

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ УПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ КОРПУСНОЙ СТАЛИ 20ГН С РАЗЛИЧНЫМ ИСХОДНЫМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ

© 2022 г. А.М. Поволоцкая^{1,2,*}, А.Н. Мушников^{1,**}

¹ФГБУН Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова УрО РАН, Россия 620049 Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

²ФГБУН Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

E-mail: *anna.povolotskaya.68@mail.ru; **mushnikov@imach.uran.ru

Поступила в редакцию 18.08.2022; после доработки 21.09.2022

Принята к публикации 04.10.2022

Приведены результаты изучения особенностей поведения магнитных характеристик, в том числе продольной магнитострикции, образцов из корпусной стали 20ГН, предварительно пластически деформированных растяжением на различные степени (вплоть до 17,5 %), в условиях последующего упругого одноосного растяжения. Показано, что рассматриваемые в работе параметры магнитного гистерезиса с ростом приложенных напряжений изменяются не монотонно, с образованием экстремумов. Величины приложенных напряжений, при которых формируются эти экстремумы, зависят от уровня остаточных напряжений сжатия, наведенных предварительным пластическим растяжением вдоль направления его действия. Сопоставлены результаты измерений зависимостей дифференциальной магнитной проницаемости и магнитострикции от напряженности магнитного поля исследуемых образцов. Экспериментально определены величины приложенных напряжений, при которых происходит смена знака магнитострикции предварительно пластически деформированных образцов при последующем упругом деформировании, показано их совпадение с величинами напряжений, при которых формируются экстремумы функций максимумов полевых зависимостей дифференциальной магнитной проницаемости от растягивающей нагрузки.

Ключевые слова: пластическая деформация, упругое одноосное растяжение, магнитострикция, дифференциальная магнитная проницаемость.

DOI: 10.31857/S0130308222110045, EDN: BUHNWQ

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений решения задачи оценки параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) и остаточного ресурса стальных конструкций для диагностики их состояния является применение магнитных методов контроля, чему посвящено большое количество работ, например, [1—13]. Основная цель исследований в этих работах заключалась в создании методов контроля упругих деформаций, возникающих в процессе эксплуатации изделий из ферромагнитных конструкционных материалов. В данных работах (см., например, [8—13]) рассмотрены возможности применения параметров магнитного гистерезиса и шумов Баркгаузена исследуемого материала. Однако для использования в неразрушающем контроле указанных характеристик необходимо понимание физических явлений, которые определяют влияние на эти магнитные характеристики упругих деформаций, а, значит, и понимание взаимосвязи гистерезисных и магнитострикционных свойств ферромагнитных материалов, подвергающихся такого рода контролю.

На практике конструкции могут претерпевать непредсказуемую и сложную историю нагружения, и вопрос о влиянии предыстории нагрузки на поведение магнитных характеристик имеет большое значение для практического применения магнитных методов контроля. В работах [14—17] представлены экспериментальные результаты, подтверждающие факт существенного влияния истории нагружения в виде пластической деформации растяжением на характер изменения магнитных параметров в условиях последующего упругого деформирования. Однако в перечисленных выше литературных источниках исследования ограничивались изучением влияния предварительной пластического растяжения на поведение лишь гистерезисных параметров и параметров шумов Баркгаузена при упругом деформировании, в то время как поведение магнитострикционных параметров при такой схеме нагружения рассмотрено не было.

Магнитоупругий эффект, являющийся следствием перестройки доменной структуры ферромагнитного материала под действием механических напряжений, определяет как особенности поведения магнитных характеристик ферромагнетика в процессе нагружения, так и характер изменения его магнитострикции, поэтому для получения более полного представления об эволюции

доменной структуры ферромагнитного материала при силовом воздействии необходимы, как уже отмечалось выше, экспериментальные исследования по установлению взаимосвязи гистерезисных свойств материала с его магнитоотрицательными параметрами.

Настоящая работа направлена на изучение влияния предварительного деформирования растяжением до различных уровней пластической деформации в широком диапазоне (вплоть до 17,5 %) корпусной стали 20ГН на закономерности поведения ряда ее магнитных характеристик, в том числе и магнитоотрицательности, при последующем упругом одноосном растяжении с целью выявления характера наведенной таким силовым воздействием магнитной анизотропии, а также определения взаимосвязи гистерезисных и магнитоотрицательных свойств исследуемой стали в условиях упругого деформирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований служили плоские образцы с головками, вырезанные из стали 20ГН. Образцы имели сечение 8×5 мм, длина рабочей части образцов составляла 60 мм. Дополнительную термическую обработку образцов не проводили. Химический состав исследованной стали приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследованной стали, мас. %

C	Si	Mn	Ni	Nb	Mo	Cu
0,194	0,283	1,155	0,823	0,096	0,050	0,049

Механические испытания исследуемого материала выполнены в соответствии с ГОСТ 1497—84 на универсальной испытательной машине Tinius Olsen Super L60. Определено, что условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 440$ МПа (верхний предел текучести — 450 МПа), временное сопротивление разрыву $\sigma_b = 550$ МПа, относительное удлинение после разрыва $\delta = 25$ %. Диаграмма растяжения стали 20ГН приведена на рис. 1.

