



The Effect of Initial Stress-Strain States on the Magnetic Behaviour of 08G2B Hot-Rolled Steel under Elastic Uniaxial Tension

Eduard GORKUNOV, Anna POVOLOTSKAYA, Sergey ZADVORKIN,
Evgeniia PUTILOVA, Aleksandr MUSHNIKOV

Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia,
e-mail: us@imach.uran.ru

Abstract

The paper reports on the results of studying the effect of preliminary zero-to-tension cycling with different number of cycles on the magnetic parameters of the 08G2B hot-rolled steel under subsequent elastic tension. The cyclic loading prehistory affects the magnetic behavior of the material during its subsequent elastic deformation since preliminary cycling induces various compressive residual stresses along the direction of loading. The ranges of applied tensile stresses have been determined where the magnetic characteristics measured on specimens cyclically pre-deformed with different number of cycles vary uniquely, and this principally enables these parameters to be used for the development of methods for estimating the operational stresses in a 08G2B steel products taking into account the prehistory.

Keywords: Preliminary cyclic loading, tension, magnetostriction, coercive force, attached transducer

Влияние исходного напряженно-деформированного состояния на поведение магнитных характеристик горячекатаной стали 08Г2Б при упругом одноосном растяжении

Эдуард ГОРКУНОВ, Анна ПОВОЛОЦКАЯ, Сергей ЗАДВОРКИН,
Евгения ПУТИЛОВА, Александр МУШНИКОВ

1. Введение

Неразрушающие методы контроля активно применяются для диагностики состояния стальных конструкций – трубопроводов, подъемных механизмов, объектов железнодорожного транспорта. Особым аспектом в диагностике является оценка параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) и остаточного ресурса таких конструкций. Одним из перспективных направлений решения таких задач представляется применение магнитных методов контроля, чему посвящено большое количество работ, например, [1-5]. Исследования в данных работах направлены главным образом на создание методов контроля упругих деформаций, возникающих в процессе эксплуатации изделий из ферромагнитных конструкционных материалов. Но в большинстве этих работ не принимается во внимание предыстория материала, в то время как текущее состояние металлоконструкций, как правило, существенно отличается от заложенного в проектной документации и от состояния при выпуске с завода-производителя. В [3, 4] показано, что предыстория материала в виде пластической деформации статическим растяжением оказывает значительное влияние на поведение его магнитных характеристик при последующем упругом деформировании, и игнорирование этого обстоятельства может привести к дополнительным ошибкам при магнитном контроле параметров НДС и оценке остаточного ресурса стальных изделий

и, тем самым, повышению вероятности возникновения аварийных ситуаций. С учетом того, что в течение своего жизненного цикла изделия подвергаются чаще всего циклическим нагрузкам, представляет интерес исследование, аналогичное проведенным в [3, 4], 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.

2. Материалы и методики исследований

Для исследований из прямошовной трубы $\varnothing 1420 \times 15,7$ мм, изготовленной из горячекатаной стали 08Г2Б, были вырезаны плоские образцы с головками вдоль направления прокатки. Данная сталь имела такой же химический состав, как и в работах [3, 4]. 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 снятия внутренних напряжений.

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, 30 тыс., 50 тыс., 100 тыс. и 300 тыс. 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 $\mu_{\text{макс}}$. Указанные магнитные характеристики также измеряли в средних полях при максимальной индукции в образце $b_{\text{макс}} = 0,4$ Тл и слабых полях (область Релея) при $b_{\text{макс}} = 0,05$ Тл. Кроме того, определяли магнитную проницаемость в слабых магнитных полях (до 2,5 А/см) в двух различных магнитных состояниях: в размагниченном (начальная проницаемость $\mu_{\text{нач}}$) и в остаточно намагниченном состоянии после намагничивания до технического насыщения (обратимая проницаемость $\mu_{\text{обр}}$).

