

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЯЧЕКАТАНОЙ СТАЛИ 08Г2Б ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2019 г. Э.С. Горкунов¹, А.М. Поволоцкая^{1*}, С.М. Задворкин¹, Е.А. Путилова¹,
А.Н. Мушников¹, Е.Г. Базулин², А.Х. Вopilкин²

¹ИМАШ УрО РАН, Россия 620049 Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

²ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+», Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»

E-mail: *us@imach.uran.ru

Поступила в редакцию 11.07.2019; после доработки 24.07.2019

Принята к публикации 02.08.2019

Приведены результаты изучения влияния циклического нагружения по схеме отнулевого растяжения с амплитудой, примерно соответствующей условному пределу текучести, на магнитные и акустические параметры горячекатаной трубной стали 08Г2Б, в том числе продольную и поперечную магнитострикцию. Определены параметры, однозначно изменяющиеся с увеличением количества циклов нагружения, что дает принципиальную возможность их использования для разработки неразрушающих методов контроля усталостной деградации материала конструкций из исследованной стали.

Ключевые слова: циклическое нагружение, растяжение, магнитострикция, коэрцитивная сила.

DOI: 10.1134/S0130308219110034

ВВЕДЕНИЕ

Усталость материала является одной из основных причин разрушения деталей машин и элементов конструкций [1—5], поэтому оценка уровня усталостной деградации металла представляется актуальной задачей, которая до сих пор не решена, несмотря на многочисленные исследования, посвященные этой проблеме (например, [6—8]). В то же время неразрушающие методы контроля, в частности магнитный и акустический, показали свою эффективность при диагностике напряженно-деформированного состояния и поврежденности различных стальных изделий и оценки их остаточного ресурса после термической обработки и в условиях статического деформирования по различным схемам [9—16]. Представляет интерес изучить возможности магнитной структуроскопии и акустических методов применительно к оценке усталостной деградации конструкционных сталей.

Задача настоящей работы — исследование влияния отнулевого циклического растяжения с амплитудой, примерно соответствующей условному пределу текучести горячекатаной трубной стали 08Г2Б, на закономерности изменения ряда ее магнитных характеристик, в том числе магнитострикции в продольном и поперечном направлениях, и акустических параметров с целью изучения возможностей магнитных и акустических методов для оценки состояния металла конструкций, работающих в условиях циклических нагрузок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследования была выбрана горячекатаная трубная сталь 08Г2Б, химический состав которой представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследованной стали

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	V	Ti
0,081	0,278	1,669	0,015	0,009	0,140	0,193	0,041	0,071	0,022	0,014

Для исследований из прямошовной трубы $\varnothing 1420 \times 15,7$ мм были вырезаны вдоль направления прокатки плоские образцы с головками. Рабочая часть образцов сечением $6 \times 34,6$ мм имела длину

100 мм. После изготовления образцы отжигали в вакууме при температуре 700 °С в течение 3 ч для снятия внутренних напряжений.

Для аттестации исходного состояния материала исследованных образцов, в частности, на предмет отсутствия кристаллографической текстуры, наличие которой может существенно сказаться на результатах усталостных испытаний, был проведен комплекс металлографических и рентгеноструктурных исследований. Металлографические исследования проводили при помощи оптического микроскопа Neophot, а также сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA II XMU с системой рентгеновского волнодисперсионного микроанализа INCA WAVE 700, энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450 с ADD детектором OXFORD.

Структура исследованной стали представляет собой феррито-перлитную смесь с практически равноосными зернами размером 5—35 мкм в плоскости поперек длинной оси образца и 3—25 мкм — вдоль длинной оси образца. Наличие градиента цвета в образцах исследованной стали в обоих направлениях на EBSD-картах разориентировок (рис. 1) указывает на отсутствие преимущественной кристаллографической ориентировки зерен в материале.

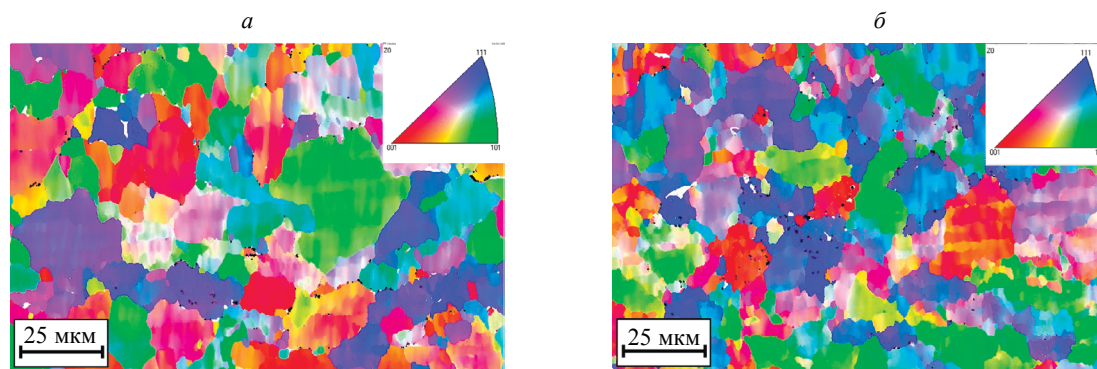


Рис. 1. EBSD-карты разориентировок в плоскости поперек (а) и вдоль (б) длинной оси образца.

Проведенные на дифрактометре SHIMADZU XRD-7000 рентгеноструктурные исследования показали, что остаточные напряжения в образцах составляют в среднем –45 МПа вдоль оси образца (то есть вдоль направления прокатки металла) и –56 МПа — в поперечном направлении.

