

УДК 620.179.14

ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗЦОВ ИЗ КОРПУСНОЙ СТАЛИ 20ГН С РАЗЛИЧНЫМ ИСХОДНЫМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ПРИ УПРУГОМ РАСТЯЖЕНИИ

А. М. ПОВОЛОЦКАЯ, А. Н. МУШНИКОВ

Институт машиноведения УрО РАН

Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14

EVOLUTION OF THE MAGNETIC PARAMETERS OF 20GN HULL STEEL SPECIMENS WITH DIFFERENT INITIAL STRESS-STRAIN STATES UNDER ELASTIC TENSION

A. M. POVOLOTSKAYA, A. N. MUSHNIKOV

Аннотация. В работе представлены результаты изучения особенностей поведения магнитных характеристик образцов из корпусной стали 20ГН, предварительно пластически деформированных растяжением на различные степени, в условиях последующего упругого одноосного растяжения. Показано, что рассматриваемые в работе параметры магнитного гистерезиса с ростом приложенных напряжений изменяются немонотонно, с образованием экстремумов. Величины приложенных напряжений, при которых формируются эти экстремумы, зависят от уровня остаточных напряжений сжатия, наведенных предварительным пластическим нагружением вдоль направления его действия. Сопоставлены результаты измерений гистерезисных и магнитострикционных свойств предварительно пластически деформированной растяжением исследуемой стали при последующем упругом одноосном растяжении.

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

Abstract. The paper presents on the results of studying the peculiarities of magnetic behavior of 20GN hull steel specimens preliminary plastically tensioned to various levels under subsequent elastic uniaxial tension. It is shown that the magnetic hysteresis parameters vary nonmonotonically with increasing applied stresses, with the formation of extrema. The values of applied stresses at which these extrema are formed depend on the level of residual compressive stresses induced by plastic preloading along the direction of its action. The results of measurements of the hysteretic and magnetostrictive properties of the steel under study preliminarily plastically deformed by tension under subsequent elastic uniaxial tension are compared.

Keywords: elastic uniaxial tension, magnetostriction, differential magnetic permeability.

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 магнитострикции, при последующем упругом одноосном растяжении с целью выявления характера наведенной таким силовым воздействием магнитной анизотропии, а также определения взаимосвязи гистерезисных и магнитострикционных свойств

исследуемой стали в условиях упругого деформирования растяжением.

Для исследований из стали 20ГН были вырезаны плоские образцы с головками. Образцы сечением 5×10 мм имели рабочую часть длиной 60 мм. На первом этапе образцы подвергали одноосному растяжению до значений пластической деформации ε : 0,75 %; 1,28 %; 1,96 %; 5,01 %; 7,53 %; 10 %; 12,5 %; 15,1 % и 17,5 %. Один образец оставили в исходном состоянии ($\varepsilon = 0$ %). На втором этапе предварительно пластически деформированные образцы подвергали одноосному упругому растяжению на испытательной машине УММ-5.

На рис. 1, а приведены полевые зависимости линейной продольной магнитострикции λ для образцов, испытанных на пластическое растяжение на различные степени. Для образца в исходном состоянии ($\varepsilon = 0$) магнитострикция с увеличением напряженности магнитного поля H сначала возрастает до максимума $\lambda_{\max}$, затем уменьшается, достигает нулевого значения и продолжает уменьшаться уже с отрицательным знаком. Для образцов, подвергнутых пластическому нагружению, при всех значениях напряженности магнитного поля $\lambda(H)$ положительна. При этом с ростом ε до значения 1,96 % существенно увеличивается площадь положительного участка полевой зависимости магнитострикции и, как видно на рис. 1, б, значительно возрастает величина максимума магнитострикции $\lambda_{\max}$. При дальнейшем увеличении ε от 1,96 % до 7,53 % площадь положительного участка $\lambda(H)$ и величина ее максимума практически не изменяются, а при достижении 10 % – начинают снижаться.