Исходя из полученных механических свойств, образцы для исследований были деформированы одноосным растяжением до различных уровней пластической деформации на испытательной машине Tinius Olsen Super «L». Были получены образцы со следующими значениями остаточной пластической деформации ε : 0,75; 1,28; 1,96; 5,01; 7,53; 10; 12,5; 15,1 и 17,5 % (на рис. 1 приведены соответствующие линии разгрузки). Один образец оставили для дальнейших испытаний в исход-

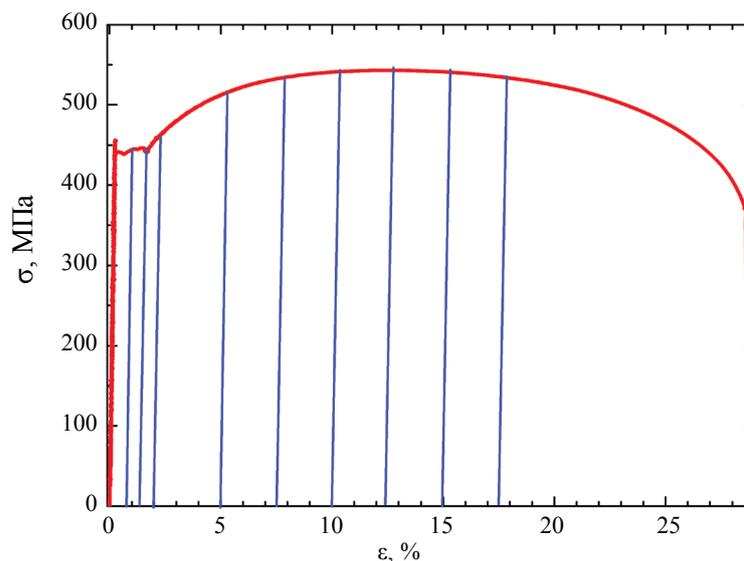


Рис. 1. Диаграмма растяжения стали 20ГН.

ном состоянии ($\varepsilon = 0\%$). В [18] авторами ранее были проведены исследования по влиянию пластической деформации изучаемой корпусной стали 20ГН на поведение ее магнитных характеристик и магнитоэлектрики, при этом диапазон изменения степени пластической деформации ограничивался 10 %, в настоящей работе он расширен до 17,5 %.

Полученные образцы подвергали упругому одноосному растяжению на испытательной машине УММ-5. Максимальную нагрузку, прикладываемую к образцам, определяли таким образом, чтобы не был превышен предел пропорциональности исследуемого материала. На каждом шаге упругого деформирования через 1 кН, что для образца с исходным сечением соответствует 25 МПа, процесс нагружения приостанавливали и осуществляли измерения магнитных характеристик. После проведения измерений на каждом шаге образец размагничивали, после чего нагружали до следующей точки измерений. Перед началом следующего цикла магнитных измерений образец вновь размагничивали. Истинное напряжение σ на каждом шаге растяжения определяли с учетом поперечного сечения образца при растяжении.

Кривую намагничивания и петли магнитного гистерезиса регистрировали с помощью компьютеризированного гистерезисграфа Remagraph C-500. Намагничивание при этом осуществляли вдоль направления растяжения образцов. Максимальное значение внутреннего поля достигало 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 λ_{\max} . Погрешность измерения магнитного поля и индукции составляла не более 3 %.

Мост Уитстона для измерений полевых зависимостей продольной магнитоэлектрики состоял из фольговых тензорезисторов ВF350-3АА с номинальным сопротивлением 350 Ом и базой 3 мм. Для питания моста и регистрации сигналов была использована тензостанция Zetlab 017Т8.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2а приведены зависимости линейной продольной магнитоэлектрики λ от приложенного магнитного поля для образцов, испытанных на пластическое растяжение на различные степени. Для образца в исходном состоянии ($\varepsilon = 0$) продольная магнитоэлектрика с увеличением напряженности магнитного поля сначала возрастает до максимума λ_{\max} , затем уменьшается, достигает нулевого значения и продолжает уменьшаться уже с отрицательным знаком (кривая 1 на рис. 2а). Для образцов, подвергнутых пластическому растяжению (кривые 2—10 на рис. 2а), наблюдается изменение характера полевой зависимости магнитоэлектрики: во всем исследованном диапазоне напряженности магнитного поля $\lambda(H)$ положительна. При этом, с ростом ε до значения 1,96 % существенно увеличивается площадь положительного участка полевой зависимости магнитоэлектрики и, как можно видеть на рис. 2б, значительно возрастает величина максимума магнитоэлектрики λ_{\max} . При дальнейшем увеличении степени пластической деформации от 1,96 % вплоть

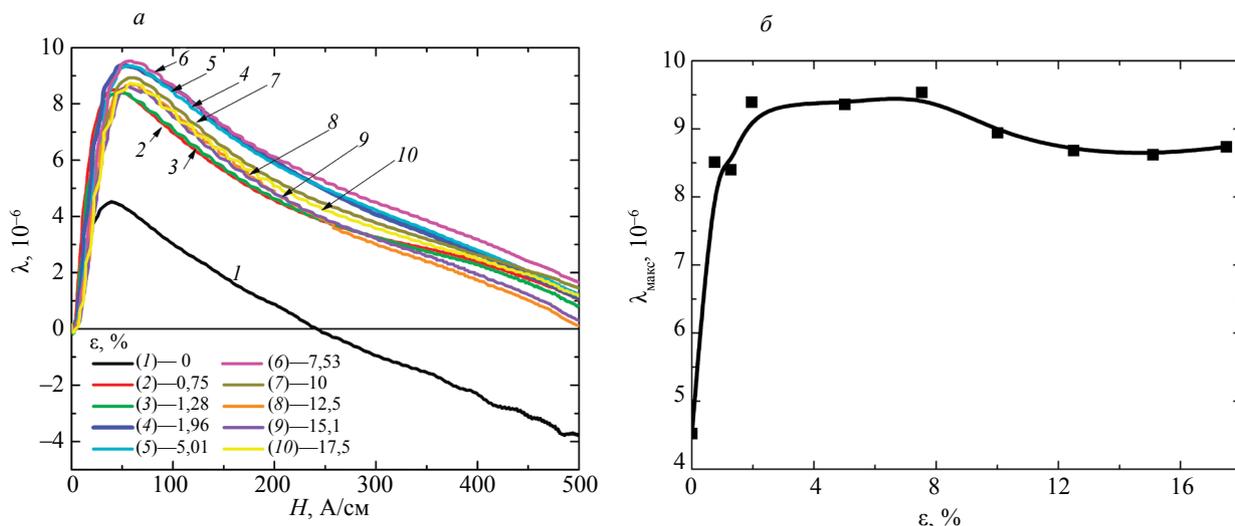


Рис. 2. Зависимости $\lambda(H)$ образцов, пластически деформированных на различные степени (а): кривая 1 — $\varepsilon = 0$; 2 — 0,75; 3 — 1,28; 4 — 1,96; 5 — 5,01; 6 — 7,53; 7 — 10; 8 — 12,5; 9 — 15,1; 10 — 17,5 %; б — зависимость $\lambda_{\max}(\varepsilon)$.