При измерениях коэрцитивной силы вдоль и поперек оси нагружения H_{c3}^{\parallel} и H_{c3}^{\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 $3,5 \times 8,0$ 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 λ образцов осуществляли с помощью разработанной в ИМАШ УрО РАН многоканальной прецизионной системы сбора данных (ССД), 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 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, имеющей недифференциальный вход, через согласующий усилитель. 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 магнитострикции.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны зависимости полученных в условиях замкнутой магнитной цепи магнитных характеристик образцов от приложенных напряжений σ при упругом статическом растяжении после их предварительного циклического нагружения на различное количество циклов. Измерения проведены как на предельном, так и на частных циклах перемагничивания. Зависимости магнитных характеристик частных циклов от приложенных напряжений (рис. 1 II, III), имеют качественное согласие с зависимостями, полученными в максимальном приложенном поле (рис. 1 I). Можно отметить, что при статическом растяжении для образцов после различного количества циклов предварительного нагружения характер изменения их магнитных параметров образцов одинаков. В диапазоне приложенных растягивающих напряжений от 0 до 200 МПа поведение измеренных магнитных характеристик соответствует приведенным в литературе данным [6-11]: с увеличением растягивающих напряжений коэрцитивная сила H_c , остаточная индукция B_r и максимальная магнитная проницаемость μ_{\max} изменяются неоднозначно, с образованием экстремумов различной степени «выраженности». Зависимости $H_c(\sigma)$ имеют минимумы, а зависимости $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\max}(\sigma)$ – максимумы. Появление этих экстремумов объясняется особенностями проявления магнитоупругого эффекта в сплавах на основе α -железа [12].

Как видно из рис. 1, с ростом количества циклов предварительного циклического нагружения образцов наблюдаемые экстремумы смещаются в область больших напряжений статического растяжения σ (это более заметно выражено на зависимостях $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\max}(\sigma)$), то есть расширяется диапазон σ , в котором магнитные характеристики образцов изменяются монотонно. Согласно работе [7] минимумы на зависимостях $H_c(\sigma)$ (и соответственно максимумы на зависимостях $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\max}(\sigma)$) наблюдаются при тех величинах приложенных напряжений, при которых в некоторой части объема исследуемого объекта происходит компенсация внутренних сжимающих напряжений внешними растягивающими. Таким образом, сдвиг экстремумов на зависимостях $H_c(\sigma)$, $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\max}(\sigma)$ в сторону больших значений σ свидетельствует об усилении остаточных напряжений сжатия с ростом количества циклов предварительного циклического

нагружения.

Сравнение приведенных на рис. 1 результатов с результатами работ [3, 4] 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 может быть обусловлено остаточными напряжениями, вносимыми циклическим нагружением.

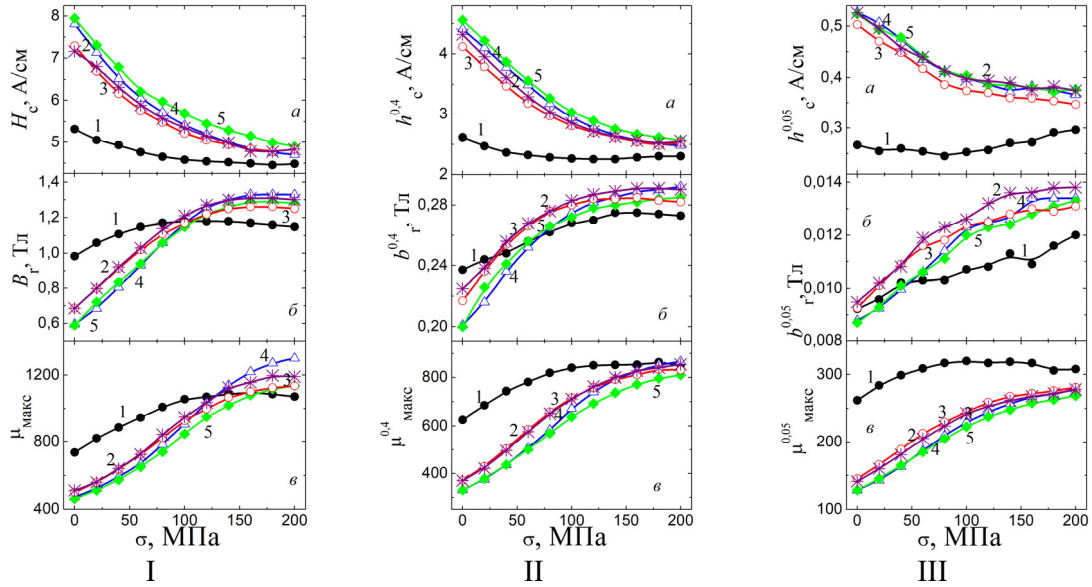


Рис. 1. Зависимости от приложенных растягивающих напряжений значений коэрцитивной силы (а), остаточной индукции (б) и максимальной магнитной проницаемости (в), измеренных в условиях замкнутой магнитной цепи на образцах, предварительно циклически деформированных на различное количество циклов: кривая 1 (●) – $n = 0$; 2 (*) – 30; 3 (○) – 50; 4 (Δ) – 100; 5 (◆) – 300 тыс. циклов. (I) – измерения на предельном цикле; (II) – в средних полях; (III) – в слабых полях.