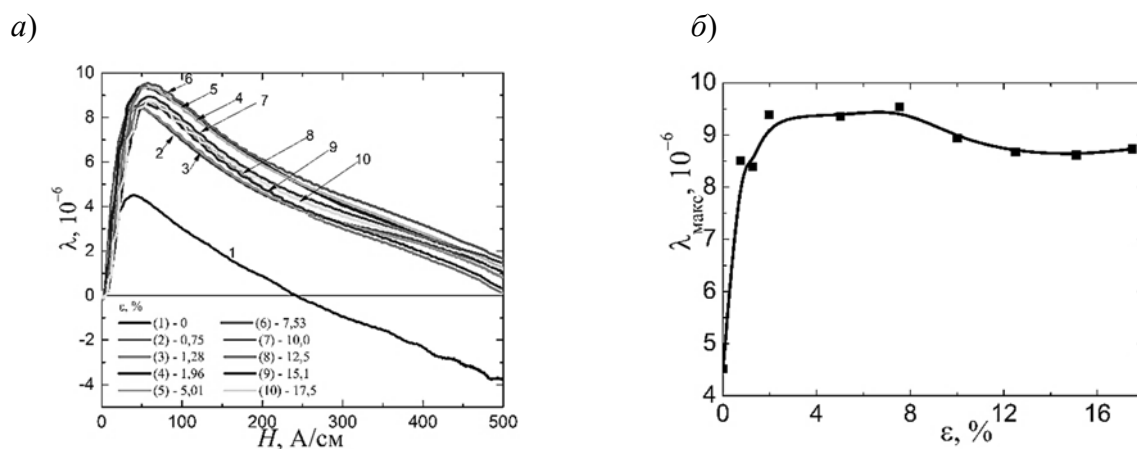


Рис. 1. Полевые зависимости линейной продольной магнитострикции λ образцов: а – зависимости $\lambda(H)$ образцов, пластически деформированных на различные степени ε ; б – зависимость $\lambda_{\max}(\varepsilon)$

Поведение $\lambda(H)$ для образцов, подвергнутых пластическому деформированию, характерно для поведения кривых магнитострикции при одноосном статическом сжатии [1–3] и является следствием формирования остаточных сжимающих напряжений различного уровня в направлении действия проведенной пластической деформации и возникновения текстуры типа «плоскость легкого намагничивания». При $\varepsilon = 10$ % величина $\lambda_{\max}$ уменьшается. Вероятно, это обусловлено тем, что уровень остаточных сжимающих напряжений,

достигнув своего предельного значения, при деформациях $\varepsilon \approx 10\%$ начинает снижаться.

На рис. 2 показаны зависимости магнитных характеристик образцов от приложенных напряжений σ при упругом растяжении после их предварительного пластического растяжения на различные степени ε . С увеличением σ коэрцитивная сила H_c , остаточная индукция B_r и максимальная магнитная проницаемость $\mu_{\max}$ всех образцов, одноосно деформированных до различной величины пластической деформации, изменяются с образованием экстремумов различной степени «выраженности». Наблюдаемое смещение экстремумов на зависимостях $H_c(\sigma)$, $B_r(\sigma)$ и $\mu_{\max}(\sigma)$ для образцов, пластически деформированных растяжением до различных уровней ε , обусловлено различным уровнем остаточных напряжений, вносимых предварительным пластическим нагружением.

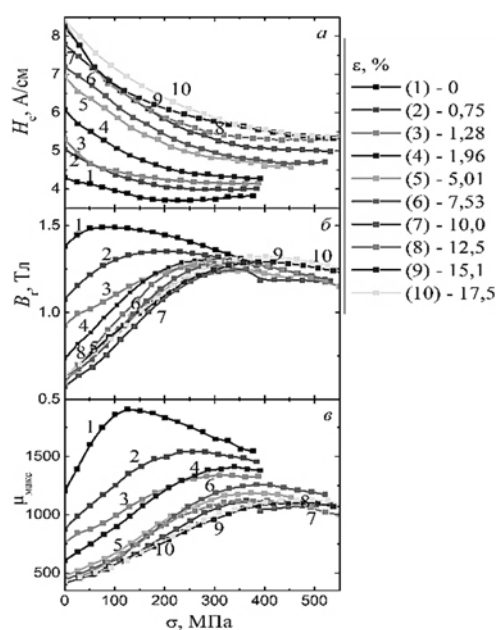


Рис. 2. Зависимости от приложенных растягивающих напряжений значений коэрцитивной силы (а), остаточной индукции (б) и максимальной магнитной проницаемости (в), измеренных на образцах, предварительно пластически деформированных на различные степени ε