до 17,5 % площадь положительного участка полевой зависимости магнитострикции и величина ее максимума изменяются незначительно.

Поведение $\lambda(H)$ для образцов, подвергнутых пластическому деформированию, характерно для поведения кривых магнитострикции при одноосном статическом сжатии [19—23] и является следствием формирования текстуры типа «плоскость легкого намагничивания» и возникновения в значительной части зерен остаточных сжимающих напряжений различного уровня, ориентированных вдоль направления проведенной пластической деформации. Характер изменения $\lambda_{\text{макс}}(\epsilon)$ при $\epsilon > 10\%$ свидетельствует, скорее всего, о том, что уровень остаточных сжимающих напряжений достиг своего насыщения. Можно предположить, что на поведение магнитострикции в первую очередь влияют внутренние напряжения, сформированные в образце, и в гораздо меньшей степени сказываются изменения его структурного состояния (увеличение плотности дислокаций, образование дислокационных стенок, образование субзерен), происходящие в процессе пластической деформации.

На рис. 3 показаны зависимости магнитных характеристик образцов от приложенных напряжений σ при упругом растяжении после их предварительного пластического растяжения на различные степени. С увеличением растягивающих напряжений коэрцитивная сила H_c , остаточная индукция B_r и максимальная магнитная проницаемость $\mu_{\text{макс}}$ всех образцов, одноосно деформированных до различных величин пластической деформации, изменяются с образованием экстремумов различной степени «выраженности» (минимумов на зависимостях $H_c(\sigma)$ и максимумов на зависимостях $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\text{макс}}(\sigma)$). При этом можно отметить, что экстремумы $H_c(\sigma)$, $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\text{макс}}(\sigma)$ для образцов, деформированных растяжением до различных уровней пластической деформации, наблюдаются при различных величинах приложенных напряжений. Соответственно, различен диапазон σ , в котором указанные магнитные характеристики образцов демонстрируют монотонный характер изменения.

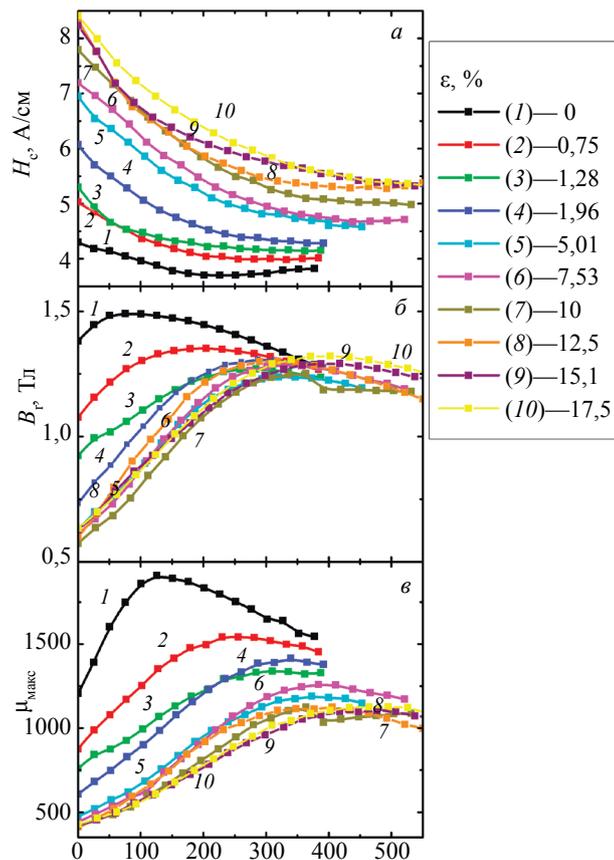


Рис. 3. Зависимости от приложенных растягивающих напряжений значений коэрцитивной силы (а), остаточной индукции (б) и максимальной магнитной проницаемости (в), измеренных на образцах, предварительно пластически деформированных на различные степени: кривая 1 — $\epsilon = 0$; 2 — 0,75; 3 — 1,28; 4 — 1,96; 5 — 5,01; 6 — 7,53; 7 — 10; 8 — 12,5; 9 — 15,1; 10 — 17,5 %.

Смещение экстремумов на зависимостях $H_c(\sigma)$, $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\max}(\sigma)$ с ростом σ обусловлено различным уровнем внутренних остаточных напряжений, вносимых предварительным пластическим деформированием, а местоположения этих экстремумов (то есть величины s , при которых они формируются), в свою очередь, связаны с моментом частичной компенсации приложенными растягивающими напряжениями части внутренних остаточных напряжений сжатия [24].

Зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ от напряженности магнитного поля для образца, не подвергнутого предварительно пластической деформации растяжением ($\varepsilon = 0$), при различных величинах приложенных растягивающих напряжений σ показаны на рис. 4. С увеличением растягивающих напряжений σ до величины $\sigma_{\text{extr}} = 150,9$ МПа высота пика $\mu_{\text{диф макс}}$ формируемого в отрицательных полях на зависимостях $\mu_{\text{диф}}(H)$, сначала растет, его местоположение при этом смещается в сторону более слабых полей, а затем, при дальнейшем увеличении растягивающих напряжений, уменьшается по величине, при этом расположение пика продолжает смещаться в сторону более слабых полей. Иными словами, для пластически недеформированного образца $\sigma_{\text{extr}} = 150,9 \pm 12,5$ МПа является величиной растягивающих напряжений, при которой формируется экстремум функции максимумов полевых зависимостей дифференциальной магнитной проницаемости от растягивающей нагрузки. Результаты, приведенные на рис. 2а, 3 и 4, согласуются с результатами, полученными в работах [16, 17, 24—27].

