels // IEEE Trans. Magn. – 2009. – Vol. 45. – No. 10. – P. 4112–4115.
- [13] **E.S. Gorkunov, A.M. Povolotskaya, K.Ye. Solov'yev, S.M. Zadvorkin**, Vliyaniye magnitouprugogo effekta na gisterezisnyye svoystva sredneuglerodistoy stali pri odnoosnom nagruzhenii // Defektoskopiya. – 2010. – № 9. – S. 17–25.
- [14] **E.S. Gorkunov, Yu.V. Subachev, A.M. Povolotskaya, S.M. Zadvorkin**, Vliyaniye uprugoy deformatsii na gisterezisnyye svoystva dvusloynogo ferromagnitika, sostavленnogo iz komponentov, obladayushchikh magnitostriktsiyey raznykh znakov // Defektoskopiya. – 2014. – № 8. – S. 42–56.
- [15] **N. Leuning, S. Steentjes, M. Schulte, W. Bleck, K. Hameyer**, Effect of elastic and plastic tensile mechanical loading on the magnetic properties of NGO electrical steel // J. Magn. Magn. Mater. – 2016. – Vol. 417. – P. 42–48.
- [16] **V.N. Kostin, T.P. Tsarkova, A.P. Nichipuruk, V.Ye. Loskutov, V.V. Lopatin, K.V. Kostin**, Neobratimyye izmeneniya namagnichennosti kak indikatory napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ferromagnitnykh obyektov // Defektoskopiya. – 2009. – № 11. – S. 54–67.

## THE AUTHORS

**POVOLOTSKAYA Anna M.** – *Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.*

E-mail: anna.povolotskaya.68@mail.ru

**ZADVORKIN Sergey M.** – *Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.*

E-mail: zadvorkin@imach.uran.ru

**PUTILOVA Evgeniya A.** – *Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.*

E-mail: tuevaevgenya@mail.ru

**MUSHNIKOV Aleksandr N.** – *Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.*

E-mail: mushnikov@imach.uran.ru

**Received: 05.08.2021**