На рис. 3 приведены полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ для образца, не подвергнутого предварительно пластической деформации растяжением ($\varepsilon = 0$), при различных значениях приложенных растягивающих напряжений σ . С увеличением растягивающих напряжений σ до величины $\sigma_{\text{extr}} = 150,9$ МПа высота пика $\mu_{\text{диф max}}$ сначала увеличивается, при этом расположение пика смещается в сторону более слабых полей, а при дальнейшем увеличении растягивающих напряжений уменьшается по величине, и расположение пика продолжает смещаться в сторону более слабых полей.

Полевые зависимости магнитострикции λ при растягивающей нагрузке различной величины для того же образца приведены на рис. 4. С ростом σ положительный участок $\lambda(H)$ уменьшается и при величине напряжений,

превышающей $\sigma_{\text{sign}} = 150,9$ МПа, совсем исчезает, а магнитострикция принимает только отрицательные значения. При нагрузках, не превышающих σ_{sign} , формируется магнитная текстура типа «ось легкого намагничивания», при которой векторы намагниченности выстраиваются преимущественно вдоль направления легкого намагничивания, ближайшего к оси растяжения, т. е. вдоль направления намагничивающего и перемангничивающего поля, что облегчает процессы перемангничивания. Когда магнитострикция принимает только отрицательные значения ($\sigma > \sigma_{\text{sign}}$), в процессе растяжения идет образование магнитной текстуры типа «плоскость легкого намагничивания», при которой векторам спонтанной намагниченности энергетически выгоднее выстроиться перпендикулярно оси растяжения и, соответственно, намагничивающему и перемангничивающему полю, что затрудняет процессы перемангничивания. Поэтому изменение характера полевой зависимости продольной магнитострикции под действием упругого одноосного нагружения и определяет особенности поведения магнитных характеристик под действием тех же нагрузок. В результате изменения типа магнитной текстуры при растягивающих напряжениях, где произошла смена знака магнитострикции, на зависимостях гистерезисных магнитных параметров $H_c(\sigma)$, $B_r(\sigma)$, $\mu_{\text{max}}(\sigma)$ и максимумов $\mu_{\text{диф}}(H)$ от растягивающих напряжений формируются экстремумы.

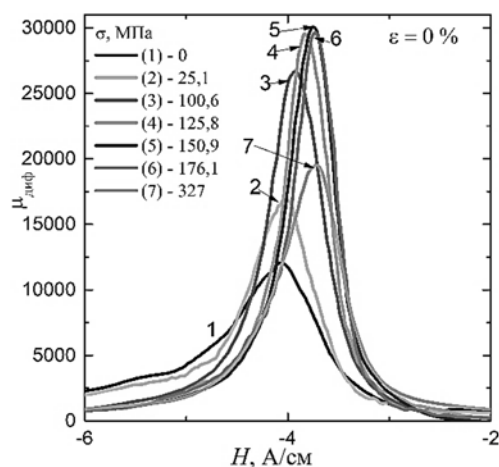


Рис. 3. Зависимости $\mu_{\text{диф}}(H)$ для образца с $\varepsilon = 0$ при различных величинах приложенных растягивающих напряжений σ

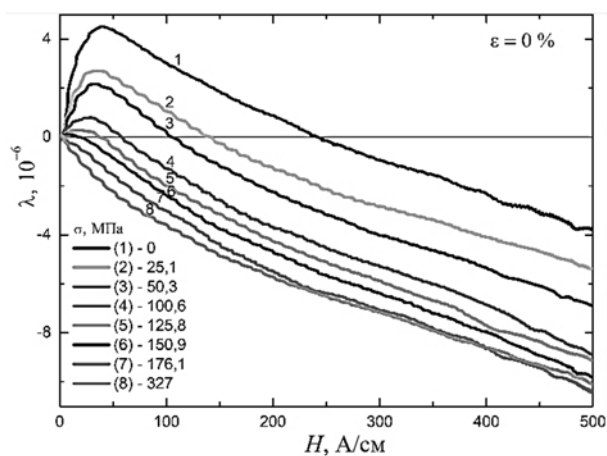


Рис. 4. Зависимости $\lambda(H)$ для образца с $\varepsilon = 0$ при различных величинах приложенных растягивающих напряжений σ