Механические характеристики образцов при статическом растяжении (временное сопротивление разрыву σ_b , условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ и относительное остаточное удлинение образцов δ после разрыва) на универсальной испытательной машине Tinius Olsen Super L60 определяли по ГОСТ 1497—84. Диаграмма нагружения исследованной стали представлена на рис. 2. Механические характеристики стали 08Г2Б: условный предел текучести — 280 МПа, временное сопротивление — 535 МПа, относительное удлинение при разрыве — 30 %.

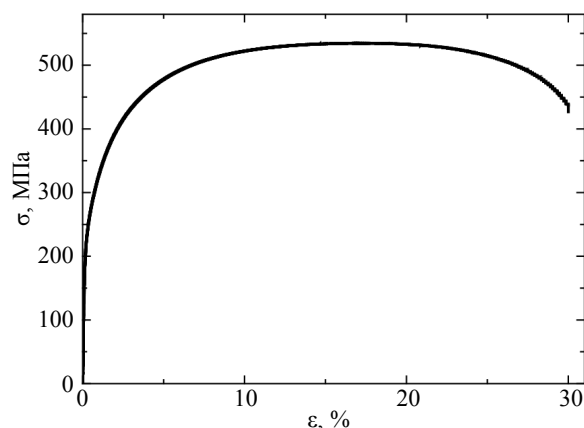


Рис. 2. Диаграмма нагружения стали 08Г2Б.

Далее образцы подвергали циклическим испытаниям по схеме отнулевого растяжения с амплитудой 300 МПа, что немного выше значения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ с частотой 3 Гц. Испытания проводили на сервогидравлической установке Instron 8801. Количество циклов n варьировали, в результате были получены образцы после 0, 30, 50, 100 и 300 тыс. циклов.

Измерения магнитных характеристик в замкнутой магнитной цепи осуществляли вдоль оси нагружения образцов с помощью гистерезисграфа Remagraph C-500. Напряженность внутреннего магнитного поля H достигала 600 А/см. Величину H измеряли с помощью магнитного потенциалметра. Из петель магнитного гистерезиса определяли коэрцитивную силу H_c и остаточную магнитную индукцию B_r по основной кривой намагничивания — максимальную магнитную проницаемость $\mu_{\text{макс}}$. Указанные магнитные характеристики также измеряли в средних полях при максимальной индукции в образце при $b_{\text{макс}} = 0,4$ Тл и слабых полях при $b_{\text{макс}} = 0,05$ Тл. Проведение измерений в средних и слабых полях обусловлено тем, что магнитные характеристики частного цикла перемагничивания могут иметь другие корреляционные связи со структурным и напряженно-деформированным состоянием [17], и в таких случаях требуется определить намагничивающие поля, при которых происходит это изменение. Погрешность измерения поля и индукции в максимальном приложенном поле и средних полях не превышала 3 %, в слабых (область Релея) — не более 8. Кроме того, определяли магнитную проницаемость в слабых магнитных полях (до 2,5 А/см) в двух различных магнитных состояниях: размагниченном (начальная проницаемость $\mu_{\text{нач}}$) и остаточно намагниченном после намагничивания до технического насыщения (обратимая проницаемость $\mu_{\text{обр}}$).

При измерениях в полузамкнутой магнитной цепи использовали в качестве первичного преобразователя П-образный приставной электромагнит с сечением полюсов 18×9 мм и расстоянием между ними 16 мм. Сигнал с измерительной катушки, расположенной на перемычке ярма электромагнита, поступал на канал измерения магнитного потока гистерезисграфа, а на канал напряженности магнитного поля — сигнал, пропорциональный величине намагничивающего тока в катушке преобразователя. Запись петли магнитного гистерезиса осуществляли при максимальном намагничивающем токе, равном 2,5 А, что обеспечивало получение петли магнитного гистерезиса, близких к предельным. Из петель определяли величину коэрцитивной силы H_{c3} . Измерения с помощью приставного магнитного устройства проводили как вдоль, так и поперек оси нагружения. Необходимость проведения измерений в двух взаимно перпендикулярных направлениях связана с возможным возникновением анизотропии напряжений после циклического нагружения образцов.

С помощью цифрового анализатора шумов Баркгаузена Rollscan 300 измеряли также среднеквадратичные значения напряжения U магнитных шумов Баркгаузена и число скачков Баркгаузена N за 10 циклов перемагничивания. В этом случае первичным преобразователем служил накладной датчик с сечением полюсов $3,5 \times 8,0$ мм и расстоянием между ними 3 мм. Амплитуду напряжения и частоту тока перемагничивания подбирали экспериментально для достижения наибольшей чувствительности — 5 В и 95 Гц соответственно. Измерение параметров шумов Баркгаузена осуществляли, размещая датчик в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль и поперек направления приложенной нагрузки. На каждом этапе нагружения проводили серию из пяти измерений, после чего полученные результаты усредняли. Максимальное отклонение измеренных величин от средних значений не превышало 5 %.