На рис. 2 представлены зависимости от приложенных растягивающих напряжений значений начальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{нач}}$, обратимой проницаемости в остаточно намагниченном состоянии после намагничивания до технического насыщения $\mu_{\text{обр}}$, а также отношения $\mu_{\text{обр}}/\mu_{\text{нач}}$ при упругом деформировании образцов после предварительного их циклического нагружения на различное количество циклов.

Зависимости $\mu_{\text{обр}}(\sigma)$, $\mu_{\text{нач}}(\sigma)$ и $\mu_{\text{обр}}/\mu_{\text{нач}}(\sigma)$ изменяются немонотонно, с образованием экстремумов для всех образцов с различным исходным напряженно-деформированным состоянием. С ростом количества циклов предварительного циклического нагружения образцов наблюдаемые экстремумы смещаются в область больших напряжений. При этом, вследствие принципиально разного характера изменения зависимостей $\mu_{\text{обр}}(\sigma)$ и $\mu_{\text{нач}}(\sigma)$, отношение проницаемостей демонстрирует большую чувствительность к изменению величины приложенных напряжений по сравнению со всеми рассмотренными выше параметрами.

На рис. 3 (I, II) представлены зависимости от приложенных растягивающих напряжений значений коэрцитивной силы (H_{c3}^{\parallel} и H_{c3}^{\perp}) при квазистатическом намагничивании 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 рис. 3 можно видеть качественное подобие зависимостей $H_c(\sigma)$ и $H_{c3}^{\parallel}(\sigma)$, измеренных на образцах в условиях замкнутой магнитной цепи и с помощью ПМУ в продольном направлении соответственно.

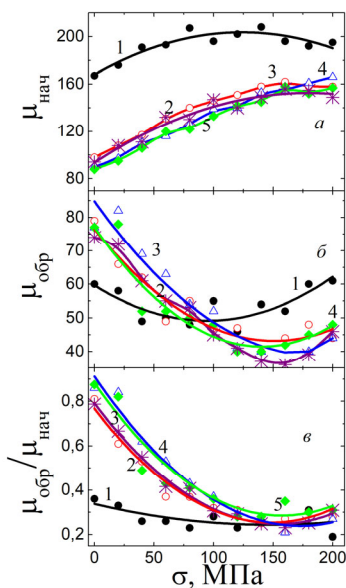


Рис. 2. Зависимости от приложенных растягивающих напряжений значений начальной магнитной проницаемости $\mu_{нач}$ (а), обратной проницаемости в остаточно намагниченном состоянии $\mu_{обр}$ (б) и отношения $\mu_{обр}/\mu_{нач}$ (в) для образцов, предварительно циклически деформированных на различное количество циклов: кривая 1 (●) – $n = 0$; 2 (*) – 30; 3 (○) – 50; 4 (Δ) – 100; 5 (◆) – 300 тыс. циклов.