В качестве примера на рис. 5–7 показаны полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}(H)$ и соответствующие им полевые зависимости продольной магнитострикции при растягивающей нагрузке различной величины для образцов, предварительно деформированных растяжением до уровней пластической деформации 5,01 %; 10 % и 15,1 %. Проведено сопоставление величин приложенных напряжений σ_{sign} , при превышении которых полевые зависимости магнитострикции становятся отрицательными, и величин приложенных напряжений σ_{extr} , при которых формируются

экстремумы на зависимостях гистерезисных характеристик при упругом деформировании. Экспериментально показано совпадение величин σ_{extr} и σ_{sign} .

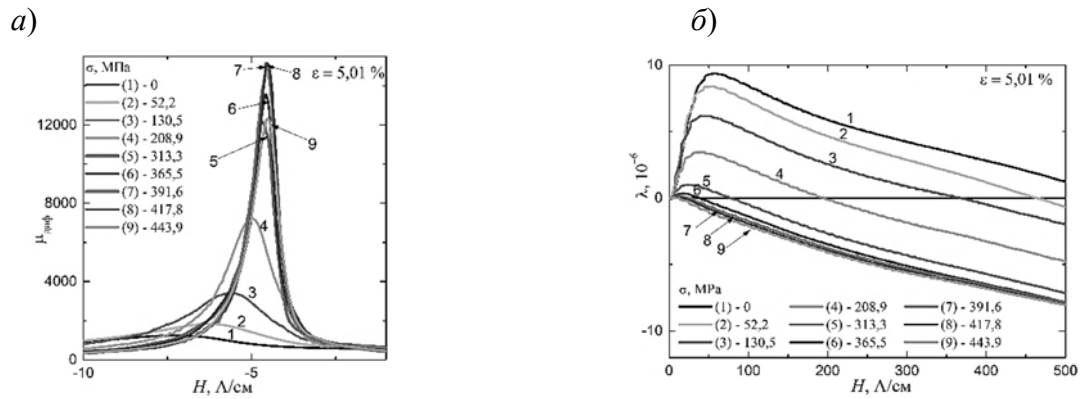


Рис. 5. Зависимости $\mu_{diff}(H)$ (a) и $\lambda(H)$ (б) при различных величинах σ для образца, пластически деформированного на степень $\varepsilon = 5.01\%$

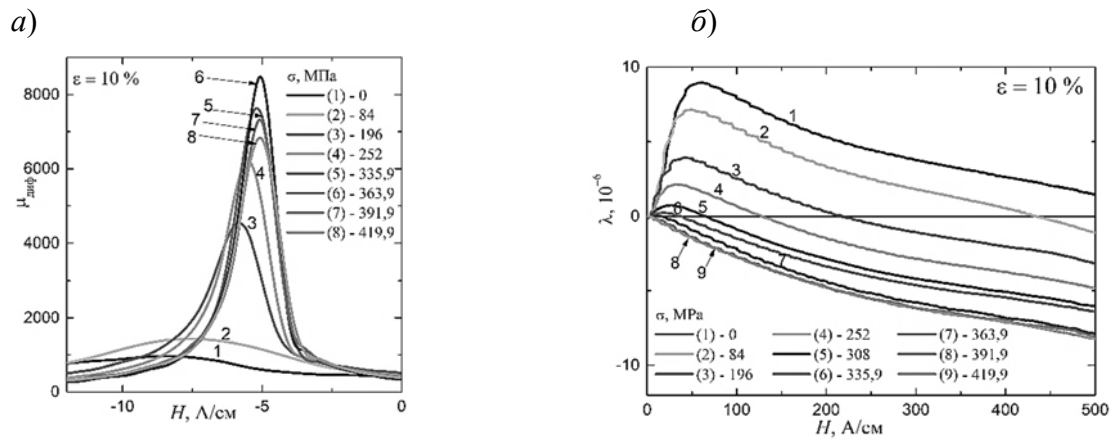


Рис. 6. Зависимости $\mu_{diff}(H)$ (a) и $\lambda(H)$ (б) при различных величинах σ для образца, пластически деформированного на степень $\varepsilon = 10\%$