Измерение продольной $\lambda_{\parallel}$ и поперечной $\lambda_{\perp}$ магнитострикций образцов осуществляли с помощью разработанной в ИМАШ УрО РАН многоканальной прецизионной системы сбора данных (ССД) [18], реализующей аналого-цифровое преобразование интегрирующего типа с нелинейной шкалой и позволяющей измерять малые электрические величины с малыми погрешностями. Для преобразования магнитострикций 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 пластину, 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, имеющим недифференциальный вход, через согласующий усилитель. Все эти решения позволили получить разрешающую способность измерительной системы порядка десятых долей миллиОма. При измерениях исследуемый образец перемагничивали в пермеамetre, при этом внутреннее магнитное поле, напряженность которого измеряли с помощью С-образного потенциалметра, достигало 500 А/см. В результате измерений осуществляли запись полевых зависимостей продольной и поперечной магнитострикций.

Скорости продольной и поперечной упругих волн определяли по методике, описанной в [19, 20], с помощью дефектоскопа «АВГУР АРТ», разработанного в ООО «НПЦ «ЭХО+», с использованием антенной решетки в виде линейки из 32 пьезоэлементов размерами $0,9 \times 10$ мм, которые были установлены с зазорами между соседними пьезоэлементами 0,1 мм на рексолитовую призму (угол наклона призмы 0°). Каждый из элементов линейки поочередно служил излучателем зондирующего импульса и приемником эхосигнала, отраженного от противоположной стороны образца. Скорости звука определяли при ориентации антенной решетки вдоль направления приложения циклической нагрузки и поперек него. Погрешности определения скоростей звука не превышали 0,25 % [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены магнитные характеристики (коэрцитивная сила, остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость) образцов после испытаний на отнулевое циклическое растяжение, измеренные в замкнутой магнитной цепи как на предельном, так и на частных циклах магнитного гистерезиса, приведенные к соответствующим исходным значениям магнитных параметров в ненагруженном состоянии, в зависимости от количества циклов n . Зависимости магнитных характеристик частных циклов от количества циклов n имеют качественное согласие с зависимостями, полученными на предельных циклах перемагничивания. На начальной стадии циклического нагружения с ростом количества циклов наблюдается интенсивное изменение магнитных

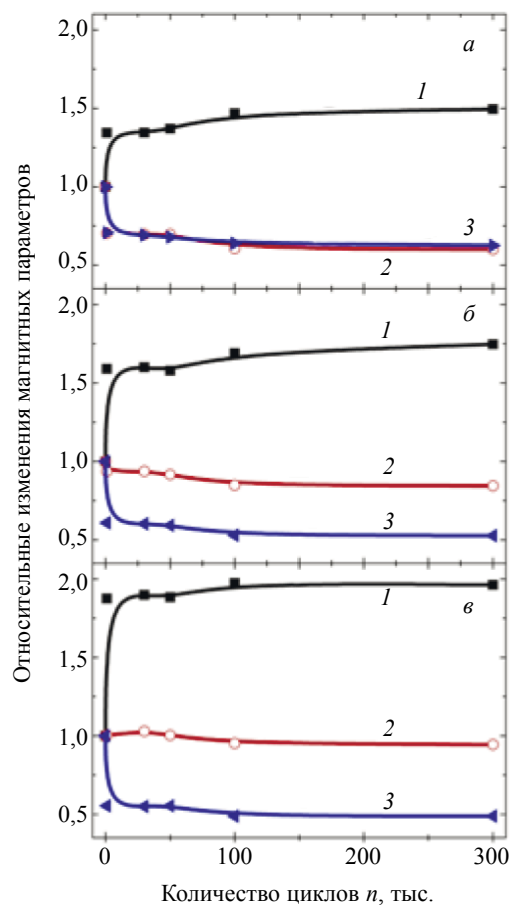


Рис. 3. Относительные изменения магнитных параметров (коэрцитивной силы (кривые 1), остаточной индукции (кривые 2) и максимальной магнитной проницаемости (кривые 3)), измеренных в условиях замкнутой магнитной цепи, в зависимости от количества циклов n : a — измерения на предельном цикле; $б$ — в средних полях; $в$ — в слабых.

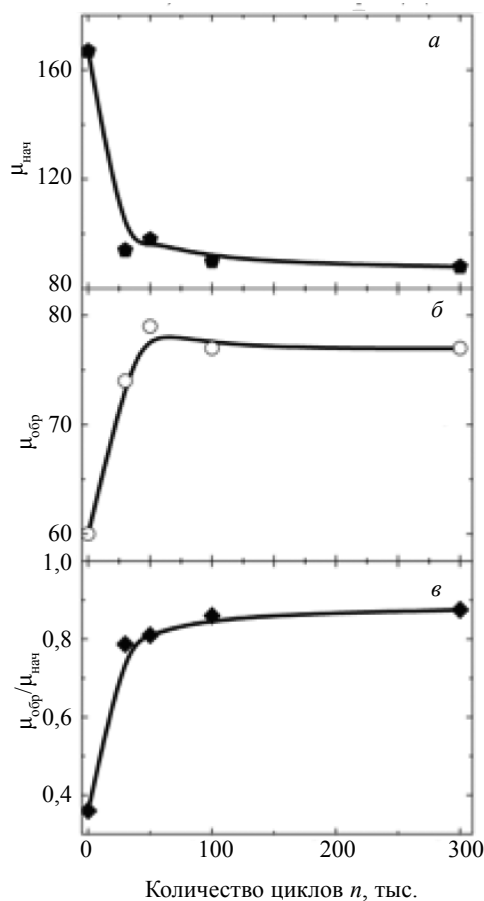


Рис. 4. Зависимости от n значений начальной магнитной проницаемости $\mu_{нач}$ (a), обратимой проницаемости в остаточном намагниченном состоянии $\mu_{обр}$ ($б$) и отношения $\mu_{обр}/\mu_{нач}$ ($в$).