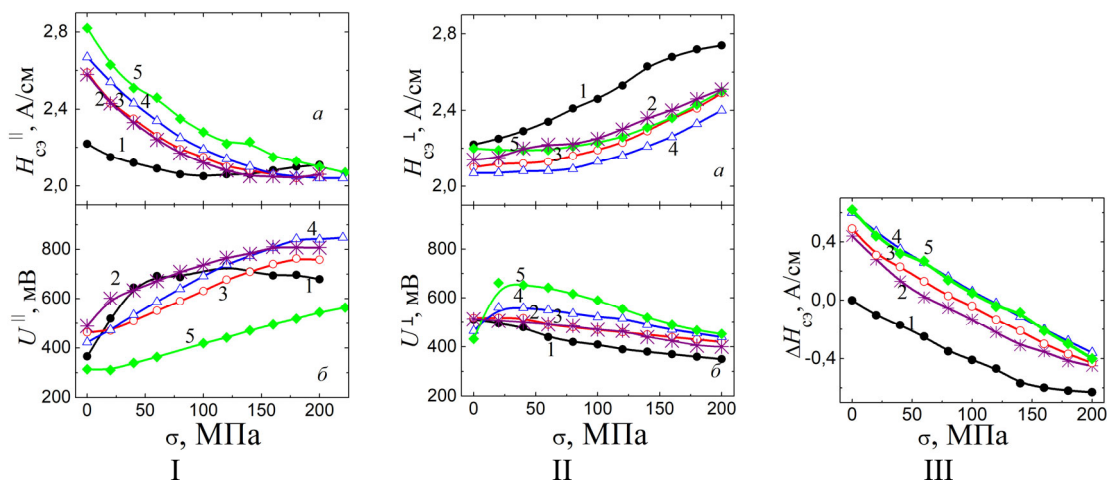


Рис. 3. Зависимости $H_{c3}^{\parallel}(\sigma)$ (Ia), $H_{c3}^{\perp}(\sigma)$ (IIa), $U^{\parallel}(\sigma)$ (Iб), $U^{\perp}(\sigma)$ (IIб) и $\Delta H_{c3}(\sigma)$ (III). Измерения проведены с помощью ПМУ на образцах, предварительно циклически деформированных на различное количество циклов: кривая 1 (●) – $n = 0$; 2 (*) – 30; 3 (○) – 50; 4 (Δ) – 100; 5 (◆) – 300 тыс. циклов. (I) – расположение датчика вдоль оси нагружения; (II) – поперек оси нагружения.

Характер зависимостей коэрцитивной силы H_{c3}^{\perp} , измеренной с помощью приставного датчика в поперечном направлении, от приложенных растягивающих напряжений изменяется с возрастанием количества циклов предварительного циклического нагружения: значения H_{c3}^{\perp} образцов в исходном состоянии ($n = 0$) и после 30 тыс. и 50 тыс. циклов монотонно увеличиваются с ростом σ (кривые 1, 2 и 3 на рис. 3 II, *a*), в то время как зависимости $H_{c3}^{\perp}(\sigma)$, соответствующие образцам, циклически нагруженным на 100 тыс. и 300 тыс. циклов (кривые 4 и 5 на рис. 3 II, *a*) неоднозначны, с минимумом. Такие особенности поведения зависимостей $H_{c3}^{\perp}(\sigma)$ обусловлены следующим. Как уже отмечалось, 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, $\Delta H_{c3}(\sigma)$, где $\Delta H_{c3} = H_{c3}^{\parallel} - H_{c3}^{\perp}$, как видно из рис. 3(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 $\Delta H_{c3}(\sigma)$ 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. 4*a* приведены полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ для образца, подвергнутого предварительно на отнулевое циклическое растяжение на 100 тыс. 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. 4*a* показаны только те участки $\mu_{\text{диф}}(H)$, на которых формируются пики.

Формирование двух пиков на зависимостях $\mu_{\text{диф}}(H)$ у циклически деформированного образца можно объяснить следующим образом. С ростом количества циклов после циклического деформирования в образцах вдоль оси отнулевого растяжения предварительного циклического нагружения создаются 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, большой вклад в процесс перемагничивания начинают вносить необратимые скачки 90-градусных доменных границ 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° доменных границ, следствием чего является формирование максимума в отрицательных полях на полевой зависимости дифференциальной магнитной проницаемости. С увеличением статических растягивающих напряжений высота пика $\mu_{\text{диф макс}}$ в отрицательных полях на полевой зависимости для образца, предварительно циклически деформированного на 100 тыс. 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.

На рис. 4 (б, в) представлены зависимости величины максимума дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф макс}}$ и поля максимума дифференциальной магнитной проницаемости $H_{\mu_{\text{диф макс}}}$ 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 $\mu_{\text{диф макс}}$ и $H_{\mu_{\text{диф макс}}}$ изменяются монотонно.