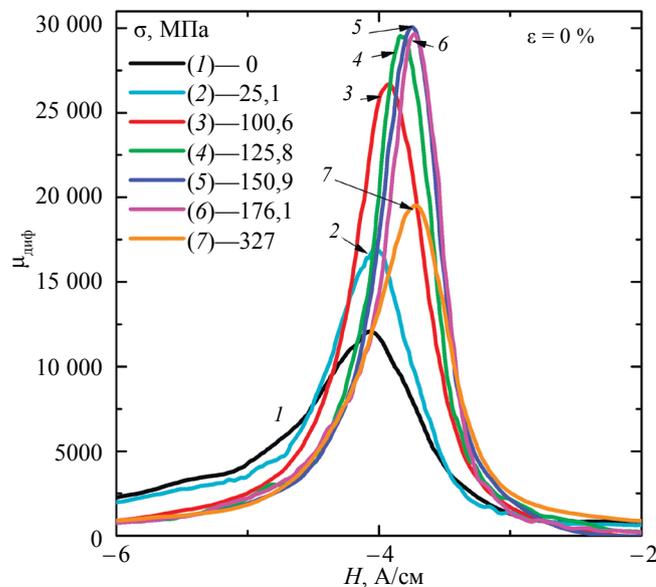


Рис. 4. Зависимости $\mu_{\text{диф}}(H)$ для образца с $\varepsilon = 0$ при различных величинах приложенных растягивающих напряжений σ .

Зависимости магнитострикции λ от напряженности магнитного поля для того же, пластически не деформированного образца при различных величинах растягивающей нагрузки показаны на рис. 5. Как видно из рис. 5, по мере увеличения приложенных растягивающих напряжений уменьшается величина максимума магнитострикции, формируемого в области слабых полей. Это обусловлено тем, что на начальной стадии намагничивания преобладают процессы смещения доменных границ, в то время как процессы вращения, благодаря которым главным образом осуществляется возрастание магнитострикции, с ростом растягивающей нагрузки замедляются вследствие увеличения анизотропии. Кроме того, можно отметить, что при величине напряжений, превышающей $\sigma_{\text{sign}} = 150,9$ МПа, положительный участок зависимости магнитострикции от напряженности магнитного поля совсем исчезает и магнитострикция во всем интервале магнитных полей принимает только отрицательные значения.

Изменения $\lambda(H)$, происходящие под действием упругого одноосного растяжения, отражаются и в особенностях поведения гистерезисных параметров при тех же условиях нагружения [4, 12, 13, 20, 21, 28—31]. Объяснением данного факта служит следующее. При небольших нагрузках создаются предпосылки для формирования магнитной текстуры типа «ось легкого намагничивания» и преимущественной ориентации магнитных моментов доменов вдоль направления легкого намаг-

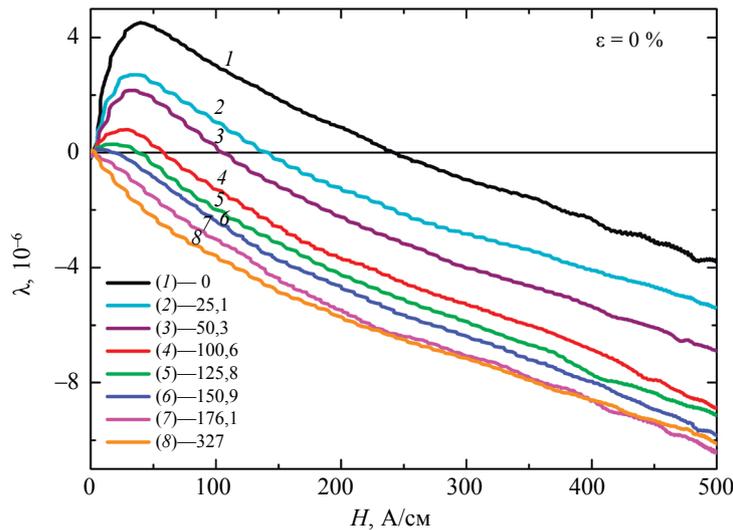


Рис. 5. Полевые зависимости магнитострикции $\lambda(H)$ для образца с $\varepsilon = 0$ при различных величинах приложенных растягивающих напряжений σ .

ничивания, ближайшего к оси растяжения, что способствует намагничиванию и перемагничиванию в этом направлении и, соответственно, приводит к уменьшению коэрцитивной силы. Когда в процессе растяжения магнитострикция принимает только отрицательные значения, идет образование магнитной текстуры типа «плоскость легкого намагничивания», магнитным моментам доменов энергетически выгоднее располагаться в плоскости, перпендикулярной направлению действия растяжения, что препятствует процессам намагничивания и перемагничивания, вследствие чего коэрцитивная сила увеличивается.

Последнее обуславливает тот факт, что растягивающие напряжения σ_{sign} , при превышении которых происходит смена знака магнитострикции и изменение типа магнитной текстуры (в нашем случае 150,9 МПа), соответствуют напряжениям σ_{extr} , при которых на зависимостях от растягивающих напряжений максимумов дифференциальной магнитной проницаемости формируются экстремумы. Для недеформированного образца ($\varepsilon = 0$) совпадение величин σ_{extr} и σ_{sign} более наглядно продемонстрировано на рис. 6, на котором представлены зависимости от приложенных напряжений максимумов дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф макс}}$ (рис. 6а) и максимумов кривых магнитострикции $\lambda_{\text{макс}}$, имеющих положительный участок (рис. 6б).