характеристик. Так, значения остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости на предельных циклах магнитного гистерезиса уменьшаются более чем на 29 %, а коэрцитивная сила увеличивается на 34 %. В дальнейшем с ростом количества циклов магнитные характеристики изменяются менее заметно, в пределах 10 %.

На рис. 4 представлены зависимости от количества циклов n значений начальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{нач}}$, обратимой проницаемости в остаточно намагниченном состоянии после намагничивания до технического насыщения $\mu_{\text{обр}}$, а также отношения $\mu_{\text{обр}}/\mu_{\text{нач}}$ для нагруженных на разное количество циклов образцов. Отношение величин обратимой проницаемости, измеренной в остаточно намагниченном состоянии, к величине начальной проницаемости монотонно увеличивается с ростом количества циклов во всем диапазоне их изменения. В связи с принципиально разным характером изменения величин $\mu_{\text{обр}}$ и $\mu_{\text{нач}}$ от n отношение проницаемостей демонстрирует большую чувствительность к изменению количества циклов по сравнению со всеми ранее рассмотренными параметрами. Величина $\mu_{\text{обр}}/\mu_{\text{нач}}$ для образца после 300 тыс. циклов нагружения превышает аналогичную для образца в ненагруженном состоянии более чем в 2,4 раза.

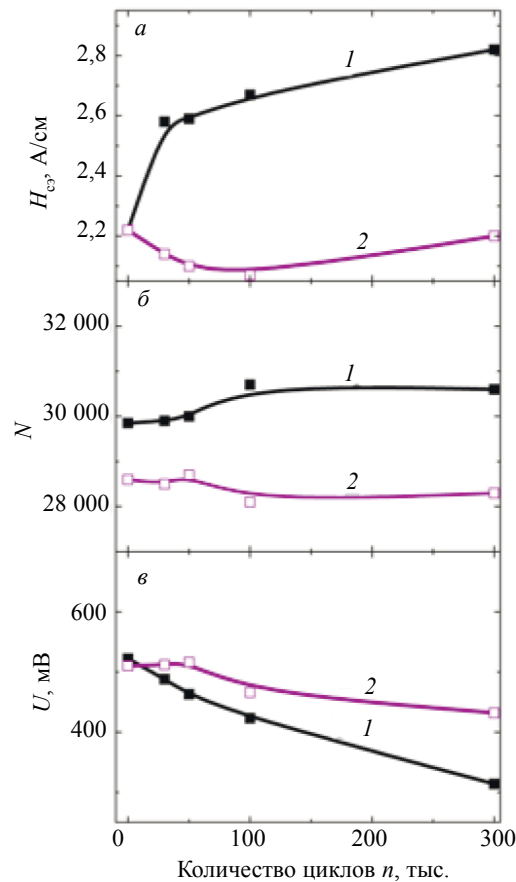


Рис. 5. Зависимости от количества циклов n значений коэрцитивной силы $H_{сз}$ (а), числа скачков Баркгаузена N (б) и средне-квадратичных значений напряжения U (в), измеренных с помощью приставных магнитных устройств.

Кривые 1 — приставные датчики расположены вдоль оси нагружения, 2 — поперек.

Результаты измерений, проведенных с использованием накладных преобразователей, представлены на рис. 5. Как известно, направлениями экстремальных (наибольших и наименьших) значений коэрцитивной силы при одноосном нагружении являются 0 и 90° к оси приложения нагрузки. На рис. 5 показаны зависимости от количества циклов n значений коэрцитивной силы $H_{сз}$, числа скачков Баркгаузена N , а также среднеквадратичных значений напряжения U магнитных шумов Баркгаузена, измеренных при расположении преобразователей на исследуемых образцах соответственно вдоль и поперек направления приложения нагрузки.

В случае измерений вдоль направления растяжения зависимость значений $H_{с3}(n)$ (рис. 5а, в, кривая 1) качественно подобна зависимостям коэрцитивной силы от n на рис. 3: так же, как и в замкнутой магнитной цепи на предельных и частных циклах перемангничивания, с увеличением количества циклов испытаний значения $H_{с3}$ возрастают. В отличие от этого коэрцитивная сила, измеренная с помощью накладного преобразователя в направлении, перпендикулярном оси нагружения, изменяется неоднозначно, с образованием минимума (рис. 5а, кривая 2).

Увеличение значений продольной коэрцитивной силы после циклического нагружения по сравнению с ненагруженным состоянием можно объяснить следующим образом: в процессе разгрузки после испытаний на отнулевое циклическое растяжение в существенной части зерен вдоль направления растяжения возникают значительные остаточные сжимающие напряжения [21—26], при этом создаются предпосылки для формирования магнитной текстуры типа «плоскость легкого намагничивания», при которой векторам спонтанной намагниченности энергетически выгоднее выстроиться в плоскости, перпендикулярной оси растяжения и, соответственно, намагничивающему и перемангничивающему полю, вследствие этого процессы перемангничивания затрудняются, что и приводит к росту значений коэрцитивной силы и, соответственно, уменьшению значений остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости. При этом в перпендикулярном оси растяжения направлении играют роль остаточные напряжения растяжения, что и обуславливает неоднозначный характер изменения коэрцитивной силы при ее измерении в поперечном нагруженном направлении (см. рис. 5а, кривая 2), поскольку в этом случае схема измерений соответствует измерениям магнитных характеристик в продольном направлении под действием растягивающей нагрузки.