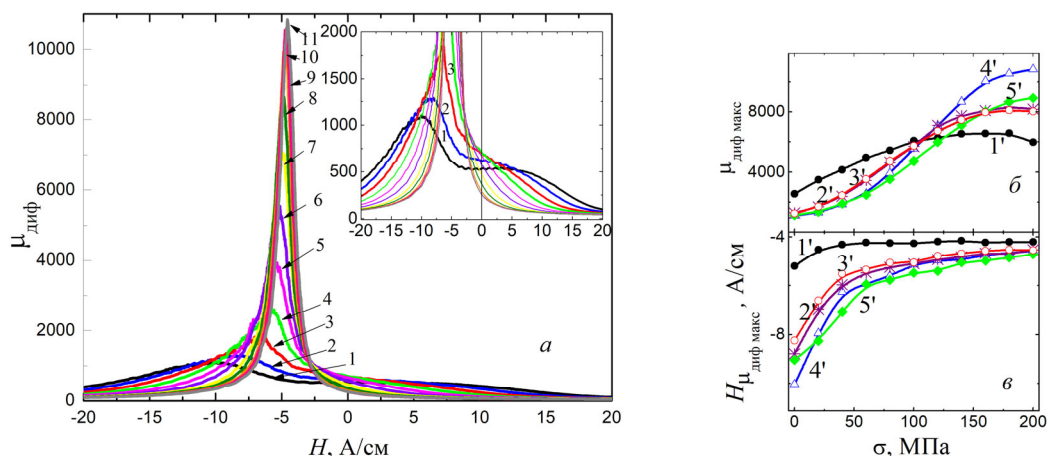


Рис. 4. (а) – зависимости $\mu_{\text{диф}}(H)$ для образца, предварительно циклически деформированного на 100 тыс. циклов, при различных величинах приложенных растягивающих напряжений σ : кривая 1 – $\sigma = 0$; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100; 7 – 120; 8 – 140; 9 – 160; 10 – 180; 11 – 200 МПа;

(б) – зависимости $\mu_{\text{диф макс}}(\sigma)$ для образцов, предварительно циклически деформированных на различное количество циклов; (в) – $H_{\mu_{\text{диф макс}}}(\sigma)$. Кривая 1' (●) – $n = 0$; 2' (*) – 30 тыс.; 3' (○) – 50 тыс.; 4' (Δ) – 100 тыс.; 5' (◆) – 300 тыс. циклов.

На рис. 5 (а, б и в) приведены полевые зависимости продольной магнитострикции λ при растягивающей нагрузке различной величины для образцов из стали 08Г2Б, испытанных на отнулевое циклическое растяжение с количеством циклов 0, 30 тыс. и 100 тыс. циклов, соответственно. Как было отмечено в [10, 13], 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. 5 (а, б и в), соответствующие состоянию образцов до деформирования статическим растяжением, можно видеть увеличение положительного участка с ростом количества циклов предварительного циклического 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 30 тыс. циклов – в диапазоне растягивающих напряжений от 160 до 180 МПа, для 100 тыс. циклов – выше 180 МПа.

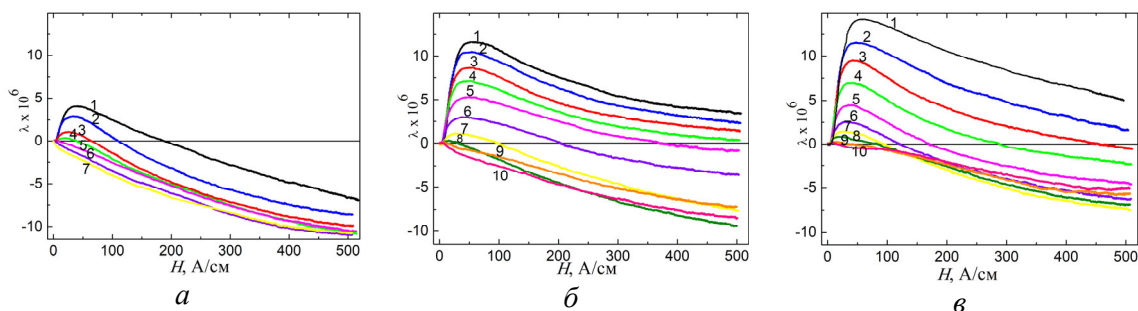


Рис. 5..... Полевые зависимости продольной магнитострикции при различных значениях растягивающих напряжений для образцов, предварительно испытанных на отнулевое циклическое растяжение с различным количеством циклов. а – 0; б – 30; в – 100 тыс. циклов. Кривая 1 – $\sigma = 0$; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100; 7 – 120; 8 – 140; 9 – 160; 10 – 180 МПа.