Аналогичное сопоставление величин приложенных напряжений σ_{sign} , при превышении которых полевые зависимости магнитострикции становятся отрицательными, с величинами приложенных напряжений σ_{extr} , при которых формируются экстремумы на кривых максимумов полевых зависимостей дифференциальной магнитной проницаемости, при упругом деформировании было проведено для всех образцов, предварительно подвергнутых пластическому растяжению на разные степени. В качестве примера на рис. 7—10 показаны полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ (рис. 7а — 10а) и соответствующие им полевые зависимости магнитострикции (рис. 7б — 10б) при

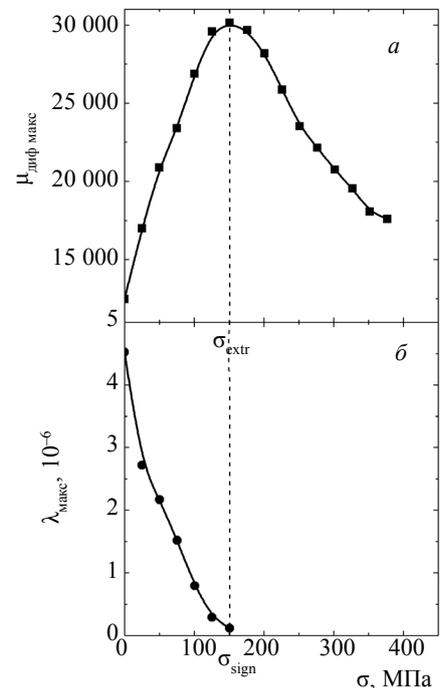


Рис. 6. Зависимости от приложенных напряжений максимумов дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф макс}}$ (а) и максимумов полевых зависимостей магнитострикции $\lambda_{\text{макс}}$, имеющих положительный участок: σ_{extr} — величина растягивающих напряжений, при которых формируется экстремум функции максимумов полевых зависимостей дифференциальной магнитной проницаемости; σ_{sign} — величина растягивающих напряжений, выше которых полевые зависимости магнитострикции полностью лежат в отрицательной области.

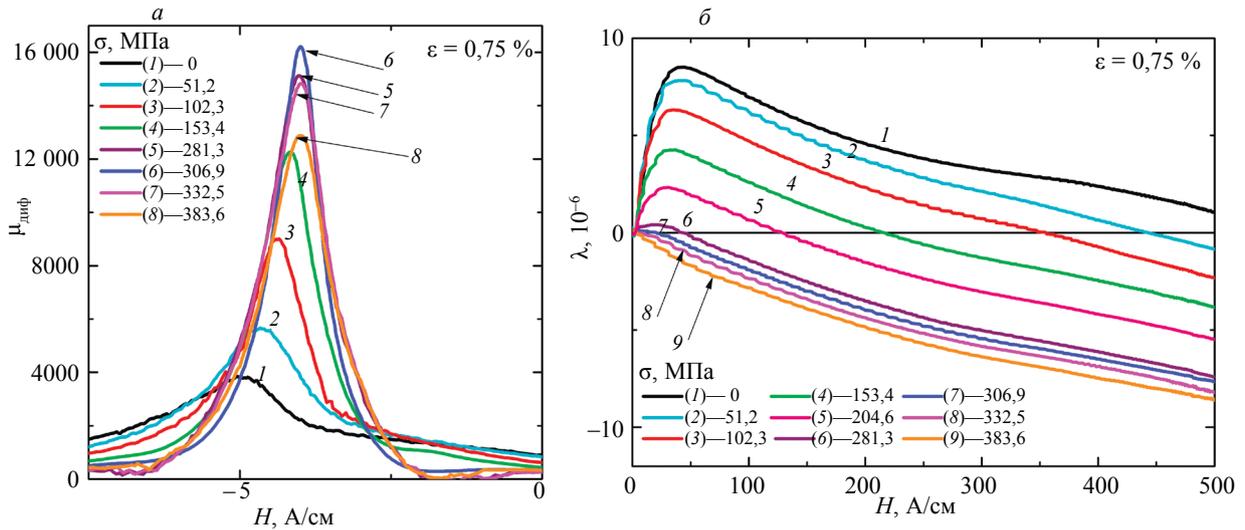


Рис. 7. Полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ (а) и полевые зависимости магнито-стрикции $\lambda(H)$ (б) при различных величинах приложенных растягивающих напряжений σ для образца, предварительно пластически деформированного на степень $\varepsilon = 0,75\%$.

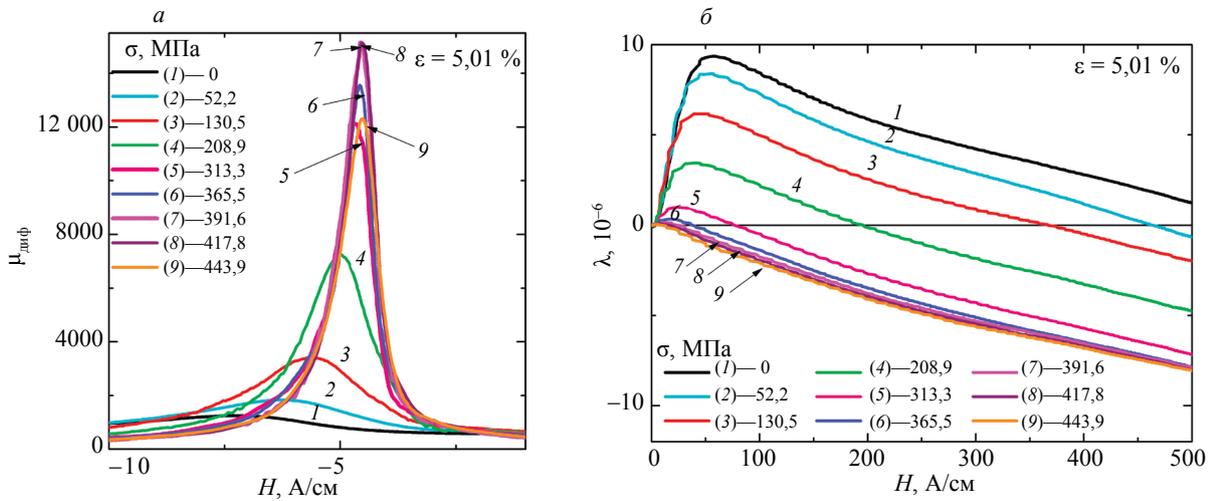


Рис. 8. Полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ (а) и полевые зависимости магнито-стрикции $\lambda(H)$ (б) при различных величинах приложенных растягивающих напряжений σ для образца, предварительно пластически деформированного на степень $\varepsilon = 5,01\%$.