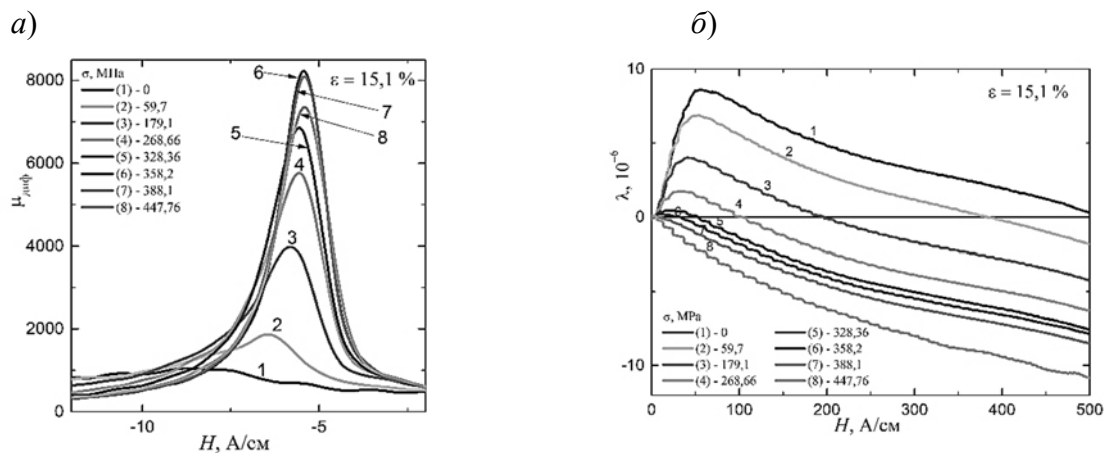


Рис. 7. Зависимости $\mu_{diff}(H)$ (a) и $\lambda(H)$ (б) при различных величинах σ для образца, пластически деформированного на степень $\varepsilon = 15.1\%$

Таким образом, закономерности изменения полевых зависимостей магнитострикции пластически деформируемой растяжением на различные степени корпусной стали 20ГН подтверждают факт формирования в образцах в направлении пластической нагрузки остаточных напряжений сжатия различного уровня.

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 на зависимостях гистерезисных магнитных параметров от приложенных напряжений, зависят от уровня наведенных предварительным пластическим нагружением остаточных напряжений сжатия.

Сопоставление результатов измерений гистерезисных и магнитострикционных свойств предварительно пластически деформированной растяжением на различные степени исследуемой стали 20ГН при последующем упругом деформировании показало, что диапазоны растягивающих напряжений, в которых происходит смена знака магнитострикции и, соответственно, смена типа магнитной текстуры, соответствуют диапазонам напряжений, в которых формируются экстремумы на зависимостях магнитных параметров от растягивающей нагрузки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-48-660035 р_а.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горкунов, Э. С. Влияние упругой одноосной деформации среднеуглеродистой стали на ее магнитострикцию в продольном и поперечном направлениях / Э. С. Горкунов [и др.] // Дефектоскопия. – 2013. – № 10. – С. 40–52.
2. Особенности поведения магнитных и акустических характеристик горячекатаной стали 08Г2Б при циклическом нагружении / А. М. Поволоцкая [и др.] // Дефектоскопия. – 2019. – Т. 55, № 11. – С. 21–31.
3. The Effect of Cyclic Preloading on the Magnetic Behavior of the Hot-Rolled 08G2B Steel Under Elastic Uniaxial Tension / A. M. Povolotskaya [et al.] // Research in Nondestructive Evaluation. – 2021. – Vol. 32, № 6. – P. 276–294.

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