Среднеквадратичные значения напряжений шумов Баркгаузена U имеют противоположный характер изменения в зависимости от параметра n по сравнению с $H_{с3}(n)$. При измерениях вдоль направления растяжения (см. рис. 5в, кривая 1) они монотонно снижаются с ростом количества циклов испытаний (приращение составляет 80 % по отношению к исходному значению без нагрузки). При расположении датчика в перпендикулярном оси нагружения направлении измеренные значения U с увеличением количества циклов изменяются неоднозначно, с образованием максимума (см. рис. 5в, кривая 2). Число скачков Баркгаузена с ростом количества циклов как в продольном, так и поперечном направлениях изменяется несущественно (см. рис. 5б).

Расхождение точек, полученных в двух направлениях для образца в исходном состоянии (см. рис. 5, кривые 1 и 2), можно объяснить, в частности, условиями измерений: при расположении датчика перпендикулярно направлению нагрузки, в отличие от продольных измерений, края полюсов датчика находились в непосредственной близости от краев образца.

На рис. 6 приведены полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ для образцов, испытанных на отнулевое циклическое растяжение с различным количеством циклов n . Для образца в недеформированном состоянии на полевой зависимости дифференциальной магнитной проницаемости наблюдается один пик, в то время как на циклически нагруженных образцах можно наблюдать наличие двух максимумов. Первый пик наблюдается в отрицательных полях, второй — в положительных, то есть в области полей от насыщения до остаточной индукции. На рис. 6 показаны только те участки $\mu_{\text{диф}}(H)$, на которых формируются

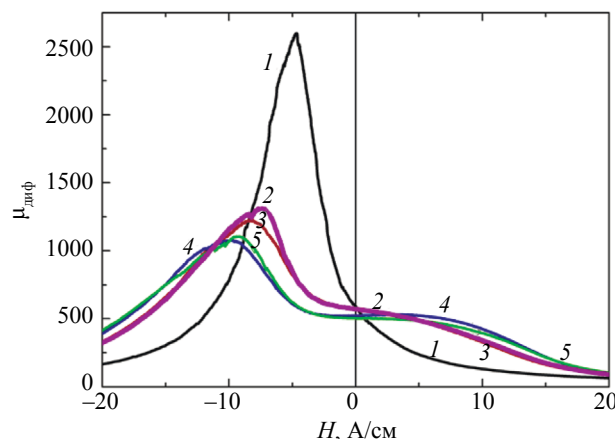


Рис. 6. Дифференциальная магнитная проницаемость в зависимости от напряженности магнитного поля для образцов, испытанных на отнулевое циклическое растяжение с различным количеством циклов n .

Кривая 1 — $n = 0$; 2 — 30; 3 — 50; 4 — 100; 5 — 300 тыс. циклов.

пики. Максимумы дифференциальной магнитной проницаемости, локализующиеся в отрицательных полях, по величине заметно больше пиков, наблюдаемых у деформированных образцов в положительных магнитных полях. При этом можно отметить, что с увеличением количества циклов высота пика в отрицательных полях на полевой зависимости уменьшается, а его локализация смещается в сторону более сильных полей. В то же время на кривых $\mu_{\text{диф}}(H)$ для циклически нагруженных образцов с ростом количества циклов пик, расположенный в положительных полях, становится более выраженным, а его расположение также смещается в сторону более сильных полей. Результаты согласуются с данными, полученными в [22, 27—29], для образцов, деформированных путем статического одноосного растяжения.

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. После циклического растяжения в существенной части зерен вдоль направления проведенного растяжения возникают значительные остаточные сжимающие напряжения. В этом направлении возникают предпосылки для формирования наведенной магнитной анизотропии типа «плоскость легкого намагничивания», которая еще до изменения знака магнитного поля вынуждает векторы спонтанной намагниченности выстроиться в направлении, перпендикулярном оси растяжения и, соответственно, уменьшающемуся приложенному магнитному полю и направлению измерений. При уменьшении намагничивающего поля, направленного вдоль оси растяжения, до некоторой величины энергии магнитного поля становится недостаточно для удержания векторов намагниченности перпендикулярно этой плоскости (магнитоупругая энергия становится больше энергии магнитостатической), большой вклад в процесс перемагничивания начинают вносить необратимые скачки 90-градусных доменных границ (ДГ), скачки в наиболее энергетически выгодное легкое направление (с небольшой добавкой обратимого вращения намагниченности, которое есть всегда). При изменении знака магнитного поля, то есть в области отрицательных магнитных полей, существенный вклад начинают вносить необратимые смещения 180° ДГ, следствием чего является формирование максимума в отрицательных полях на полевой зависимости дифференциальной магнитной проницаемости.

По наличию, положению и высоте пика в области положительных полей на зависимости дифференциальной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля можно судить о величине деформации, накопленной в изделии при циклическом нагружении.