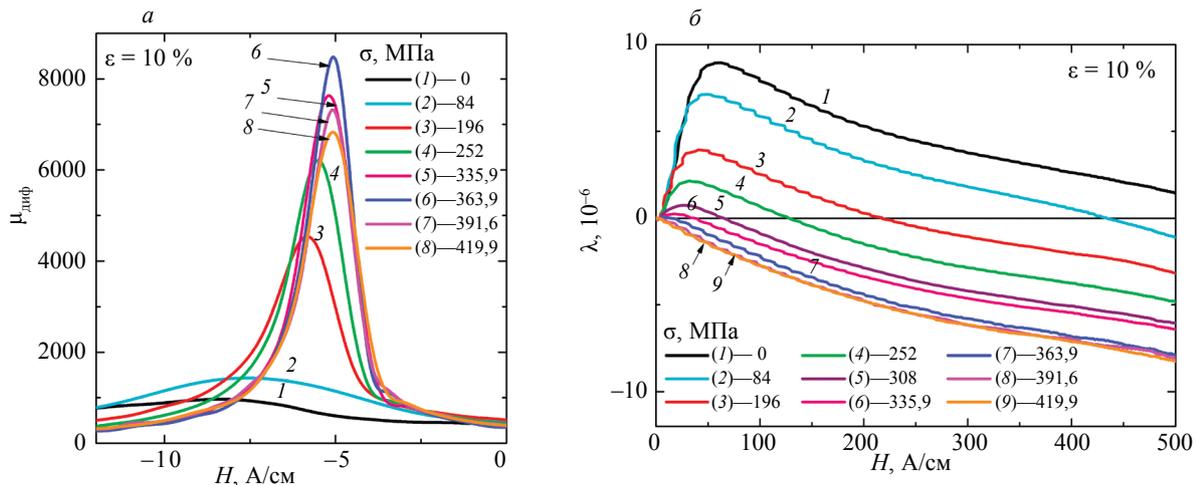


Рис. 9. Полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ (а) и полевые зависимости магнито-стрикции $\lambda(H)$ (б) при различных величинах приложенных растягивающих напряжений σ для образца, предварительно пластически деформированного на степень $\varepsilon = 10\%$.

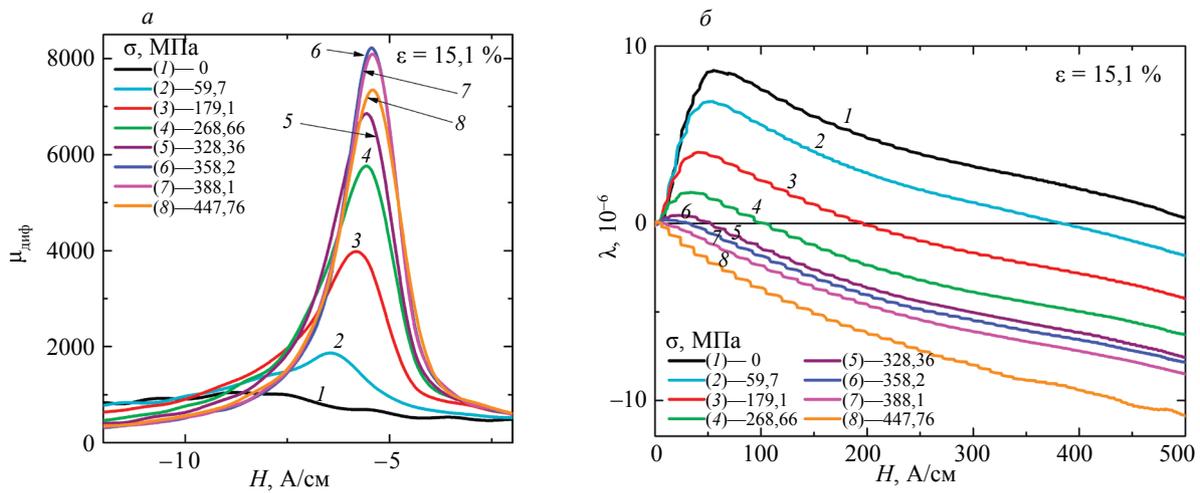


Рис. 10. Полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ (а) и полевые зависимости магнитострикции $\lambda(H)$ (б) при различных величинах приложенных растягивающих напряжений σ для образца, предварительно пластически деформированного на степень $\varepsilon = 15,1\%$.