Особенностью сталей с ОЦК структурой, то есть большинства марок конструкционных сталей, является то, что, во-первых, их магнитострикция характеризуется константами разного знака (положительной λ_{100} и отрицательной λ_{111}) и, во-вторых, что в зависимости от НДС стального изделия его результирующая магнитострикция может менять свой знак. Переход магнитострикции в отрицательную область объясняется тем, что в этих условиях исчезают 90-градусные соседства доменов, остаются только 180-градусные доменные границы, смещения которых не приводят к магнитострикционным эффектам. Преобладающее влияние на магнитострикцию начинают оказывать процессы вращения векторов намагниченности, в результате чего суммарная магнитострикция стали определяется ее отрицательной константой λ_{111} .

Изменение характера полевой зависимости продольной магнитострикции под действием упругого одноосного нагружения определяет особенности поведения магнитных характеристик под действием тех же нагрузок [6, 8, 10, 13, 14]. В диапазоне напряжений, где произошли смена знака магнитострикции и, соответственно, изменение типа магнитной текстуры, на зависимостях магнитных параметров, измеренных вдоль направления нагружения, от растягивающих напряжений формируются экстремумы.

Соответствие положений минимумов продольной коэрцитивной силы значениям напряжений, при которых продольная магнитострикция становилась отрицательной, было отмечено в работах [8, 10].

4. 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, отношение обратимой магнитной проницаемости к начальной магнитной проницаемости, 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_p_a. При выполнении работы было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН.

Список литературы

1. Muzhitskii V. F., B. E. Popov, G. Y. Bezlyudko, V. V. Zarudnyi, E. A. Levin. Magnetic monitoring of the stress-strain state and residual safe life of the steel structures of hoisting cranes. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 2, 1996, pp 97-102.
2. Chen H.-E., S. Xie, Z. Chen, T. Takagi, T. Uchimoto, K. Yoshihara. Quantitative nondestructive evaluation of plastic deformation in carbon steel based on electromagnetic methods. *Materials Transactions*, Vol. 55, No. 12, 2014, pp 1806-1815.
3. Gorkunov E. S., Yu. V. Subachev, A. M. Povolotskaya, S. M. Zadvorkin. 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*, Vol. 51, No. 9, 2015, pp 563–572.
4. Gorkunov E. S., A. M. Povolotskaya, S. M. Zadvorkin, E. A. Putilova. 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*, Vol. 53, No. 9, 2017, pp 636-643.
5. Gorkunov E. S., A. M. Povolotskaya, S. M. Zadvorkin, E. A. Putilova, A. N. Mushnikov, E. G. Bazulin, A. Kh. Vopilkin. Some Features in the Behavior of Magnetic and Acoustic Characteristics of Hot-Rolled 08G2B Steel under Cyclic Loading. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 55, No. 11, 2019, pp 827–836.
6. Bozorth R. *Ferromagnetizm [Ferromagnetism]*. Moscow: IIL, 1956, 784 p.
7. Kuleev V. G., E. S. Gorkunov. Mechanisms of the effect of internal and external stresses on the coercivity of ferromagnetic steels. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 33, No. 11, 1997, pp 741-753.
8. Gorkunov E. S., A. M. Povoltskaya, K. E. Solov'ev, S. M. Zadvorkin. The Influence of the Magnetoelastic Effect on the Hysteretic Properties of Medium-Carbon Steel during Uniaxial Loading. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 46, No. 9, 2010, pp 638-644.
9. Novikov V. F., T. A. Yatsenko, M. S. Basharev. Coercive force of low-carbon steels as a function of uniaxial stress. Part I. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 37, No. 11, 2001, pp 799-804.
10. Gorkunov E. S., Yu. V. Subachev, A. M. Povolotskaya, S. M. Zadvorkin. The Influence of an Elastic Unuaxial Deformation of a Medium-Carbon Steel on the Its Magnetostriction in the Longitudinal and Transverse Directions. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 49, No. 10, 2013, pp 584-594.
11. 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*, Vol. 428, 2017, pp 223–228.
12. Nichipuruk A. P., Noskova N. I., Gorkunov E.S., Ponomareva E. G. Influence of dislocation structure caused by plastic deformation on magnetic and magnetoelastic properties of iron and low-carbon steel. *Fizika Metallov i Metallovedenie*, No. 12, 1992, pp 81-87.
13. 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*, Vol. 50, No. 8, 2014, pp 469-480.
14. Leuning N., S. Steentjes, M. Schulte, W. Bleck, K. Hameyer. Effect of elastic and plastic tensile mechanical loading on the magnetic properties of NGO electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 417, 2016, pp 42-48.