На рис. 7 приведены зависимости линейной продольной $\lambda_{\parallel}$ (а) и поперечной $\lambda_{\perp}$ (б) магнитострикций от приложенного магнитного поля для образцов, испытанных на отнулевое циклическое растяжение с различным количеством циклов n . В исходном состоянии при $n = 0$ продольная магнитострикция с увеличением напряженности магнитного поля сначала возрастает до максимума, затем уменьшается, достигает нулевого значения и продолжает уменьшаться уже с отрицательным знаком (кривая 1 на рис. 7а). Для образцов, подвергнутых циклическому нагружению (кривые 2 и 3 на рис. 7а), наблюдается изменение характера полевой зависимости продольной магнитострикции:

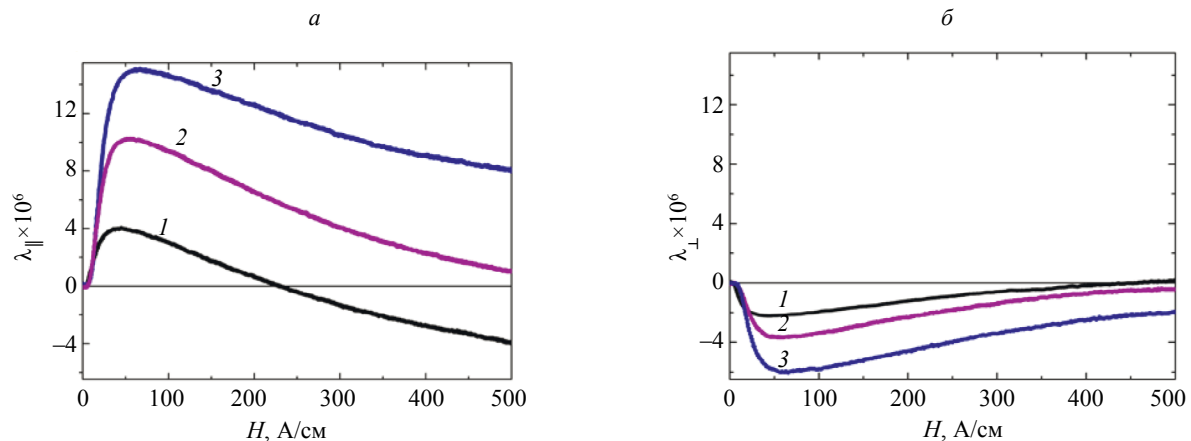


Рис. 7. Полевые зависимости продольной (а) и поперечной (б) магнитострикций для образцов, испытанных на отнулевое циклическое растяжение с различным количеством циклов n .

Кривые 1 — $n = 0$; 2 — 30; 3 — 100 тыс. циклов.

при всех значениях напряженности магнитного поля $\lambda_{\parallel}(H)$ положительна. Следует отметить, что с ростом количества циклов увеличивается площадь положительного участка полевой зависимости магнитострикции и растет величина ее максимума.

Для циклически ненагруженного образца ($n = 0$) поперечная магнитострикция $\lambda_{\perp}(H)$ с ростом напряженности магнитного поля сначала убывает до минимума, затем растет, достигает нулевого значения и продолжает увеличиваться с положительным знаком (кривая 1 на рис. 7б). Поперечная магнитострикция циклически нагруженных образцов во всем диапазоне изменения напряженности магнитного поля имеет отрицательный знак. Как и в случае измерения продольной магнитострикции, с увеличением количества циклов происходят увеличение площади отрицательного участка поперечной магнитострикции и рост абсолютной величины ее минимума.

Наблюдаемые изменения зависимостей $\lambda_{\parallel}(H)$ и $\lambda_{\perp}(H)$ для образцов, подвергнутых отнулевому циклическому растяжению на различное количество циклов, аналогичны поведению полевых зависимостей продольной и поперечной магнитострикции при одноосном статическом сжатии [23, 24, 30, 31] и являются свидетельством формирования остаточных сжимающих напряжений различного уровня вдоль оси циклического растяжения и остаточных растягивающих напряжений — в поперечном направлении.

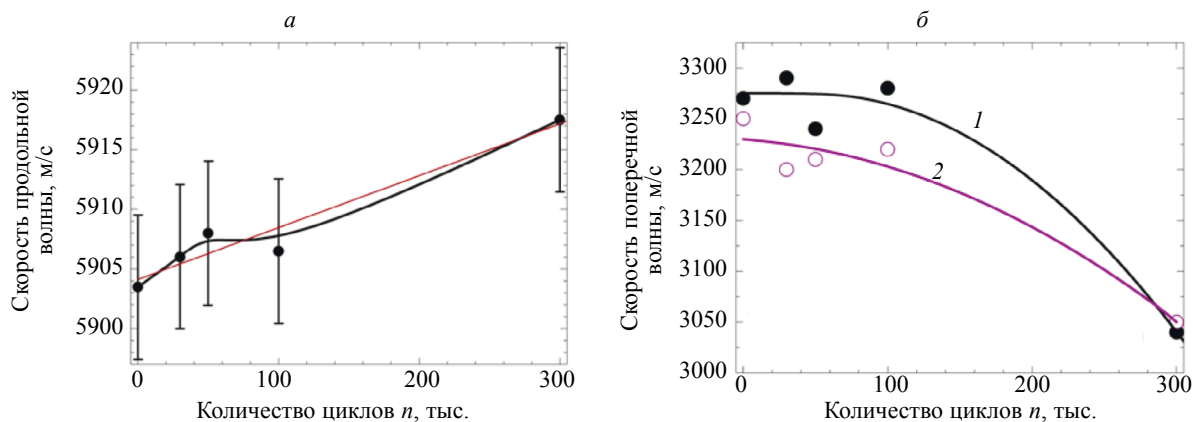


Рис. 8. Зависимости от количества циклов нагружения скоростей продольной (а) и поперечной (б) волн: 1 (•) — вдоль направления нагрузки; 2 (○) — поперек.