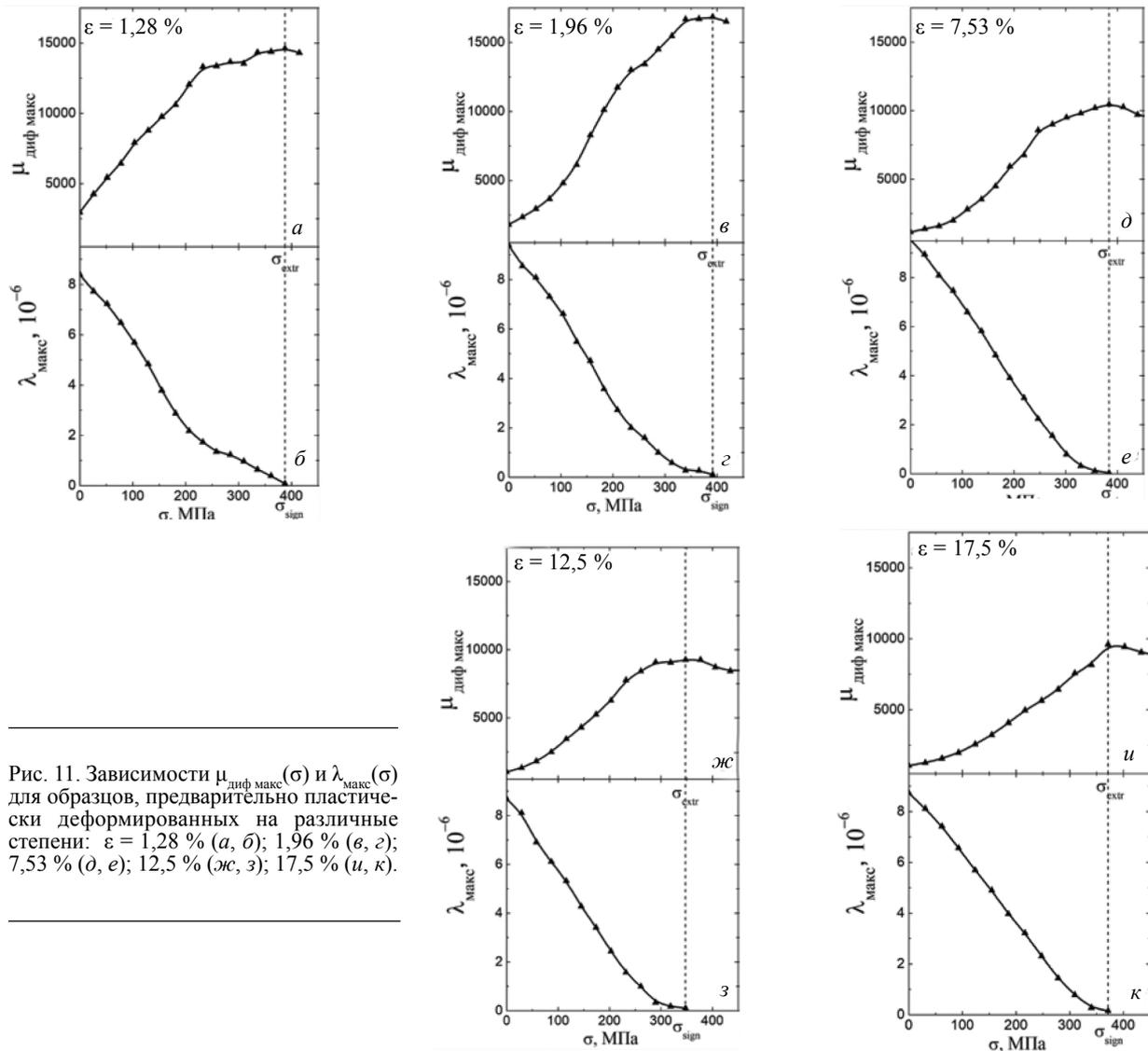


Рис. 11. Зависимости $\mu_{\text{диф макс}}(\sigma)$ и $\lambda_{\text{макс}}(\sigma)$ для образцов, предварительно пластически деформированных на различные степени: $\varepsilon = 1,28\%$ (а, б); $1,96\%$ (в, г); $7,53\%$ (д, е); $12,5\%$ (ж, з); $17,5\%$ (и, к).

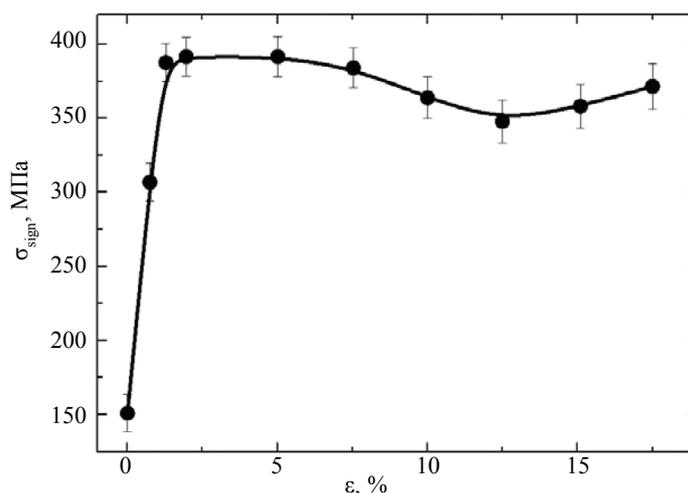


Рис. 12. Величины приложенных напряжений σ_{sign} ($\sigma_{\text{sign}} = \sigma_{\text{extr}}$) в зависимости от уровня предварительной пластической деформации ε .

растягивающей нагрузке различной величины для образцов, предварительно деформированных растяжением до уровней пластической деформации 0,75; 5,01; 10 и 15 % соответственно. Анализ представленных на рис. 7—10 зависимостей показал совпадение величин σ_{sign} и σ_{extr} .

Демонстрацией совпадения величин σ_{sign} и σ_{extr} для остальных образцов, предварительно пластически деформированных на степени 1,28; 1,96; 7,53; 12,5 и 17,5 %, служит рис. 11, на котором приведены результаты, аналогичные результатам на рис. 6.

Величины σ_{extr} и σ_{sign} , соответствующие напряжениям, при которых при упругом деформировании произошло изменение типа магнитной текстуры для всех исследованных образцов в зависимости от степени, на которую они предварительно были пластически деформированы, показаны на рис. 12. Можно отметить качественное подобие кривой $\sigma_{\text{sign}}(\varepsilon)$ и кривой максимумов магнитострикции $\lambda_{\text{макс}}(\varepsilon)$, приведенной на рис. 2б: существенное увеличение на начальном этапе пластической деформации при ε от 0 до 1,96 %, затем незначительные изменения при ε от 1,96 до 7,53 % и небольшое снижение величин при $\varepsilon > 7,53$ %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Закономерности изменения полевых зависимостей линейной магнитострикции пластически деформированной растяжением на различные степени корпусной стали 20ГН подтверждают факт возникновения в образцах текстуры типа «плоскость легкого намагничивания», что, в свою очередь, связано с наличием в образцах остаточных сжимающих напряжений различного уровня вдоль направления пластической деформации. Анализ параметров полевых зависимостей магнитострикции показал их скачкообразное и значительное по величине изменение на начальном этапе деформации, примерно до 2 %, и затем несущественное — в интервале относительных удлинений порядка от 2 до 17,5 %.