Эксперименты по определению скоростей продольной и поперечной упругих волн, результаты которых представлены на рис. 8, показали, что скорость продольной волны практически не зависит от ориентации антенной решетки. Кроме того, скорость продольной волны в пределах погрешности не изменяется с изменением числа циклов нагружения.

В отличие от случая продольной волны, для поперечной обнаружена заметная анизотропия скорости распространения при различной ориентации антенной решетки: при ее ориентации вдоль направления приложения нагрузки скорость поперечной волны примерно на 1 % больше, чем при поперечном расположении антенной решетки. Однако следует отметить, что после 300 000 циклов нагружения отнулевым растяжением эта анизотропия исчезает. Скорости поперечных волн при различной ориентации антенной решетки с увеличением количества циклов нагружения от 0 до 300 000 монотонно уменьшаются более чем на 6 %, то есть примерно в 25 раз превышает интервал погрешностей определения скоростей упругих волн. Такое поведение скорости упругой волны соответствует современным представлениям об акустоупругости [32]: с увеличением количества циклов нагружения, то есть накоплением усталостной поврежденности материала, увеличивается число центров рассеяния упругих волн и, соответственно, уменьшается скорость распространения этих волн. Это обстоятельство позволяет рассматривать величину скорости поперечной упругой волны как перспективный информативный параметр накопления усталостной деградации материала при отнулевом циклическом нагружении с амплитудой нагрузки, примерно соответствующей пределу текучести материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено влияние циклического нагружения по схеме отнулевого растяжения с амплитудой, примерно соответствующей условному пределу текучести, на магнитные и акустические параметры горячекатаной трубной стали 08Г2Б.

Установлено, что среднеквадратичные значения напряжений магнитных шумов Баркгаузена, величина скорости поперечной упругой волны, а также отношение обратимой проницаемости в остаточном намагниченном состоянии после намагничивания до технического насыщения к начальной магнитной проницаемости однозначно изменяются с увеличением количества циклов нагружения, что позволяет использовать данные параметры для разработки методов оценки состояния металлоконструкций, работающих в условиях циклических нагрузок.

По наличию на полевых зависимостях дифференциальной магнитной проницаемости экстремумов в области положительных полей, величине полей, при которых они формируются, а также величине экстремумов можно судить о величине деформации, накопленной в изделии при циклическом нагружении.

Закономерности изменения полевых зависимостей продольной и поперечной магнитоэлектрических исследованной стали с увеличением числа циклов отнулевого растяжения аналогичны закономерностям изменения этих характеристик при возрастании напряжений при одноосном статическом сжатии, что может свидетельствовать о формировании преимущественно сжимающих остаточных напряжений вдоль направления приложения циклической нагрузки и растягивающих остаточных напряжений — в поперечном.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки методов неразрушающего контроля усталостной деградации материала в условиях эксплуатации.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № АААА-А18-118020790148-1 и проекту УрО РАН № 18-9-1-20 (№ АААА-А18-118020790149-8). При выполнении настоящей работы было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2002. 248 с.
2. Терентьев В.Ф., Петухов А.Н. Усталость высокопрочных металлических материалов. М.: ИМЕТ—ЦИАМ, 2013. 514 с.
3. Шанявский А.А. Масштабные уровни процессов усталости металлов // Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17. № 6. С. 87—98.
4. Новиков И.И., Ермишкин В.А. Физическая механика реальных материалов. М.: Наука, 2004. 328 с.
5. Емельянов И.Г., Миронов В.И. Долговечность оболочечных конструкций. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. 220 с.
6. Dobmann G., Lang M. On-line monitoring of fatigue in the LCF and HCF range by using micro-magnetic NDT at plain carbon and austenitic stainless steel / Proc. of the 8th Japanese-German Joint Seminar on Structural Integrity and NDE in Power Engineering. 2001. Tokyo. P. 357—364.
7. Туликин Д.А. Термоэлектрический метод контроля усталостных повреждений материалов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2005. № 11. С. 32, 33.
8. Ермишкин В.А., Мурат Д.П., Подбельский В.В. Применение фотометрического анализа структурных изображений для оценки сопротивления усталостному разрушению // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 2. С. 11—21.
9. Горкунов Э.С., Смирнов С.В., Задворкин С.М., Вичужанин Д.И., Митропольская С.Ю. Влияние накопленной деформации сдвига и поврежденности при кручении на магнитные характеристики стали // Физическая мезомеханика. 2004. № 1—2. С. 311—314.
10. Горкунов Э.С., Смирнов С.В., Родионова С.С. Влияние пластической деформации при гидростатическом давлении на поврежденность и магнитные характеристики низкоуглеродистой стали 3сп // Физическая мезомеханика. 2003. № 5. С. 101—108.
11. Gary S. Schajer. Practical residual stress measurement methods. Vancouver, Canada: John Wiley & Sons Ltd, 2013. 310 p.
12. 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. [Kostin V.N., Vasilenko O.N., Filatenkov D.Yu., Chekasina Yu.A., Serbin E.D. Magnetic and magnetoacoustic testing parameters of the stressed-strained state of carbon steels that were subjected to a cold plastic deformation and annealing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. V. 51. No. 10. P. 624—632.]
13. Мирошниченко Б.И. Роль напряженного состояния в формировании дефектов стресс-коррозии в трубопроводах // Дефектоскопия. 2008. № 6. С. 42—51. [Miroshnichenko B.I. The role of a stressed state in the formation of stress-corrosion flaws in pipelines // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2008. V. 44. No. 6. P. 403—408.]

14. *Mihovski M., Mirchev Y., Chukachev H., Sergienko V.* Assessment of mechanically stressed state in pipelines according to Russian standards // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1785. 040038. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4967095>.
15. *Mirchev Y., Chukachev P., Mihovski M.* Methods for evaluation of mechanical stress condition of materials // Matec Web of Conferences. 2018. V. 145. 05008. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814505008>.
16. *Мужицкий В.Ф., Попов Б.Е., Безлюдько Г.Я., Зарудный В.В., Левин Е.А.* Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций грузоподъемных кранов // Дефектоскопия. 1996. № 2. С. 12—18.
17. *Горкунов Э.С., Якушенко Е.И., Задворкин С.М., Мушников А.Н.* Влияние упругих деформаций на магнитные характеристики хромоникелевых сталей // Физика металлов и металловедение. 2015. Т. 116. № 2. С. 156—164.
18. *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. V. 6. No. 2. P. 149—155.
19. *Базулин Е.Г., Исмаилов Г.М.* Измерение скорости звука и толщины в плоскопараллельных объектах контроля с использованием двух антенных решеток // Дефектоскопия. 2013. № 8. С. 20—34. [*Bazulin E.G., Ismailov G.M.* Simultaneous measurement of the velocity of an ultrasonic shear wave and the thickness of a test object with plane-parallel boundaries using two antenna arrays // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2013. V. 49. No. 8. P. 446—457.]
20. *Bazulin E.G., Vopilkin A.Kh.* Reference-Free Method for Thickness Gaging of a Test Object and Measuring the Speed of Longitudinal and Transverse Waves in It Based on Echo Signals Picked by an Antenna Array // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 6. P. 463—475. [*Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х.* Безэталонный метод измерения толщины объекта контроля и скорости продольной и поперечной волны в нём по эхосигналам, измеренным антенной решёткой // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 40—52.]
21. *Кулеев В.Г., Царькова Т.П., Ничипурук А.П., Воронин В.И., Бергер И.Ф.* Исследование причин существенных различий величин коэрцитивной силы, остаточной намагниченности и начальной магнитной проницаемости ферромагнитных сталей в нагруженном и разгруженном состояниях при их пластическом растяжении // ФММ. 2007. Т. 103. Вып. 2. С. 136—146.
22. *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. [*Kuleev V.G., Tsar'kova T.P., Sazhina E. Yu., Doroshek A.S.* On the influence of plastic deformations of low-carbon ferromagnetic steels on the changes in the shapes of their hysteresis loops and the field dependences of the differential permeability // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. V. 51. No. 12. P. 738—749.]
23. *Bulte D.P., Langman R.A.* Origins of magneto-mechanical effect // J. of Mag. and Magnetic Materials. 2002. V. 251. P. 229—243.
24. *Abukus S.* Magnetism Studies of Residual Stress in Iron and Steel Induced by Uniaxial Deformation // Jap. Journal of Appl. Phys. 1977. V. 16. No. 7. P. 1161—1170.
25. *Gorkunov E.S., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M., Putilova E.A.* Comparative Analysis of the Magnetic Characteristics of Plastically Deformed Metal in Different Zones of a Welded Pipe under Elastic Deformation // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. No. 9. P. 636—643. [*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.]
26. *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. [*Gorkunov E.S., Subachev Yu. V., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M.* The Influence of a Preliminary Plastic Deformation on the Behavior of the Magnetic Characteristics of High Strength Controllably Rolled Pipe Steel under an Elastic Uniaxial Tension (Compression) // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. V. 51. No. 9. P. 563—572.]
27. *Ничипурук А.П., Розенфельд Е.В., Огнева М.С., Сташков А.Н., Королев А.В.* Экспериментальный метод оценки критических полей смещающихся доменных границ в пластически деформированных растяжением проволоках из низкоуглеродистой стали // Дефектоскопия. 2014. № 10. С. 18—26. [*Nichipuruk A.P., Rozenfel'd E.V., Ogneva M.S., Stashkov A.N., Korolev A.V.* An experimental method for evaluating the critical fields of moving domain boundaries in plastically tension-deformed low-carbon wires // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. No. 10. P. 566—573.]
28. *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. [*Ogneva M.S., Nichipuruk A.P., Stashkov A.N.* Local determination of the field of induced magnetic anisotropy and the level of residual mechanical stresses in tensile-deformed bodies made of low-carbon steels // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. V. 52. No. 11. P. 617—622.]

29. Kuleev V.G., Stashkov A.N., Tsar'kova T.P., Nichipuruk A.P. Experimental Determination of Critical Fields of 90-Degree Domain Wall Displacement in Plastically Deformed Low-Carbon Steels // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 10. P. 711—716. [Кулеев В.Г., Сташков А.Н., Царькова Т.П., Ничипурук А.П. Экспериментальное нахождение критических полей смещения 90-градусных доменных границ в пластически деформированных малоуглеродистых сталях // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 37—42.]

30. 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. [Gorkunov E.S., Subachev Yu.V., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M. The Influence of Elastic Deformations on the Hysteresis Properties of a Two-Layer Ferromagnet Composed of Components with Magnetostrictions of Opposite Signs // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. No. 8. P. 469—480.]

31. Serbin E.D., Kostin V.N. On the Possibility of Evaluating Magnetostriction Characteristics of Bulk Ferromagnets Based on Their Magnetic Properties // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 5. P. 378—383.

32. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И. Введение в акустоупругость. Киев: Наукова думка, 1977. 151 с.