Предыстория в виде предварительной пластической деформации накладывает свой отпечаток на закономерности изменения магнитных параметров материала при его последующем упругом деформировании. Величины приложенных напряжений, при которых формируются экстремумы зависимостей коэрцитивной силы, остаточной индукции, максимальной магнитной проницаемости, максимумов дифференциальной магнитной проницаемости от приложенных напряжений, и, значит, диапазон приложенных напряжений, в которых перечисленные магнитные характеристики изменяются однозначно, зависят от уровня наведенных предварительным пластическим растяжением остаточных напряжений сжатия. Данное обстоятельство следует принимать во внимание при разработке магнитных методик оценки параметров напряженно-деформированного состояния элементов конструкций из корпусной стали 20ГН.

Сопоставление результатов измерений гистерезисных и магнитострикционных свойств предварительно пластически деформированной растяжением на различные степени исследуемой корпусной стали 20ГН при последующем упругом деформировании показало, что величины растягивающих напряжений, выше которых происходит смена знака магнитострикции и, соответственно,

смена типа магнитной текстуры, практически совпадают с величинами напряжений, в которых формируются экстремумы функций максимумов полевых зависимостей дифференциальной магнитной проницаемости от растягивающей нагрузки.

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. Мужижкий В.Ф., Султанов М.Х., Загидулин Р.В., Макаров П.С. Многопараметровый метод оценки напряженно-деформированного состояния стальных изделий и трубопроводов // Контроль. Диагностика. 2006. № 8. С. 17—22.
2. Костин В.Н., Василенко О.Н., Филатенков Д.Ю., Чекакина 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Vengrinovich V., Vintov D., Prudnikov A., Podugolnikov P., Ryabtsev V. Magnetic Barkhausen Effect in Steel under Biaxial Strain/Stress: Influence on Stress Measurement // Journal of Nondestructive Evaluation. 2019. V. 38. Art. 52. <https://doi.org/10.1007/s10921-019-0576-7>
8. Roskosz M., Fryczowski K. Magnetic methods of characterization of active stresses in steel elements // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2020. V. 499. P. 166272.
9. Stefanita C.G., Atherton D.L., Clapham L. Plastic versus elastic deformation effects on magnetic Barkhausen noise in steel // Acta Materialia. 2000. V. 48. No. 13. P. 3545—551.
10. 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.
11. Mierczak L.L., Jiles D.C., Fantoni G. A new method for evaluation of mechanical stress using the reciprocal amplitude of magnetic Barkhausen noise // IEEE Transactions on Magnetics. 2011. V. 47. No. 2. P. 459—465.
12. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.12.040>
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 предварительной пластической деформации на поведение магнитных характеристик высокопрочной трубной стали контролируемой прокатки при упругом одноосном растяжении (сжатии) // Дефектоскопия. 2015. № 9. С. 49—60.
15. 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.
16. Кулеев В.Г., Царькова Т.П. Особенности зависимости коэрцитивной силы сталей от упругих растягивающих напряжений после пластических деформаций и термообработки // ФММ. 2007. Т. 104. № 5. С. 479—486.
17. Кулеев В.Г., Царькова Т.П. О влиянии пластического растяжения сталей на зависимости коэрцитивной силы от упругих сжимающих напряжений // Дефектоскопия. 2014. № 2. С. 34—45.
18. Povolotskaya A.M., Mushnikov A.N. Effect of Plastic Deformation on the Magnetic Parameters and Magnetostriction of the 20GN Steel // Procedia Structural Integrity. 2022. V. 40. P. 359—364. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.04.048>
19. Anderson P.I., Moses A.J., Stanbury H.J. Assessment of the stress sensitivity of magnetostriction in grain-oriented silicon steel // IEEE Transactions on Magnetics. 2007. V. 43. P. 3467—3476. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.893534>

20. 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.
21. Dias M.B.S., Landgraf F.J.G. Compressive stress effects on magnetic properties of uncoated grain oriented electrical steel // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2020. V. 504. Art. 166566. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166566>
22. Wun-Fogle M., Restorff J.B., Cuseo J.M., Garshelis I.J., Bitar S. Magnetostriction and Magnetization of Common High Strength Steels // IEEE Transactions on Magnetics. 2009. V. 45. No. 10. P. 4112—4115.
23. Makar J.M., Tanner B.K. The effect of plastic deformation and residual stress on the permeability and magnetostriction of steels // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2000. V. 222. No. 3. P. 291—304.
24. Кулеев В.Г., Горкунов Э.С. Механизмы влияния внутренних и внешних напряжений на коэрцитивную силу ферромагнитных сталей // Дефектоскопия. 1997. № 11. С. 3—18.
25. 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 зависимости дифференциальной проницаемости от поля // Дефектоскопия. 2015. № 12. С. 32—45.
26. Кулеев В.Г., Царькова Т.П., Сажина Е.Ю. Влияние необратимых переходов доменных границ в пластически деформированных сталях на их остаточную намагниченность // Дефектоскопия. 2016. № 12. С. 78—86.
27. Stashkov A., Nichipuruk A., Kuleev V., Schapova E. Magnetic non-destructive testing of residual stresses in low carbon steels // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1389. P. 012032.
28. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.05.049>
29. M'zali N., Martin F., Aydin U., Belahcen A., Benabou A., Henneron T. Determination of stress dependent magnetostriction from a macroscopic magneto-mechanical model and experimental magnetization curves // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2020. V. 500. Art. 166299. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166299>
30. Yamasaki T., Yamamoto S., Hirao M. Effect of applied stresses on magnetostriction of low carbon steel // NDT & E International. 1996. V. 29. No. 5. P. 263—268. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(96\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(96)00028-X)
31. Makar J.M., Tanner B.K. The in situ measurement of the effect of plastic deformation on the magnetic properties of steel. Part I — Hysteresis loops and magnetostriction // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1998. V. 184. No. 2. P. 193—208. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(97\)01129-3](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(97)01129-3)
-